

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE PARIS-SACLAY



école
normale
supérieure
paris-saclay

université
PARIS-SACLAY

Projet CoBRA 2024-2025



Équipe :

MAZOYER Jeremy, DESPAGNE Lucas, SUJAT Samuel, AUDRY Michel, VIVET Maurice,
BOUVIER REVIGLIO Andrea, TIMOCHENKO Sergey, BOUGEARD Gael

Encadrants :

Bastien DURAND, Fabien ADAM, Anthony JUTON, Bruce ANGLADE

Table des matières

0.1 Cahier des charges	3
1 Cinématique de vol : Structure mécanique - MAZOYER Jérémie, DESPAGNE Lucas	3
1.1 Travail réalisé l'année dernière - MAZOYER Jérémie, DESPAGNE Lucas	3
1.2 Amélioration de la cinématique de la solution Duo	4
1.2.1 Rappel des exigences	4
1.2.2 Principe d'amélioration	5
1.2.3 Montage de cette nouvelle solution	5
1.2.4 Résultat du montage	6
1.3 Implémentation des fonctions mécaniques sur la nacelle	6
2 Préhension et dépôt : SUJAT & AUDRY	8
2.1 Introduction	9
2.2 Cahier des charges	9
2.2.1 Analyse fonctionnelle et solutions envisageables	9
2.3 Solutions techniques	10
2.3.1 Les Pinces :	10
2.3.2 Pince mécanique	10
2.3.3 Pince motorisée	11
2.3.4 Treuil	11
2.4 Réalisation	12
2.4.1 Procédé de fabrication	12
2.4.2 Matériau	12
2.5 Dimensionnement	12
2.5.1 Moteur treuil	12
2.5.2 Moteur pince	12
2.6 Résultats et validation	13
2.7 Conclusion	13
3 Électronique embarquée : VIVET et BOUVIER REVIGLIO	14
3.1 Carte Electronique	14
3.1.1 réalisation	14
3.2 Capteurs	15
3.2.1 Objectifs	15
3.2.2 Centrale inertie : BNO055	15
3.2.3 Centrale inertie : BHI260&BHI360	16
3.2.4 Angles d'Euler	17
3.2.5 Télémètre TF Luna	17
3.2.6 Apriltags (Caméra)	19
3.2.7 Conclusion capteurs	20
3.3 Commande	20
3.3.1 État de l'art avant 2024-2025	20
3.3.2 Modifications 2024-2025 : Configuration des moteurs	21
3.3.3 Modifications 2024-2025 : Programme de test	21
3.3.4 Modifications 2024-2025 : Librairie de commande des moteurs brushless	22

4 Modélisation/contrôle-commande : BOUGEARD et TIMOCHENKO	22
4.1 Modélisation	22
4.2 Asservissement	22
4.2.1 État de l'art actuel	22
4.2.2 Perspectives sur les futures améliorations	23
5 Annexes	27
5.1 PRÉHENSION ET DÉPÔT	27
5.1.1 Pince mécanique	27
5.1.2 Pince motorisée	28
5.1.3 Treuil	29
5.2 Composants	30
5.2.1 composants à interfaçer	30
5.2.2 Composants sur la carte	31
5.3 Code pour le calcul de la distance z	31
5.4 Code main de l'interface utilisateur	31
5.5 Modèle dynamique du dirigeable	33

0.1 Cahier des charges

L'objectif est réaliser et valider expérimentalement un dirigeable autonome qui permet de déplacer un colis d'un point A à un point B en suivant une trajectoire. Le dirigeable doit donc posséder un système de préhension et dépôt de colis avec une pince et un treuil. Le colis. Au point de départ A, l'utilisateur doit accrocher le colis sur la pince. Ensuite, le dirigeable doit déplacer le colis au point d'arrivée B. Finalement, le dirigeable doit déposer le colis sur le point B avec une précision de l'ordre du décimètre.

Notre travail se base sur celui de l'année dernière dont l'objectif était de réaliser un dirigeable pilotable par manette PS4 qui ferait une course autour de l'amphithéâtre Alain Aspect.

1 Cinématique de vol : Structure mécanique - MAZOYER Jérémie, DESPAGNE Lucas

L'objectif de cette partie est la conception d'une structure mécanique se fixant uniquement au centre du dirigeable permettant de fixer tous les éléments nécessaires à son bon fonctionnement. Nous listons les éléments suivant :

- Système de propulsion
- Carte de commande et Raspberry pi 5
- Capteurs (Télémètre, caméra, centrale inertuelle)
- Batterie
- Système Treuil + pince

Tout cet ensemble doit répondre à des exigences strictes, tout d'abord de masse mais aussi de performances, de précision mais aussi de puissance.

1.1 Travail réalisé l'année dernière - MAZOYER Jérémie, DESPAGNE Lucas

Un prototype du nom de *Solution Duo* a déjà été pensée et imaginée lors du projet pluri-disciplinaire Saphire 2023/2024. Nous pouvons apercevoir sur la figure 1 le travail récupéré par notre groupe. [1]



FIGURE 1 – Solution de l'équipe 2 du projet CoBRA 2023-2024

Dans la partie II-3 du rapport réalisé l'an dernier par cette équipe, un bilan de masse a été réalisé pour une **masse totale de 661 grammes**. Toutefois, des études menées par nos soins en début d'année ont pu montrer que la masse maximale portée par le dirigeable est d'environ 650 grammes. De nouveaux objectifs sont à satisfaire, ainsi de nouveaux composants et une nouvelle conception du prototype de la solution Duo sont nécessaires. La cinématique était assurée par deux hélices se situant dans le même plan, fixées sur un axe parallèle au sol pouvant tourner sur lui-même. Ainsi, pour tourner à gauche ou à droite la méthode du chars d'assaut était utilisée. Les moteurs brushless des deux hélices ne pouvaient tourner que dans un seul sens, cela complique le déplacement en marche arrière du dirigeable. Nous notons aussi le surdimensionnement de certains éléments comme les engrenages, la présence de roulements ou encore la dimension de la tige en carbone (6mm plein) soutenant les deux cerceaux moteurs, eux aussi surdimensionnés. Les performances de la batterie permettaient d'alimenter le système pendant plusieurs heures, ce qui peut être réduit afin d'alléger le système. Les moteurs brushless utilisés sont eux aussi trop puissants. Des solutions comme l'ajout de cerceaux moteurs à l'avant et à l'arrière du dirigeable pouvaient être apporté pour améliorer les précisions cinématiques et les performances dynamiques, toutefois nous nous sommes contraints à maintenir l'architecture de la solution Duo pour son esthétisme, sa facilité de montage sur le dirigeable et la poursuite d'un travail rigoureux et prometteur de nos camarades de l'année dernière.

1.2 Amélioration de la cinématique de la solution Duo

1.2.1 Rappel des exigences

Le cahier des exigences concernant la nacelle et la cinématique du dirigeable sont les suivantes :

1. La masse doit être minimisée, idéalement une masse totale d'environ 660 grammes.
2. La structure doit être rigide et solide
3. La structure doit pouvoir se réparer rapidement et se fixer facilement sur le dirigeable
4. La structure permet la fixation de tous les sous-systèmes embarqués
5. Le dirigeable doit pouvoir se maintenir stable dans l'espace

6. Nous n'oublierons pas l'exigence 5 notée par les élèves de l'équipe 2 l'an passé : "la structure doit faire preuve d'un esthétisme suscitant un sentiment d'admiration de la part des spectateurs, tel qu'il suffit à lui seul à élire vainqueur l'équipe [CobraCassés]."

1.2.2 Principe d'amélioration

La contrainte majeure à satisfaire est la livraison de colis. Cette livraison exige un comportement cinématique précis et une capacité accrue de stabilisation du dirigeable dans l'espace. Il est par conséquent obligatoire de garantir les translations selon les trois axes possibles et indépendantes. Malheureusement, la solution Duo ne pouvait pas se déplacer par translation à gauche ou à droite. Pour s'orienter, ils utilisaient la stratégie de chars d'assaut : tourner plus vite d'un côté que l'autre pour tourner en avançant. Cette stratégie n'est plus réalisable dans le cas d'apprehension d'un colis.

Nous avons donc imaginé à permettre aux hélices une rotation supplémentaire : rotation selon la direction des hélices. Pour cela nous avons choisi une solution à partir de fil et d'un servomoteur identique à celui utilisé dans le prototype. Nous noterons par la suite ce nouveau servomoteur (2).

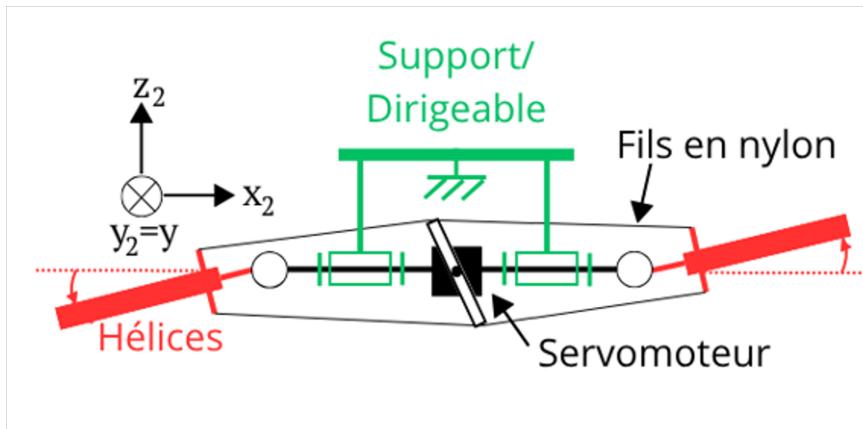


FIGURE 2 – Schéma de principe de fonctionnement

En réalisant cette solution technique pour les deux supports hélices, nous sommes en mesure de garantir une nouvelle rotation de celles-ci. Ce nouveau déplacement permet la translation latérale du dirigeable. Nous supposons pour cela le fil responsable du pilotage de la liaison pivot inextensible. Toutefois, en pratique ce n'est malheureusement pas le cas et notons un léger jeu lors du montage. Malgré ce défaut, il s'agit d'une solution technique très peu coûteuse en masse et permet d'assurer un mouvement précis.

