

Rapport de Projet

ENSMA SPACE PROJECT



RAPPORT DE PROJET : Hermès

MF25



Noms	Prénoms
AUDOUIT	Quentin
TROTTIER	Mathys
REMONT	Louis
LE MOAL	Briac
BONNEFOY	Antonin
ROCHEREAU	Baptiste
TRIPPIER	Antoine

Durée du projet : 10/2023 - 07/2024

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes qui nous ont permis de réaliser notre projet et qui nous ont suivis au long de l'année, Laurence Chocinski et pour l'usinage des certaines pièces, Loïc Rivière.

Nous tenions aussi a remercier Planète Sciences et le CNES, qui par leurs installations et les bénévoles/contrôleurs nous ont permis de découvrir ce milieu et de développer des compétences qui nous seront utiles dans notre vie, personnelle et professionnelle. Nous les remercions aussi pour l'organisation des RCE, du C'Space ainsi que leur disponibilité afin de répondre à nos interrogations tout au long su projet.

Table des matières

1	Résumé	3
2	Introduction	4
3	Description mécanique	5
3.1	Aperçu général de la fusée	5
3.2	Premier étage et système de fixation du moteur	6
3.3	Deuxième étage et système d'éjection	7
3.4	Troisième étage et système de fixation de l'électronique	7
3.5	Quatrième étage et planeur	8
4	Description électronique et informatique	9
4.1	Aperçu général de l'électronique	9
4.2	La carte Arduino	10
4.3	La carte principale	10
4.4	La carte du panneau de contrôle	11
4.5	Détection du décollage	12
4.6	Contrôle de la trappe parachute	13
4.7	Contrôle de l'éjection du planeur	14
5	Le code Arduino	15
5.1	Objectifs principaux	15
5.2	Fonctionnement détaillé du code	15
5.3	Partie critique du code : vérification du Jack	17
6	Expérience	17
6.1	Introduction	17
6.2	Définition de l'expérience	17
6.3	Conception mécanique du corps	18
6.4	Conception mécanique du système d'éjection	18
6.5	Conception mécanique du déploiement des ailes	20
6.6	Fabrication des ailes	21
6.7	Stabilité du planeur	22
7	Conclusion	23
8	Annexes	23

1 Résumé

Ce projet, mené par l'ENSMA SPACE PROJECT, avait pour objectif de réaliser une Minifusée composée d'un lanceur et d'une charge utile éjectable. Cette charge utile était un planeur servant de coiffe à la fusée et éjecté à l'apogée.

À l'issue du lancement et de la récupération de la fusée, nous avons pu voir, en direct puis par le biais de vidéos, que le vol du planeur a respecté les critères que nous nous étions fixés : un vol stable, sans vrille, ainsi que ceux du C'Space, notamment pour la vitesse de chute qui approchait des 12 m s^{-1} . Cette vitesse de chute était élevée car la finesse de l'appareil était réduite afin de respecter les critères du cahier des charges, qui demandait des vitesses comprises entre 5 m s^{-1} et 15 m s^{-1} , ainsi que les différentes contraintes d'intégration dans le lanceur.



FIGURE 1 – L'équipe d'Hermès avant le lancement de la fusée au C'Space

2 Introduction

Grâce aux associations étudiantes de l'ISAE-ENSMA, nous sommes nombreux chaque année à découvrir le C'Space et à pouvoir nous investir dans les projets de Fusex ou de Minifusée. Rassemblés par un goût prononcé pour le domaine de l'aérospatial, nous avons choisi de monter ce projet de Minifusée avec un planeur en emport dans la coiffe. Cette année, 7 membres ont su s'investir tout le long du développement d'Hermès. L'équipe était répartie sous la forme suivante : 2 membres sur la structure, 2 sur l'électronique, 2 sur le planeur et son éjection et le chef d'équipe pour le dimensionnement et la récupération ainsi qu'en support sur les différents pôles selon les difficultés rencontrées.