1.2.3 Montage de cette nouvelle solution

Plusieurs difficultés ont été rencontrées lors de l'implémentation de cette solution sur le prototype pré-existant. Puisque la tige en carbone possède déjà une rotation selon son propre axe, nous sommes obligés de fixer le servo-moteur (2) sur l'axe de rotation. De plus, puisqu'il doit commander les deux liaisons pivots en même temps, nous sommes contraints de le fixer au centre (ne pas influencer les centres des masses du système global) et de faire circuler les fils **dans l'axe en carbone**. Pour cela nous avons dû privilégier des tiges en carbone creuse. Nous avons aussi

prit soin de réduire le diamètre de cet axe à 5 mm au lieu de 6 mm pour réduire davantage la masse tout en préservant une stabilité mécanique. Voici une liste des difficultés rencontrées :

- Percer l'axe en carbone
- Circular les fils au sein de la tige en carbone et les refaire sortir dans les trous percés
- Tendre le plus possible les câbles sans trop contraindre le servo-moteur (2) pour se rapprocher du caractère inextensible
- Assurer une symétrie pour les deux hélices : même perçages (orientation et position) et même étirage des quatre fils.

1.2.4 Résultat du montage

Plusieurs servo-moteurs ont été essayé pour commander efficacement les deux nouvelles liaisons pivots. Bien évidemment, nous avons essayé d'utiliser le servo-moteur le moins lourd permettant de remplir cette tâche. Il est aussi à noter que l'encombrement fut une contrainte à prendre en compte. Finalement, le servo-moteur utilisé par l'équipe de l'an dernier pour assurer la rotation de l'axe permettra aussi d'assurer ces deux nouvelles rotations. Ce servo-moteur HS-475-HB (lie "légèreté" et puissance. Le fil utilisé est du fil en nylon : fin, léger, résistant et presque inextensible.

1.3 Implémentation des fonctions mécaniques sur la nacelle

Toujours dans le même objectif de réduire au maximum la masse embarquée, nous avons pris soin d'optimiser la nacelle. La fixation de celle-ci sur le dirigeable se fait encore par velcros. Nous gardons donc la possibilité de fixer ou d'enlever la solution technique rapidement.

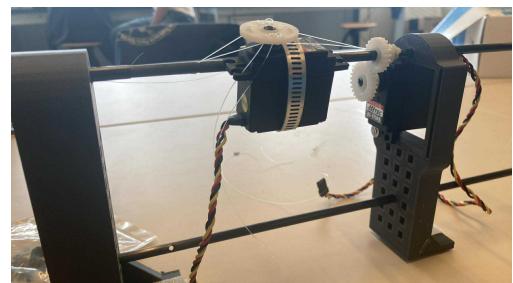
Plusieurs pièces ont été réutilisées mais optimisées :

- l'utilisation d'une distribution de puissance par des engrenages plus petits.
- Réduction de la hauteur et du rayon des cerceaux moteurs brushless pour minimiser le volume de matière

Les deux roulements initialement responsables de la rotation de la tige en carbone ont été supprimés. La tige translate directement dans deux alésages, et la translation a été supprimée par obstacle de matière.



(a) Liaison pivot sur l'axe en carbone



(b) Nouveau servo-moteur pilotant la liaison pivot

En ce qui concerne le cœur de la nacelle, nous avons dû tout ré-concevoir pour fixer correctement les différents composants. Afin de réduire au maximum la matière et le prix de l'impression 3D, nous avons réalisé un support sous forme d'un châssis à partir de 2 tiges en carbone creuses de diamètre 5 mm. Nous séparons donc la nacelle en quatre petites pièces, ce

qui garantit la réparabilité de notre système. Voici un schéma de définition de ces quatre pièces, notées **support nord**, **support sud**, **support ouest** et **support est**. Le nord correspond à l'avant du dirigeable, puis nous pouvons en déduire les autres positions.

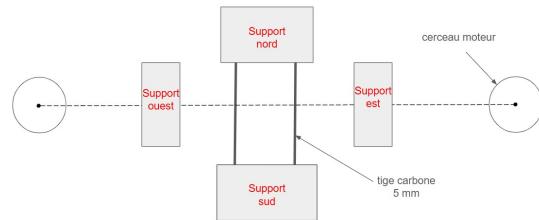
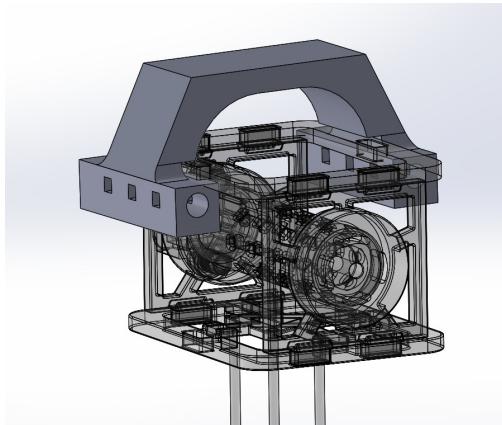


FIGURE 4 – Schéma vue du haut de la nacelle

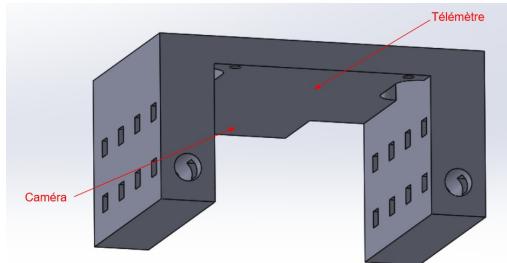
Nous pouvons avoir la masse de ces quatre composants :

Nom pièce	masse (g)
Support est	51,6
Support ouest	83.8
Support nord	20.2
Support Sud	38.8
Total	193.4

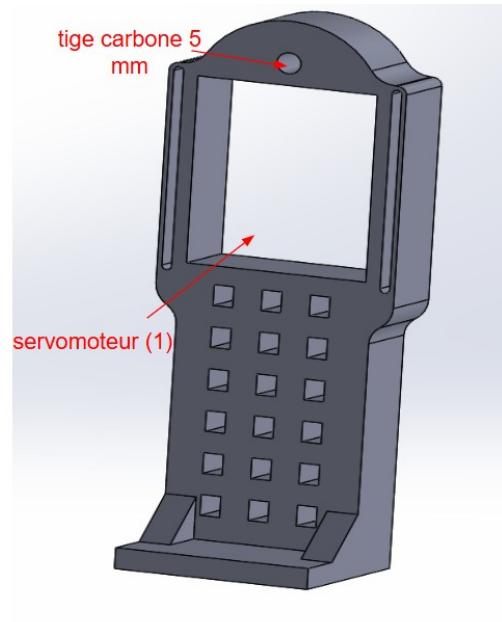
Avec l'ajout des deux nouveaux cerceaux et les deux servomoteurs ainsi que la masse de toutes les tiges de carbone utilisées, nous atteignons une **masse totale de la nacelle de 293 grammes**. Ci-dessus se trouve le dessin des composants de la nacelle sous le logiciel SolidWorks.



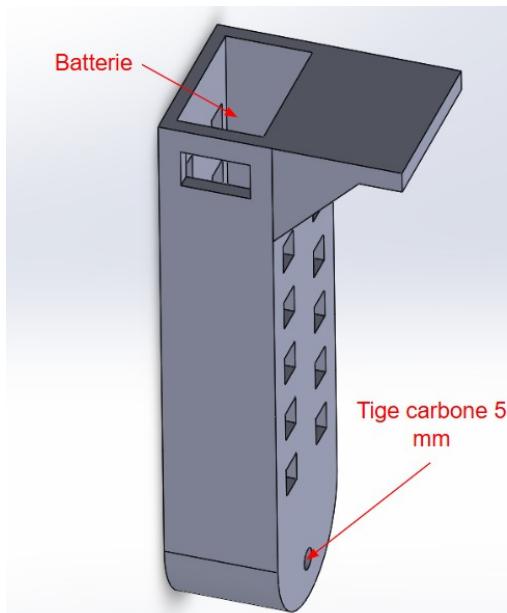
(a) Support nord, responsable de la fixation du treuil



(b) Support sud, responsable de la fixation des capteurs



(c) Support est responsable de la fixation du servomoteur (1)



(d) Support ouest, responsable de la fixation de la batterie

FIGURE 5 – Définition de la nacelle

2 Préhension et dépôt : SUJAT & AUDRY

2.1 Introduction

Dans le cadre de ce projet, nous nous concentrerons sur la partie mécanique du système de préhension intégré au dirigeable. Cette section englobe la conception et la réalisation d'un mécanisme capable de saisir un colis au sol, de le soulever pour permettre son transport, puis de le déposer avec précision.

Nous commencerons par présenter les attendus du projet à travers le cahier des charges, avant de procéder à une analyse synthétique des fonctionnalités du système. Nous proposerons ensuite différentes solutions techniques, puis nous décrirons les méthodes de réalisation adoptées. Enfin, nous comparerons les résultats obtenus aux objectifs initiaux.

2.2 Cahier des charges

Objectif général : Développer un système embarqué capable de saisir, lever verticalement, et déposer un objet, tout en répondant aux contraintes de poids, de dimensions et d'environnement d'utilisation.

Les fonctionnalités attendues :

1. Préhension d'un colis de masse $10 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$. Avec une possibilité de positionnement manuel
2. Saisir, éléver et déposer un colis correspondant à un cube de 50 mm de côté
3. Élévation verticale de la charge sur une course de 1 mètre.
4. Dépose contrôlée du colis au sol.
5. Intégration complète du système sur le dirigeable
6. Il doit être le plus léger possible pour ne pas nuire à la portance du dirigeable.

Les contraintes techniques :

1. Poids minimal : toute la structure doit être optimisée en poids sans compromettre la robustesse du système.
2. Encombrement minimal : la structure doit être moins encombrante pour éviter les collisions avec la propulsion du dirigeable.

2.2.1 Analyse fonctionnelle et solutions envisageables

Fonction / Exigence	Contraintes associées	Solutions envisagées
Préhension du colis	Précision requise / objet léger	Pince motorisée ou mécanique compacte et légère
Saisie d'un cube de 50 mm	Forme cubique / adhérence	Patins ou ventouse légère
Course verticale de 1 m	Encombrement mini / fiabilité du mécanisme	Treuil à fil ou glissière verticale
Intégration sur dirigeable	Poids réduit / équilibre de la charge	Utilisation de PLA ou ABS, structure allégée par CAO
Masse totale $\leq 60 \text{ g}$	Limite stricte à respecter / portance du dirigeable	Optimisation du design, composants légers

2.3 Solutions techniques

2.3.1 Les Pinces :

Nous avons conçu deux types de pinces (voir figure 6) afin de les comparer et déterminer laquelle répond le mieux aux exigences du cahier des charges.

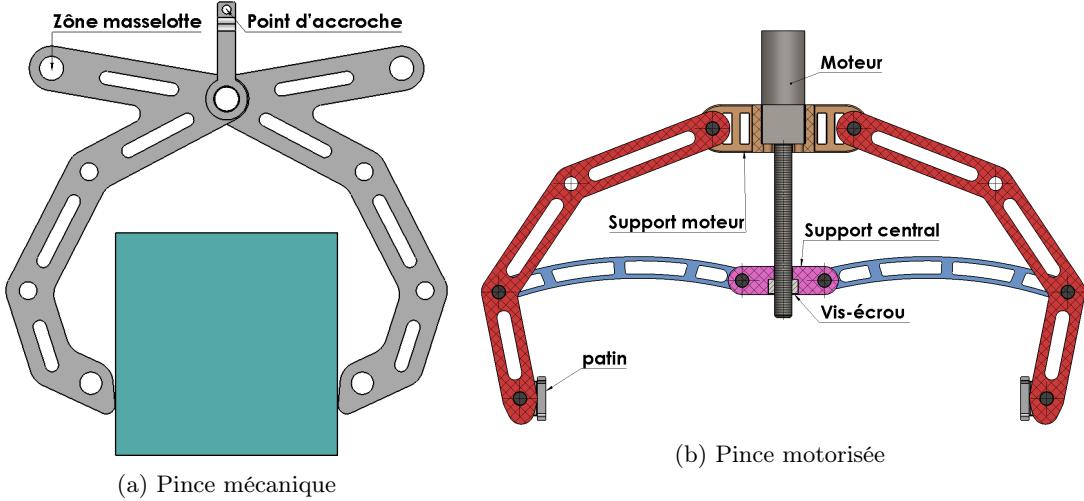


FIGURE 6 – Les pinces

2.3.2 Pince mécanique

Cette pince présente l'avantage de ne nécessiter ni moteur ni câblage. Inspirée des pinces de levage industrielles, elle fonctionne uniquement par gravité : elle se referme sous son propre poids.

Principe de fonctionnement : Comme illustré en figure 7, la pince est suspendue par un fil attaché à son point d'accroche. En tirant sur ce fil après avoir placé le colis, elle se referme automatiquement. Une ouverture manuelle reste nécessaire pour la recharger.

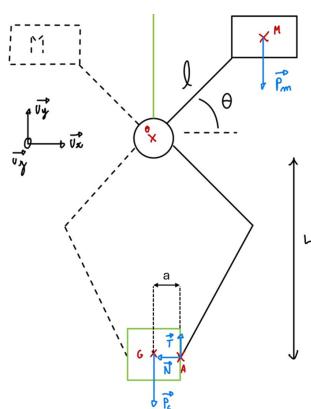


FIGURE 7 – Schéma de la pince mécanique

Masselotte nécessaire à la préhension du colis : On néglige la masse du bras devant celle de la masselotte M .

On a : $\vec{P}_m = M\vec{g}$ donc le moment du à la masselotte au point d'articulation O est : $\vec{M}_O(\vec{P}) = \vec{OM} \wedge \vec{P}_m = -Mgl \cos(\theta) \cdot \vec{z} = Mgl$ (au maximum).

On a également la loi de Coulomb : $||\vec{T}_{\text{pince} \rightarrow \text{colis}}|| = f ||\vec{N}_{\text{pince} \rightarrow \text{colis}}||$; sachant que le colis pèse 10 g et qu'il faut prendre en compte les 2 pinces. Au final on obtient :

$$M = \frac{P_c(fa + L)}{fgl} \Rightarrow M = \frac{(fa + L)}{10fgl}$$

Remarques : Les tests ont révélé un problème d'adhérence : avec ses 12 g, la pince ne génère pas une force de contact suffisante pour assurer une bonne prise. Selon le principe fondamental de la statique et la loi de Coulomb (voir figure 7), avec un coefficient de frottement $f \approx 0.4$, il faudrait ajouter 40 g (deux masselottes de 20 g de chaque côté), portant la masse totale à 52 g hors système de treuil. Une optimisation géométrique pourrait améliorer le bras de levier, mais au prix d'un encombrement accru.

2.3.3 Pince motorisée

La pince motorisée permet une ouverture et une fermeture automatisées, assurant une bonne adhérence grâce au couple élevé du moteur à courant continu. Inspirée de la gamme *Makeblock*, elle offre une utilisation fiable, bien qu'elle nécessite un câblage pour l'alimentation du moteur.

Principe de fonctionnement : Comme illustré en figures 6 et 8, la pince est suspendue par trois fils fixés au support moteur, ce qui limite les balancements causés par les mouvements du dirigeable. Une fois le colis positionné, la commande d'ouverture/fermeture peut être déclenchée à distance, provoquant la rotation du moteur. Cette rotation entraîne alors un déplacement vertical du support central par une liaison vis-écrou (figure 6b), entraînant ainsi la fermeture/ouverture de la pince. À noter que l'écrou est encastré dans le support central,

Remarques : La pince pèse environ 23g, moteur inclus. Ses patins assurent une large surface de contact avec le cube, garantissant ainsi la stabilité pendant le déplacement du dirigeable. Nous avons dimensionné le moteur (figure 25) pour pouvoir prendre le plus léger possible tout en répondant au mieux au cahier des charges.

2.3.4 Treuil

Pour réaliser la course verticale de 1 m imposée par le cahier des charges, nous avons opté pour un treuil miniature optimisé, présenté en figure 8.

Principe de fonctionnement : Le treuil est constitué d'un tambour percé (arbre en rotation), d'un bâti, d'un triangle de guidage et d'un moteur. Le moteur, encastré dans le bâti, entraîne le tambour qui enroule les fils en nylon supportant la pince. Les perçages dans le tambour permettent à la fois de fixer les fils de la pince et de faire passer le fil électrique d'alimentation de la pince. Le triangle de guidage assure la translation des fils afin de garantir un enroulement régulier, tandis que le tambour est guidé en rotation par le bâti.

Le treuil est fixé au dirigeable : seule la pince effectue la course verticale. Son moteur est alimenté depuis le treuil, ce qui implique que le câble d'alimentation est enroulé avec les fils en nylon. Pour éviter toute détérioration du câble lors de l'enroulement, un collecteur tournant est utilisé. Il permet d'assurer la continuité électrique sans rupture de contact. Ce collecteur est fixé sur le bâti, comme illustré en figure 8.

Remarques : Le treuil permet une bonne élévation pour seulement 34 g. Au total, le système de préhension pèse environ 57 g. Cependant, nous avons constaté un problème au niveau de l'enroulement : le fil électrique, plus rigide que les fils en nylon, engendre un léger dysfonctionnement. Néanmoins, ceci reste négligeable pour le fonctionnement global, c'est-à-dire que la pince effectue sa course d'un mètre sans difficulté.

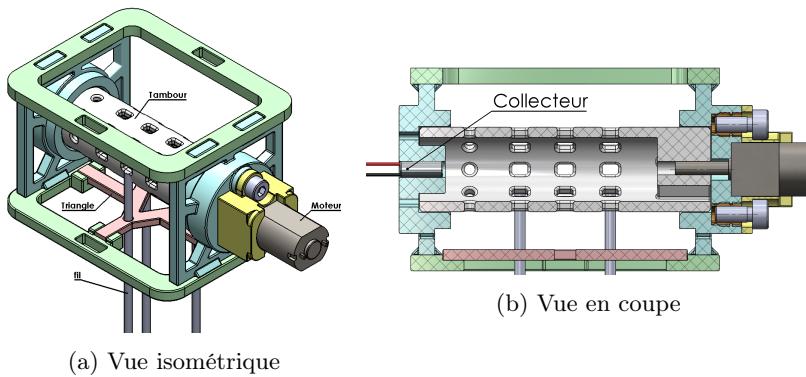


FIGURE 8 – Le treuil

2.4 Réalisation

2.4.1 Procédé de fabrication

Nous avons réalisé la totalité des pièces par impression 3D, à l'exception des moteurs, des vis, des fils et du collecteur, que nous avons achetés dans le commerce. Ce procédé a été choisi car il permet de produire des formes très complexes avec une masse réduite, tout en contrôlant le taux de remplissage et en utilisant du plastique à la place du métal. Pour réduire encore davantage la masse, nous avons utilisé deux méthodes :

- Nous avons conçu un modèle alvéolé en croix, en intégrant des évidements dans les pièces, en dehors des surfaces fonctionnelles.
- Nous avons réduit le taux de remplissage à $\tau = 60\%$.

2.4.2 Matériaux

Cependant, réduire la masse implique une diminution partielle de la solidité des pièces. Cela reste acceptable, compte tenu des forces relativement faibles mises en jeu. Nous avons choisi d'utiliser de l'ABS, en raison de sa rigidité supérieure par rapport à d'autres plastiques.

2.5 Dimensionnement

2.5.1 Moteur treuil

Le treuil a pour objectif principal de remonter la pince. Le dimensionnement du treuil consiste à choisir un moteur dont le couple est supérieur au couple résistant dû au poids de la pince. Ce dimensionnement (présenté en figure 26) a été réalisé en recherchant un compromis optimal entre vitesse de rotation et couple, tout en fixant une contrainte de masse pour le moteur. Le moteur retenu pèse 10 g, développe un couple de 19 N·mm et atteint une vitesse de rotation d'environ 100 tr/min.

2.5.2 Moteur pince

Le moteur de la pince a été dimensionné principalement en fonction de l'effort de serrage transmis par la tige filetée, lui-même lié à l'effort de pincement exercé sur le cube. Ce choix a été fortement contraint par la masse du moteur, que nous cherchions à minimiser.

Après avoir appliqué le principe fondamental de la statique (approches graphique puis analytique) ainsi que la loi de Coulomb, nous avons déterminé le couple minimal nécessaire au bon fonctionnement du système.

Dans un premier temps, nous avions opté pour un moteur couplé à une tige filetée M4, associé à une pince à quatre bras. Les essais ont montré que cette configuration permettait d'atteindre un effort de pincement de l'ordre de 20 N, ce qui s'est avéré largement surdimensionné par rapport aux besoins. Nous avons donc revu la conception en adoptant une pince à deux bras et un moteur plus léger, associé à une tige filetée M3. Cette modification nous a permis de réduire la masse totale de la pince de 4 g.