Afin d'organiser notre avancée, nous avons mis en place un carnet de bord retraçant les avancées de chaque pôle en temps réel. En parallèle, nous tenions des réunions de mise en commun avec au moins un membre de chaque pôle une semaine sur deux. Par ailleurs, chaque pôle travaillait en groupe pour l'avancée de sa partie de manière hebdomadaire afin de répondre aux attentes des contrôleurs et de permettre un avancement correct du projet. Cette avancée rapide nous a permis de découper l'année en quatre grandes phases :

1. La conception : la réalisation des plans de la fusée, la réflexion autour de l'intégration et le dimensionnement de la structure.
2. Le prototypage : nous avons d'abord fait quelques tests sur une maquette à l'échelle 1/2 puis commencé la réalisation des pièces à taille réelle afin de réaliser les tests d'assemblage et de flèche.
3. La fabrication : l'impression des pièces définitives et les tests de fonctionnement dans différentes circonstances
4. La finition : réalisée suite à la RCE 3, certaines pièces ont nécessité de légères modifications afin de garantir une meilleure fiabilité des systèmes.

3 Description mécanique

3.1 Aperçu général de la fusée

Nous avons choisi d'imprimer l'intégralité de la structure de la fusée en 3D avec du PETG. Cela nous offre une grande flexibilité sur la structure et permet de réaliser facilement des tests sur celle-ci. Par ailleurs, utiliser l'impression 3D pour notre minif nous a permis de dimensionner la peau pour qu'elle soit une peau-porteuse. Les contraintes de l'impression 3D nous imposant des pièces d'une hauteur maximale de 30 cm, nous avons donc décomposé la fusée en quatre sections ayant chacune un rôle différent : le premier étage contient le système de propulsion, le deuxième le système de récupération de la fusée, le troisième l'électronique et le quatrième le planeur. Nous avons donc conçu l'intégralité des pièces de la structure de la fusée sous CATIA et les avons ensuite imprimées en 3D, à l'exception des ailerons et de la bague moteur.

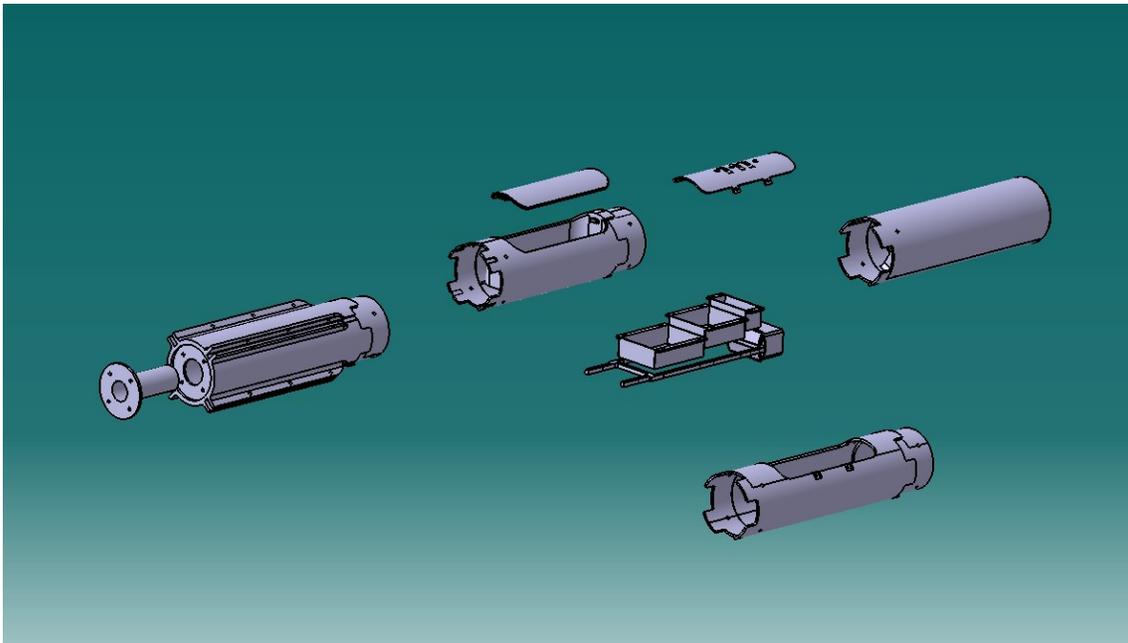


FIGURE 2 – La structure de la fusée a entièrement été conçue sous CATIA V5

La fixation entre chaque étage a d'abord été envisagée via des vis, mais l'impression s'est révélée trop peu précise pour cela. Nous avons donc opté pour un système d'emboîtement avec des dents pour bloquer la rotation et des vis pour les verrouiller ensemble.