Le moteur finalement retenu développe un couple de 0,8 Nmm pour une vitesse de rotation d'environ 100 tr/min.

2.6 Résultats et validation

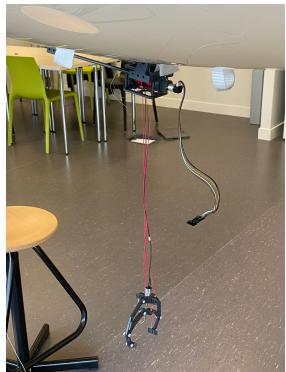


FIGURE 10 – Enroulement (treuil)

FIGURE 9 – Assemblage complet

Après l'assemblage de la pince et du treuil, nous obtenons la version finale du système de préhension intégré au dirigeable. Nous avons alors procédé aux tests, ce qui nous a permis de relever les caractéristiques suivantes :

- Temps de remontée : 15 s
- Masse maximale du colis : 80 g
- Encombrement : aucune gêne avec les autres systèmes
- Préhension du colis : validée
- Adhérence avec le colis mis à disposition : validée

2.7 Conclusion

Le système final, composé d'un treuil et d'une pince motorisée à deux bras, a su allier fiabilité, légèreté et compacité. L'impression 3D a été déterminante pour optimiser la masse et adapter les pièces selon leurs fonctionnalités.

La solution retenue a permis non seulement de remplir tous les critères du cahier des charges, mais aussi de dépasser certains objectifs, notamment en termes de capacité de levage. Les choix techniques : moteur adapté, pince à deux bras et un treuil compact ont été validés par des essais concluants. Ce travail a mis en évidence le compromis entre simplicité (pinces mécaniques) et performance (pinces motorisées), ainsi que l'intérêt d'une intégration optimisée. Le système, fonctionnel et léger, est prêt à être embarqué sur le dirigeable.

La suite du rapport porte sur l'électronique embarquée, nécessaire au pilotage et à la coordination de l'ensemble du dispositif.

3 Électronique embarquée : VIVET et BOUVIER REVIGLIO

3.1 Carte Électronique

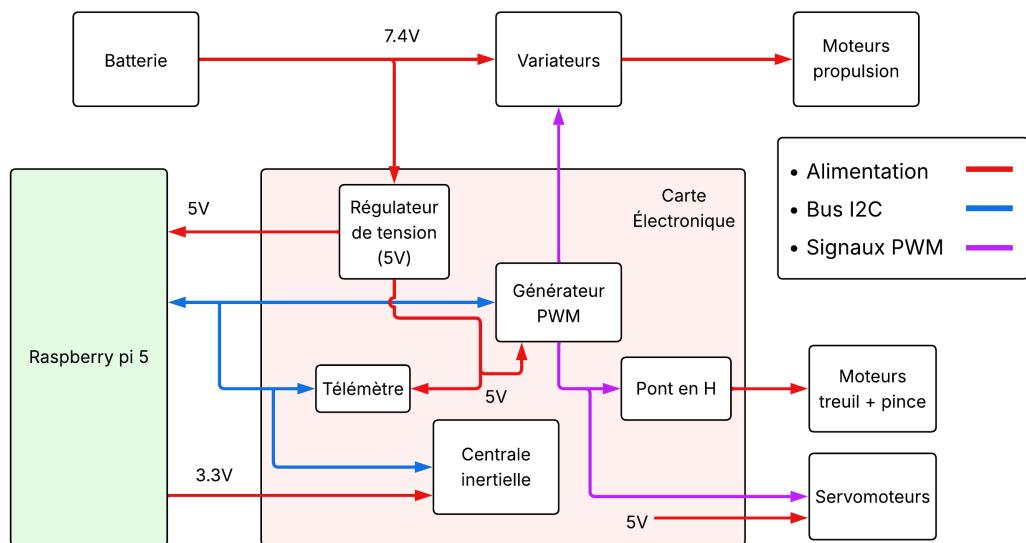


FIGURE 11 – schéma fonctionnel de la carte

3.1.1 réalisation

Le schéma éléctronique de la carte est le suivant :

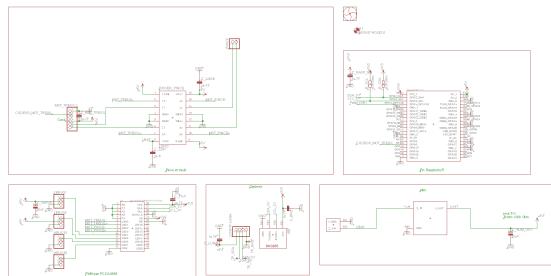


FIGURE 12 – Schéma électrique de la carte

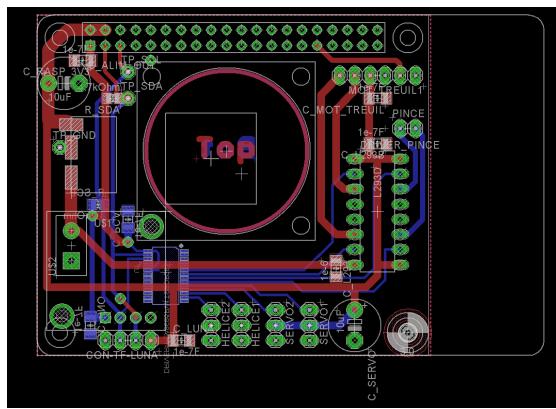


FIGURE 13 – Modèle 2D du circuit imprimé de la carte

3.2 Capteurs

3.2.1 Objectifs

Les capteur vont majoritairement servir pour localiser le dirigeable et l'asservir. L'objectif est donc d'avoir un retour de la position et de l'orientation du dirigeable assez précis et avec une période de rafraîchissement assez courte afin d'obtenir une meilleure performance possible de l'asservissement.

Les mesures de l'orientation sont absolue grâce aux accéléromètres et au magnétomètre.

3.2.2 Centrale inertie : BNO055

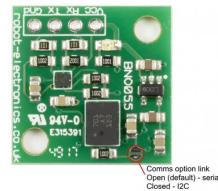


FIGURE 14 – BNO055

Cette centrale inertielles est équipée d'une multitude de capteurs :

- un accéléromètre triaxial 14 bits
- un gyroscope triaxial 16 bits à boucle fermée très précis
- un capteur géomagnétique triaxial

Une des spécificités de ce capteur est la fusion des données et la simplicité de l'exploitation des données (fusionnées) sur bus I2C.

Ce capteur est utilisé pour calculer l'altitude z du dirigeable en multipliant la distance au sol mesurée depuis le télémètre TF Luna par les mesures **pitch** et **roll** du BNO055. Ce capteur peut aussi être utilisé pour estimer l'angle "heading", ce qui permettrait en position le dirigeable, sachant que l'angle "heading" est nécessaire pour déterminer les directions de x et de y.

3.2.3 Centrale inertielles : BHI260&BHI360



FIGURE 15 – BHI260

Similaires (même composants de meilleur qualités) à la centrale BNO055, les centrales inertielles BHI260 et BHI360 de Bosch utilisent le principe du capteur virtuel pour fournir directement les angles d'Euler (roulis, tangage, lacet), sans que l'utilisateur ait besoin d'implémenter lui-même des algorithmes de fusion de capteurs. En combinant les mesures brutes de l'accéléromètre et du gyroscope via un microcontrôleur intégré, ces centrales calculent en temps réel l'orientation du système dans l'espace. Le résultat est un flux d'angles d'Euler stabilisés, exprimant la rotation autour des trois axes de référence. Ce traitement embarqué permet d'obtenir des données d'orientation précises, filtrées et prêtes à l'emploi, tout en réduisant la charge de calcul du processeur principal. Les angles d'Euler ainsi obtenus constituent un **capteur virtuel**, car ils ne sont pas directement mesurés, mais dérivés intelligemment à partir des données inertielles.

Afin de caractériser et comparer ces 2 capteurs on va mesurer l'évolution de l'erreur d'un angle dans un mouvement de rotation (chaque couleur correspond à un essai). On peut ainsi observer la précision et la stabilité du capteur

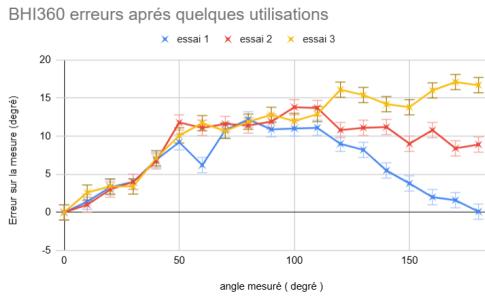


FIGURE 16 – BHI360

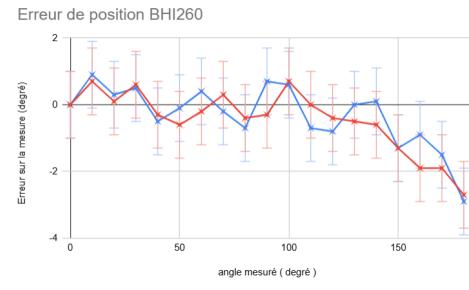


FIGURE 17 – BHI260

Au final, malgré la meilleure précision du BHI26A0P, le capteur BNO055 a été choisi parce qu'il était beaucoup mieux documenté que le capteur BHI260AP. Les librairies ont donc pu être codées beaucoup plus facilement avec le BNO055.

3.2.4 Angles d'Euler

Angles d'Euler : Les angles d'Euler décrivent l'orientation d'un corps par trois rotations successives autour des axes d'un repère. Dans la convention ZYX (la plus utilisée), on a :

$$R = R_X(\phi) \cdot R_Y(\theta) \cdot R_Z(\psi)$$

où :

- ϕ : roulis (rotation autour de X),
- θ : tangage (rotation autour de Y),
- ψ : lacet (rotation autour de Z).

Inconvénient : singularité pour $\theta = \pm 90^\circ$ (*gimbal lock*).

Quaternion : Un quaternion est une représentation sans singularité de la rotation dans l'espace :

$$q = q_0 + q_1\mathbf{i} + q_2\mathbf{j} + q_3\mathbf{k}$$

avec :

$$q_0 = \cos(\theta/2), \quad \vec{q} = \sin(\theta/2) \cdot \hat{n}$$

où \hat{n} est l'axe unitaire de rotation. Le quaternion est adapté à l'interpolation fluide et à la fusion de capteurs inertIELS.

	Représentation	Composantes	Singularité	Intuitif	Interpolation
Comparaison rapide :	Euler	3	Oui	Oui	Non
	Quaternion	4	Non	Non	Oui

Notre équipe a décidé d'utiliser les angles Euler.

3.2.5 Télémètre TF Luna

[H]



FIGURE 18 – Télémètre TF Luna

Le TF Luna est un télémètre avec une précision de (+ ou - 1cm) et une période de rafraîchissement de 5 ms. Celui-ci est monté sur le bas du dirigeable pour mesurer l'altitude du dirigeable. Sachant que la distance entre le sol et le dirigeable varie en fonction de l'inclinaison du dirigeable, le BNO055 est aussi utilisé pour calculer l'hauteur du dirigeable à partir des angles **roll** et **pitch**. Voir [sous-section 5.3 Code pour le calcul de la distance z](#) pour un extrait de code.

3.2.6 Apriltags (Caméra)

Le dirigeable est muni d'une caméra pour pouvoir être localisé à partir d'une prise en photo des april-tags posés sur le sol de l'Atrium de l'ENS Paris-Saclay. Les april-tags se situent donc dans un repère fixe enregistré dans le microcontrôleur du dirigeable. Le repère mobile est déterminé à partir de la position relative estimée entre la caméra et le tag pris en photo.

Cette technologie permet donc d'estimer la localisation du dirigeable (repère mobile) par rapport aux tags situés dans un repère fixe (l'atrium) : positions x, y, z et les angles de direction. En utilisant ces mesures on est capable de corriger la déviation de l'angle "heading" au fil du temps. C'est seulement lorsque la caméra n'observe pas de tags que le BNO055 pourrait être utilisé pour interpoler les angles du dirigeable.

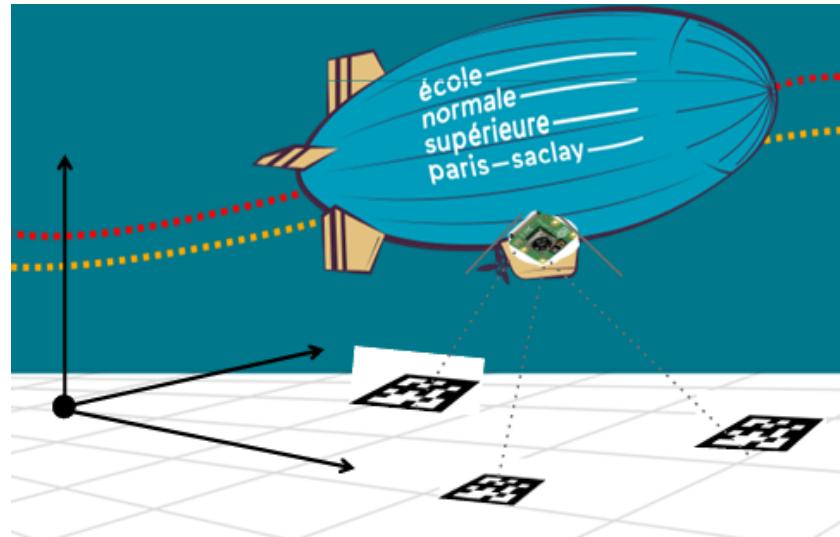


FIGURE 19 – Localisation par Apriltags

Capteur	Précision
Orientation x	$\pm 6^\circ$
Orientation y	$\pm 6^\circ$
Orientation z	$\pm 4^\circ$
Position x	± 3 cm
Position y	± 3 cm
Position z	± 15 cm

TABLE 1 – Précision des apriltags

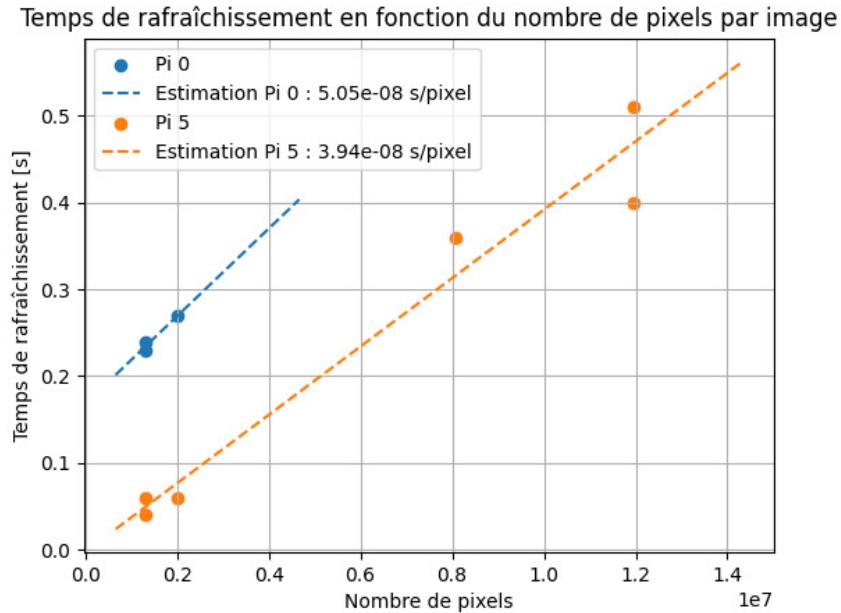


FIGURE 20 – Mesures de Victor PETROVIC

Le temps de rafraîchissement est excellent pour un asservissement avec la raspberry Pi Zero mais nous pouvons pas exploiter des camera de haute qualité avec cette carte qui a une puissance de calcul faible. On a un meilleur rafraîchissement au détriment de la précision. On choisira de prioriser la précision donc d'utiliser une Raspberry pi 5 avec une camera raspberry module 3 Wide (grand angle pour capturer un maximum de tags).

3.2.7 Conclusion capteurs

On utilisera la camera pour les positions x et y et l'orientation "heading", le télémètre (TF Luna) pour la position distance au sol, la caméra n'étant pas assez précise en position z. Ensuite, le capteur BNO055 est utilisé pour mesurer les angles **pitch** et **roll** afin de calculer la distance z à partir de la mesure de distance par le TF Luna. Finalement, le capteur BNO055 pourrait aussi être utilisé pour interpoler les mesures de "heading" de la caméra.

3.3 Commande

3.3.1 État de l'art avant 2024-2025

À présent, il existe des librairies codées dans l'archive 2023-2024 du projet CoBRA :

- Centrale inertie BNO055
- Télémètre SRF10
- Servomoteurs, brushless et MCC
- Contrôle avec une manette PS4

3.3.2 Modifications 2024-2025 : Configuration des moteurs

Moteurs de propulsion : Le système de propulsion consiste de deux moteurs brushless PULSAR Shocky Pro 2204 qui peuvent être configurés en propulsion unidirectionnelle ou bidirectionnelle. Notre équipe avait programmé ces moteur brushless en mode bidirectionnel. La vitesse des moteurs brushless est donc commandée par un signal impulsif de période 20 ms dont la largeur d'impulsion de 1.5 ms correspond à une vitesse nulle, 1 ms correspond à une vitesse négative maximale et 2 ms correspond à une vitesse positive maximale.

Servomoteurs : Les servomoteurs utilisent aussi un signal impulsif de période 20 ms dont 1.5 ms correspond à un angle nul. Cependant, les angles minimal et maximal dépendent des butées mécaniques qui bloquent l'amplitude du servomoteur. Les butées varient de modèle en modèle. Sachant que le servomoteur **axe** et le servomoteur **cerceau** sont des modèles différents, nous avions déterminé expérimentalement leurs butées mécaniques pour chacun des deux.

Pour déterminer la consigne atteignant une butée mécanique d'un servomoteur, un générateur de signal impulsif a été connecté à au servomoteur. Ensuite, on faisait varier la largeur d'impulsion jusqu'à ce qu'on s'aperçoive que l'angle du servomoteur arrête d'évoluer.

3.3.3 Modifications 2024-2025 : Programme de test

Notre équipe a codé une interface utilisateur interactive permettant d'appliquer des consignes dans un menu et d'observer en temps réel l'état du dirigeable (positions x, y, z et angles roll, pitch, heading).

L'interface utilisateur exécute plusieurs boucles en parallèle :

- ncurses : interface utilisateur interactive
- ps4controller : contrôle du dirigeable avec manette PS4
- asserv : asservissement en position z

L'utilisateur applique une consigne en écrivant un nombre sur le clavier suivi de la touche entrée :

- En sélectionnant avec le curseur un moteur brushless ou MCC, l'utilisateur peut appliquer une consigne de vitesse de rotation de -100% à +100%.
- En sélectionnant avec le curseur un servomoteur, l'utilisateur peut appliquer une consigne d'angle compris entre l'angle minimal et l'angle maximal.
- En sélectionnant avec le curseur la hauteur z mesurée, l'utilisateur peut appliquer une position z consigne que le dirigeable asservira avec un correcteur. Par conséquent, on observerait sur l'interface utilisateur une évolution des consignes appliquées aux moteurs de propulsion.

Voir [sous-section 5.4 Code main de l'interface utilisateur](#) pour le code de l'interface utilisateur.

Ce programme de test nous a donc permis de faciliter les tests expérimentaux sur les composants du dirigeable. Ci-dessous est un récapitulatif de validation des différents composants du dirigeable.

propulsion gauche : Pour des consignes de valeur absolue assez faible (en dessous de 5% ou 10%), le moteur ne tourne pas. C'est une fois que la consigne seuil est dépassée que le moteur se met à tourner. Pour les consignes de valeur absolue plus élevée, la vitesse de rotation du moteur croît avec la croissance de la valeur absolue de la consigne. On déduit que les moteurs brushless doivent surpasser un certain couple de démarrage avant de pouvoir tourner.

La rotation du moteur est bidirectionnelle. Cependant, pour une même valeur absolue de consigne, la vitesse de rotation est plus élevée dans un sens que dans l'autre. Ceci est cohérent

avec la géométrie asymétrique des hélices du moteur.

propulsion droite : Même remarque.

Axe : Lorsque l'angle consigne est proche de l'angle actuel, le servomoteur ne bouge pas. C'est seulement lorsque la consigne est assez éloignée de l'angle actuel que le servomoteur se met à s'orienter.

Cerceau : Même remarque.

Treuil : La vitesse de rotation croît avec la croissance de la valeur absolue de la consigne. Les deux sens fonctionnent.

Pince : Pas encore validé.

3.3.4 Modifications 2024-2025 : Librairie de commande des moteurs brushless

La librairie de commande des moteurs brushless a été modifiée de sorte à ce que toute consigne fasse tourner le moteur, aussi petite qu'elle soit. Pour cela, nous avons préalablement mesuré les consignes seuils pour la rotation dans le sens direct et dans le sens inverse. Ensuite, ces valeurs seuil ont été enregistrées dans des variables `consigne_min_neg` et `consigne_min_pos`. Le code a donc été modifié de sorte qu'une consigne inférieure à 2 fois `consigne_min_pos` (`consigne_min_neg` respectivement) fasse appliquer une consigne finale de :

`consigne_finale = consigne_min_pos + consigne/2`
`(consigne_finale = consigne_min_neg + consigne/2 respectivement).`

4 Modélisation/contrôle-commande : BOUGEARD et TIMOCHENKO

4.1 Modélisation

Voir [sous-section 5.5 Modèle dynamique du dirigeable](#) pour les équations du modèle dynamique du dirigeable.

4.2 Asservissement

4.2.1 État de l'art actuel

Le travail sur l'asservissement en position a débuté le 05 Juin 2025. À présent, notre groupe a validé expérimentalement l'asservissement en hauteur z. Celui-ci a été mis en place par un correcteur proportionnel auquel a été ajouté un point de fonctionnement.

Nous avions d'abord testé un asservissement proportionnel sans ajouts supplémentaires. Ceci permet de stabiliser l'hauteur du dirigeable, mais avec une erreur statique, car force de poussée des moteurs diminue lorsque l'erreur entre consigne et mesure diminue, ce qui empêche d'atteindre l'hauteur consigne par insuffisance de force de poussée.

Une force de poussée statique a donc été ajoutée en plus de l'asservissement proportionnel afin de produire une consigne non nulle lorsque l'erreur entre consigne et mesure tend vers 0. Le point de fonctionnement du dirigeable correspond à la force de poussée des moteurs qui permet au dirigeable d'avoir une accélération verticale nulle. Une force de poussée statique correspond au point de fonctionnement du dirigeable où la somme des forces verticales est nulle, ce qui implique une accélération verticale nulle.

4.2.2 Perspectives sur les futures améliorations

Asservissement x,y :

L'asservissement en position x,y nécessite une localisation préalable du dirigeable dans un repère fixe. Ceci est réalisé à l'aide des april-tags placés dans l'Atrium de l'ENS Paris-Saclay. La localisation de chaque april-tag est ensuite enregistrée dans la mémoire de la Raspberry Pi afin de pouvoir déduire la localisation du dirigeable à partir d'une photo prise par la RPi cam.

En possédant seulement deux moteurs de propulsion, il est nécessaire de pouvoir asservir horizontalement sans déstabiliser l'asservissement de la position z. Pour cela, on propose de faire varier la force de propulsion appliquée par les moteurs en fonction de l'angle d'orientation du moteur par rapport à l'axe z.

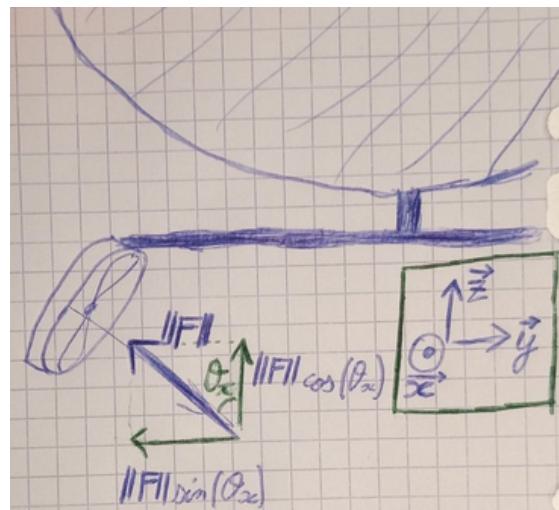


FIGURE 21 – Composantes horizontale et verticale de la propulsion (force de poussée) d'un moteur brushless

La composante verticale de la force de poussée des moteurs est : $F_z = ||F|| \cdot \cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y)$, où θ_x correspond à l'angle du cerceau et θ_y correspond à l'angle de l'axe. Ceci signifie que pour

4.2 Asservissement/Modélisation/Contrôle-commande : BOUGEARD ET TIMOCHENKO

avoir une force de poussée verticale constante, il suffirait de diviser la force de poussée appliquée par les moteurs par $\cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y)$.

Ensuite, la régulation en x et y serait réalisée en faisant varier l'orientation des moteurs à l'aide des servo-moteurs **axe** et **cerceau**, ce qui ferait varier les composantes horizontales de la force de propulsion.

Cependant, l'orientation des servo-moteurs **axe** et **cerceau** dépend de la mesure de l'orientation "heading" par rapport au plan Oxy. Cette orientation absolue est déterminée à partir de la prise en photo d'un april-tag par la caméra RPi **cam**.

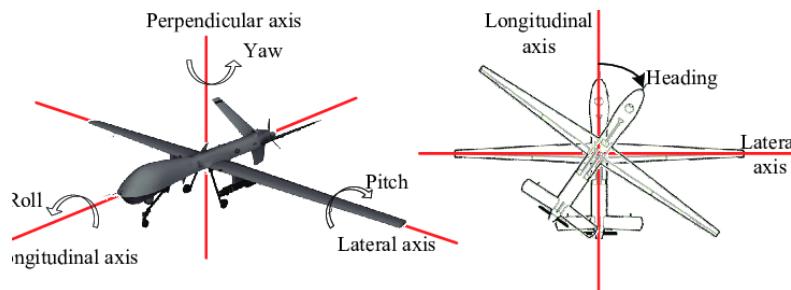


FIGURE 22 – États de pitch, yaw, roll et heading pendant un vol aérien. source : [A Comprehensive Survey on UAV Communication Channel Modeling - Scientific Figure on ResearchGate](#).

Asservissement en angle "heading" : La régulation de l'orientation permet d'assurer que l'orientation des servo-moteurs **axe** et **cerceau** reste invariante lors de la régulation en position x et y.

Identification des paramètres : L'identification des paramètres serait régie par un modèle de connaissance.

Identification de la loi de commande : La loi de commande serait régie par un modèle de comportement.

La matrice A correspond au couplage entre les consignes appliquées et les forces/couples exercés sur le dirigeable.

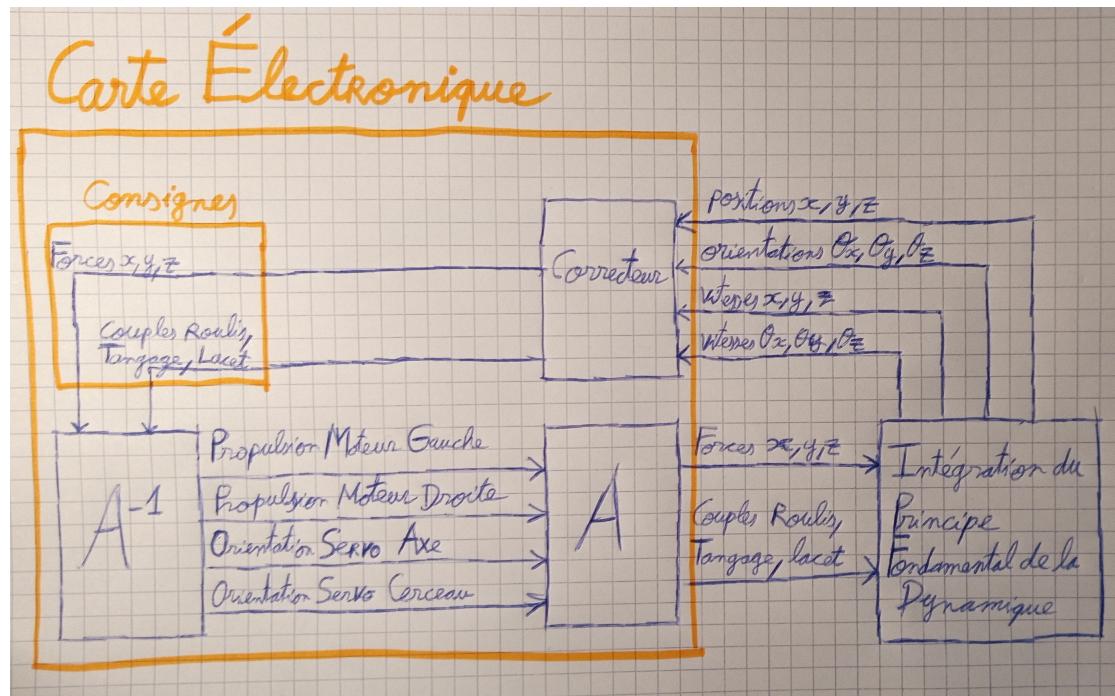


FIGURE 23 – Identification de la loi de commande

L'utilisation de la matrice A est basée sur l'hypothèse de linéarité du comportement du dirigeable, ce qui n'est pas le cas, mais il est possible d'effectuer une approximation linéaire autour d'un point de fonctionnement. La loi de commande pourrait donc être identifiée en identifiant les coefficients de la matrice A. La prévision des positions et vitesses $x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ serait faite à partir d'un modèle de connaissance basé sur le principe fondamental de la dynamique.

Ceci permettrait d'améliorer les performances de l'asservissement en position.

Suivi d'une trajectoire : La trajectoire du dirigeable serait définie par une séquence de segments dans le repère fixe de l'Atrium (la position serait mesurable à l'aide des April Tags posés sur le sol). Le suivi de la trajectoire serait asservi à l'aide d'un algorithme MPC (Model Predictive Control) comme suit :

1. L'état du système est mesuré à l'aide des capteurs.
 2. Les futurs états du système sont prédits en utilisant le modèle cinématique du dirigeable pour différentes séquences de commandes. La séquence de commandes est optimisée à l'aide d'un critère de minimisation :
 - minimisation de déviation de la trajectoire
 - minimisation de l'amplitude des mouvements
 3. La séquence de commandes est appliquée aux moteurs et servo-moteurs du dirigeable
 4. Les nouvelles données mesurées par les capteurs sont utilisées pour mettre à jour ¹ les paramètres du modèle de connaissance du dirigeable, ainsi que la loi de commande.
 5. L'algorithme MPC est réitéré.
1. Lors de la préhension du colis, la répartition des masses dans le système du dirigeable devient modifiée. Ainsi, la loi de commande du dirigeable utilisée jusqu'à cet instant deviendrait moins précise. D'où l'avantage de mettre à jour les paramètres du modèle du dirigeable.

4.2 Astérisme NODÉLISATION/CONTRÔLE-COMMANDE : BOUGEARD ET TIMOCHENKO

Préhension/Dépôt de colis : A priori, pendant la préhension et dépôt du colis, on compte orienter les moteurs de propulsion quasi-verticalement afin de réguler la position à l'aide du cerceau et de l'axe.

5 Annexes

5.1 PRÉHENSION ET DÉPÔT

5.1.1 Pince mécanique

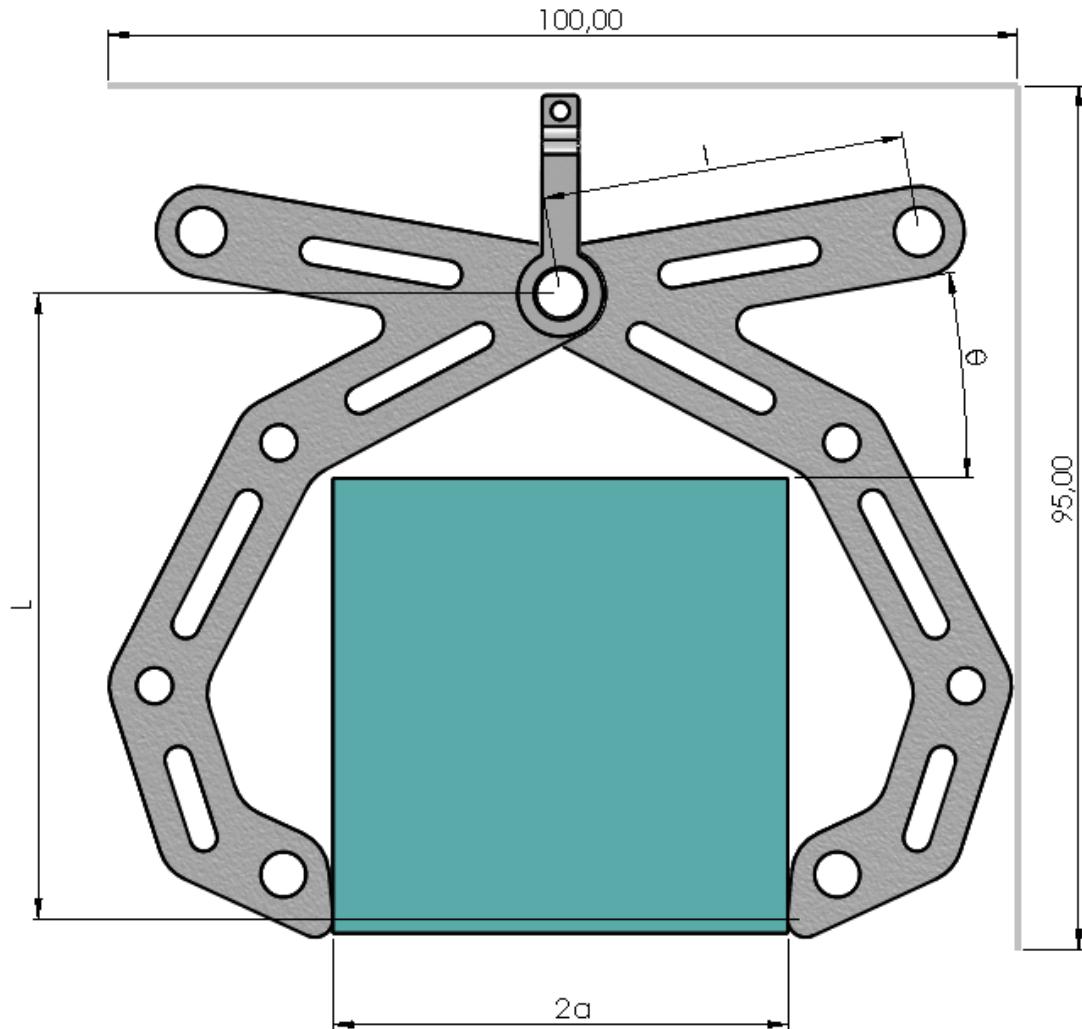


FIGURE 24 – Encombrement pince mécanique

- $l = 40 \text{ mm}$
- $a = 25 \text{ mm}$
- $l = 70 \text{ mm}$
- $\theta = 10^\circ$

5.1.2 Pince motorisée

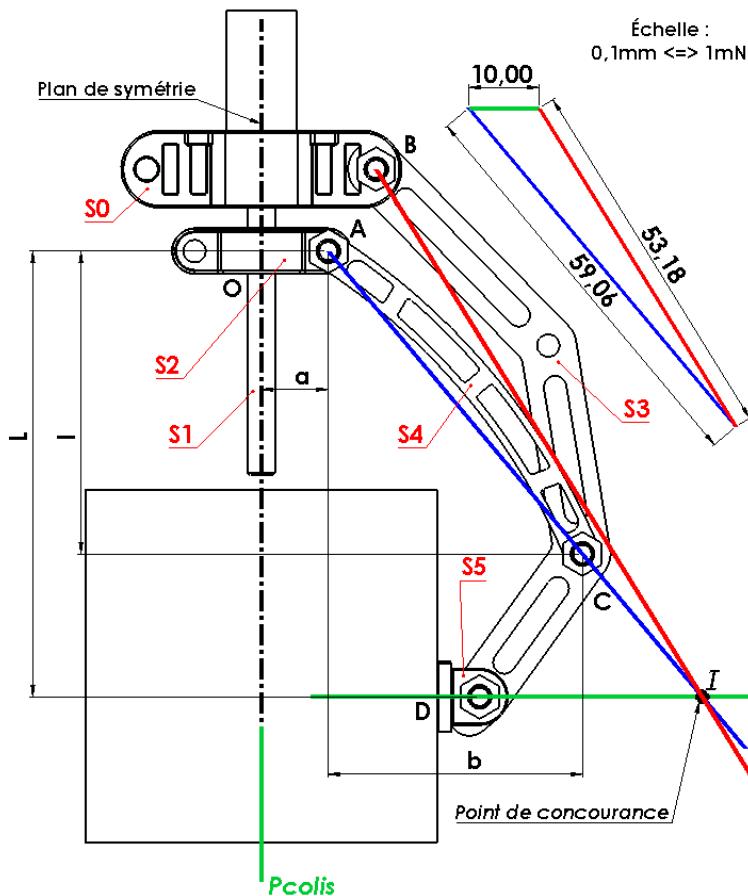


FIGURE 25 – schéma de la pince motorisée

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| — $l = 43 \text{ mm}$ | — $P_c = 0.1 \text{ N}$ |
| — $a = 9.5 \text{ mm}$ | — $f = 0.4$ |
| — $L = 63 \text{ mm}$ | — $\mu_{moy} = f$ |
| — $b = 36 \text{ mm}$ | — $d_2 = 3 \text{ mm}$ |

$$T = \frac{P_c}{2} = fN \Leftrightarrow N = \frac{P_c}{2f} \quad \text{Loi de Coulomb} \quad (1)$$

$$F_{\text{colis} \rightarrow S5} = N \Rightarrow F_{S4 \rightarrow S2} = 590 \text{ mN} \quad (2)$$

$S2$ est symétrique, on en déduit que $F_{\text{serrage}} = 2F_{S4 \rightarrow S2} \Rightarrow F_{\text{serrage}} = 1,2N$

En connaissant la formule reliant l'effort de serrage et le couple de serrage on peut en déduire le couple de serrage dimensionnant le moteur.

$$C = F_0(0.16P + \mu_{moy}(0.583d_2 + r_m)) \quad (3)$$

$$C \approx 0.8 \text{ Nmm} \quad (4)$$

5.1.3 Treuil

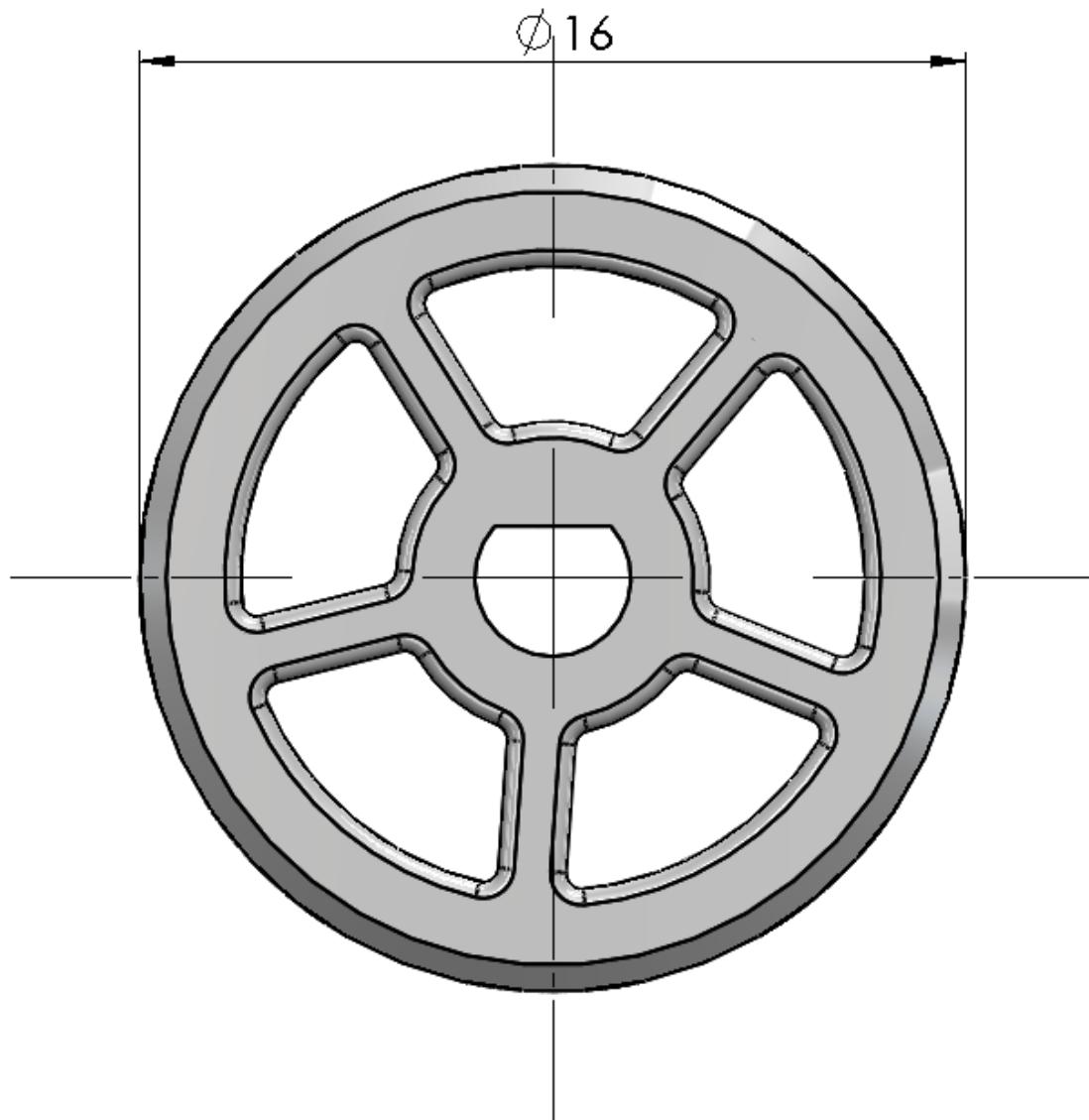


FIGURE 26 – Vue de face du tambour

La masse de la pince vaut $m = 23 \text{ g}$ le tambour du treuil $D = 16\text{mm}$. Le couple résistant correspond à :

$$C_r = mg \frac{D}{2} = 23 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 8 \quad (5)$$

$C_r \approx 1.8 \text{ Nmm}$

(6)

5.2 Composants

5.2.1 composants à interfaçer

télémètre :

Le télémètre est connecté à la carte via un connecteur mâle 4x1 (5V, 3.3SDA, 3.3SCL, 0V). Il a besoin d'avoir vue sur le sol.

centrale inertie :

La centrale inertie est connectée à la carte via un connecteur femelle 4x1 (3.3V, 3.3SCL, 3.3SDA, 0V).

Elle a besoin de deux trous pour support et se monte directement sur la carte.

moteurs Brushless :

Les moteurs Brushless sont connectés à la carte via des connecteurs mâles 3x1 (PWM, rien, 0V).

servomoteurs :

Les servomoteurs sont connectés à la carte via des connecteurs mâles 3x1 (PWM, 5V, 0V).

moteur pince :

Le moteur pince est un moteur à courant continu connecté à la carte via un connecteur mâle 2x1 (V+, V-).

moteur treuil :

Le moteur treuil est un moteur à courant continu connecté à la carte via un connecteur mâle 6x1 (V+, V-, 5V, codeur, rien, 0V).

batterie :

La batterie se connecte via des fils soudés sur la carte. Ils sont au nombre de deux : 7.4V et 0V.

Raspberry pi 5 :

La raspberry pi 5 se connecte à la carte via un connecteur femelle 2x20. Elle reçoit notamment du 5V, 0V et d'autres signaux si besoin. Elle fournit du 3.3V et est connectée au bus I2C.

Ventillateur :

Le ventillateur ne se connecte pas directement sur la carte mais nécessite des trous de fixations et un trou pour laisser passer l'air.

5.2.2 Composants sur la carte

régulateur de tension :

Le régulateur est un composant CMS. Il permet de transformer une tension 7.4V DC en 5V DC. Il est par ailleurs monté sur le coté et nécessite l'ajout d'une résistance et d'un fil directement sur le composant.

générateur de signaux PWM :

Le générateur de PWM est un CMS qui permet, à partir de commandes fournies par le bus I2C, de fournir tous les signaux PWM nécessaires au contrôle de chaque moteur.

pont en H :

Le composant pont en H est un composant traversant contenant quatre modules de pont en H. Chacun de ces modules sort une tension continue dont la valeur dépend du signal PWM d'entrée. Deux modules sont utilisés pour piloter un module. Il sert à alimenter les deux moteurs à courant continu.

5.3 Code pour le calcul de la distance z

```

1 import smbus2
2 import sensors_lib.MyBN0055 as MyBN0055
3 import sensors_lib.MyTFLuna as MyTFLuna
4
5 lidar = MyTFLuna.LidarTFLuna()
6 i2cbus = smbus2.SMBus(1)
7 mybno = MyBN0055.BN0055(i2cbus)
8
9 # Mesures BN0055
10 angle_euler = mybno.read_euler()
11 pitch = angle_euler["pitch"]
12 roll = angle_euler["roll"]
13
14 # LIDAR + calcul Z
15 distance = lidar.read_distance()
16 dist_z = abs(distance * np.cos(np.radians(roll)) * np.cos(np.radians(pitch)))

```

5.4 Code main de l'interface utilisateur

```

1 import v15_cobra_config as config
2 import userinput_lib.v15_test_commandes_TUI as TUI
3 import userinput_lib.v15_test_commandes_PS4 as PS4
4 import sensors_lib.v16_mergemeas as mergemeas
5 import autoasserv_lib.asservissement as asserv
6 import concurrent.futures
7 import curses
8 import numpy as np

```

```
9
10 def main(stdscr):
11     TUI.TUI_init(stdscr)
12     print("Prêt - Initialisation réalisée")
13     my_controller = PS4.MyController(stdscr, interface="/dev/input/js0",
14                                     → connecting_using_ds4drv=False)
15     measures_matrix = np.zeros((6,mergemeas.NB_MEASURES))
16     with concurrent.futures.ThreadPoolExecutor() as executor:
17         timeloop_future = executor.submit(PS4.timeloop,stdscr)
18         my_controller_future = executor.submit(my_controller.listen)
19         TUI_main_loop_future = executor.submit(TUI.TUI_main_loop,stdscr)
20         mergemeas_loop_future =
21             → executor.submit(mergemeas.mergemeas,measures_matrix,TUI.aa)
22         asserv_loop_future = executor.submit(asserv.asservir_tout)
23
24     if TUI.TUI_is_exited == True:
25         timeloop_future.cancel()
26         my_controller_future.cancel()
27         TUI_main_loop_future.cancel()
28         mergemeas_loop_future.cancel()
29         asserv_loop_future.cancel()
30
31     results1 = timeloop_future.result()
32     results2 = my_controller_future.result()
33     results3 = TUI_main_loop_future.result()
34     results4 = mergemeas_loop_future.result()
35     results5 = asserv_loop_future.result()
36
37     config.myPCA9685.reset()
38
39     curses.wrapper(main)
```

5.5 Modèle dynamique du dirigeable

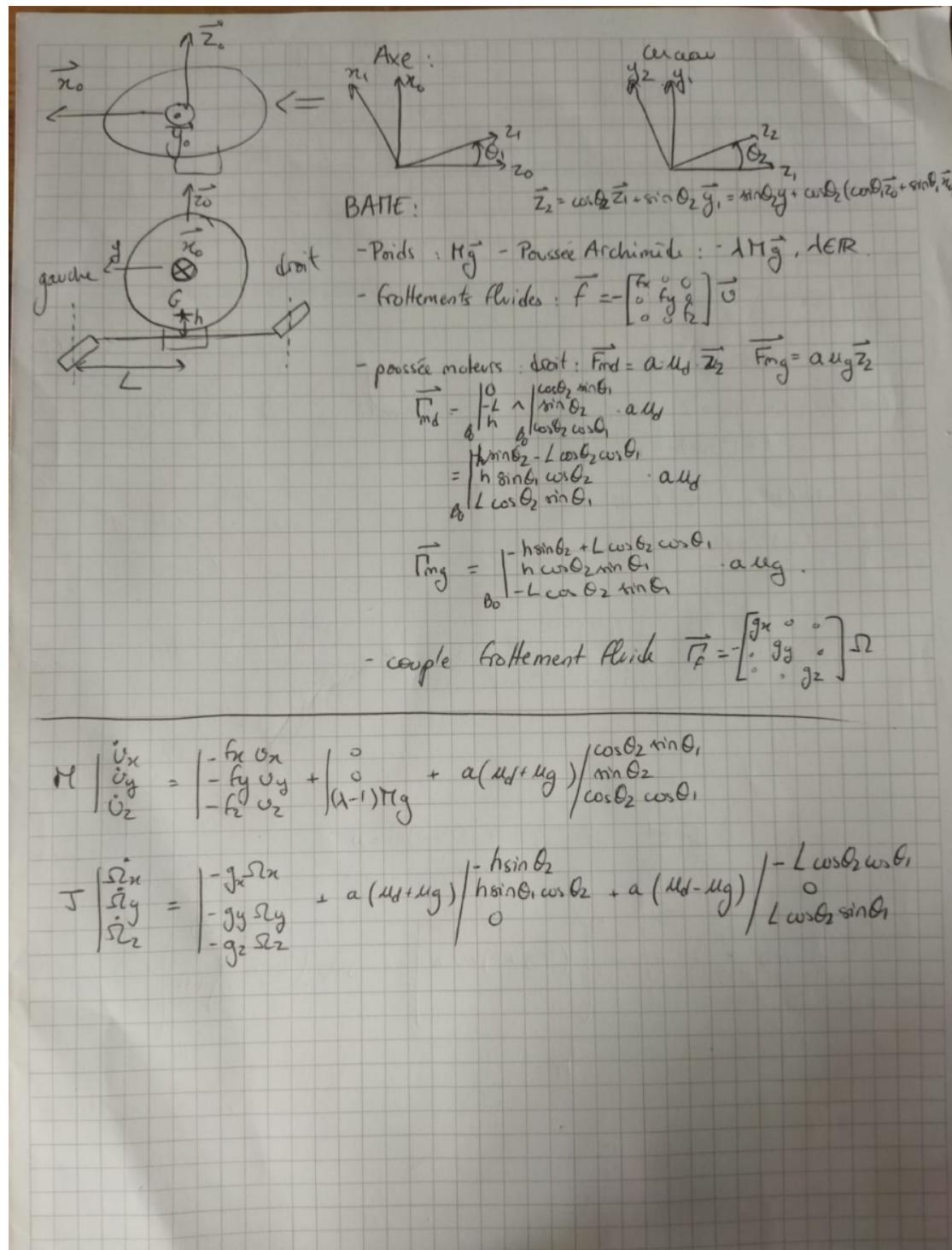


FIGURE 27 – Modèle dynamique du dirigeable (poussées et couples exercés par les moteurs de propulsion)