Hermès a été lancée sur la rampe rail, et était retenue par deux patins imprimés en PETG et vissés au fuselage.

3.2 Premier étage et système de fixation du moteur

Le premier étage accueille la bague moteur ainsi que les ailerons, qui sont les seuls éléments structurels qui ne sont pas en PETG.

La bague moteur chargée de retenir le moteur Pandora a été usinée en aluminium afin d'assurer sa solidité et sa résistance à la chaleur dégagée par le moteur lors du vol. La bague est fixée à la fusée via 4 vis. La translation verticale du moteur est bloquée via un morceau de métal fixé en dessous de la bague moteur qui est amovible pour permettre de placer et retirer le moteur. L'utilisation d'un écrou papillon facilite le travail du pyrotechnicien lorsqu'il place le moteur dans la fusée.



FIGURE 3 – Bague moteur

Les ailerons sont réalisés en contreplaqué et ont une épaisseur de 3 mm. Nous avons réalisé quelques tests avec des ailerons en PETG mais ils n'étaient pas assez solides pour résister aux efforts appliqués, raison pour laquelle nous les avons fabriqués en contreplaqué. Leur forme a été déterminée grâce à STABTRAJ afin de garantir la stabilité de la fusée.

Le système de fixation des ailerons a été testé plusieurs fois avant de parvenir à la version finale. Nous avons commencé avec un système de pions pour fixer les ailerons avec des vis dans une rainure sur le fuselage, mais ce système ne résistait pas au test

des ailerons. Nous avons donc ajouté une bordure tout le long de la rainure, ce qui a permis de solidifier la structure et de passer le test.

3.3 Deuxième étage et système d'éjection

Le deuxième étage est celui du système de récupération. Il contient la boîte parachute et son système d'ouverture. La présence de la trappe parachute fragilisant la structure, nous avons arrondi ses coins afin d'en augmenter la résistance. Le système d'ouverture se base sur un servomoteur et un bras de levier qui tire sur une dent et libère ainsi la trappe.

Le parachute a été dimensionné selon les estimations obtenues sur STABTRAJ. Nous avons pu le réaliser nous-mêmes à l'aide de toile de parachute. Nous avons choisi d'utiliser un fil de haute résistance pour permettre une meilleure résistance sur les zones d'efforts concentrés.

Les suspentes ont été prises dans un fil ayant une résistance en traction supérieure à 10 kg, ce qui permet une tenue aux efforts très supérieure à ceux subis. De même, l'émerillon et l'ancrage dans le fuselage sont surdimensionnés afin d'éviter tout risque de rupture.

Pour finir, nous avons petit à petit déterminé une méthode de pliage, avec les conseils de nos contrôleurs aux différentes RCE. Celle-ci s'appuie sur l'enchaînement suivant : lors de l'éjection de la trappe, la suspente de la trappe tire sur l'émerillon, ce qui force la sortie des suspentes du parachute. De plus, de la mousse est collée au fond de la trappe afin de maintenir un fort niveau de compression et facilite l'éjection.

3.4 Troisième étage et système de fixation de l'électronique

Le troisième étage de la fusée est vide afin de pouvoir contenir le rack électronique. Pour faciliter l'accès à celui-ci une fois la fusée montée, nous avons ajouté une trappe vissée dans le fuselage. Un perçage est également présent au niveau du fuselage pour pouvoir introduire un jack lors du décollage.

Le rack sert de support pour les systèmes électroniques de la fusée (cartes et batteries). Il est fixé à la fusée via les deux rails encastrés sur la boîte contenant le parachute dans le deuxième étage de la fusée. Les différents composants électroniques sont attachés à ces deux rails de la façon suivante :

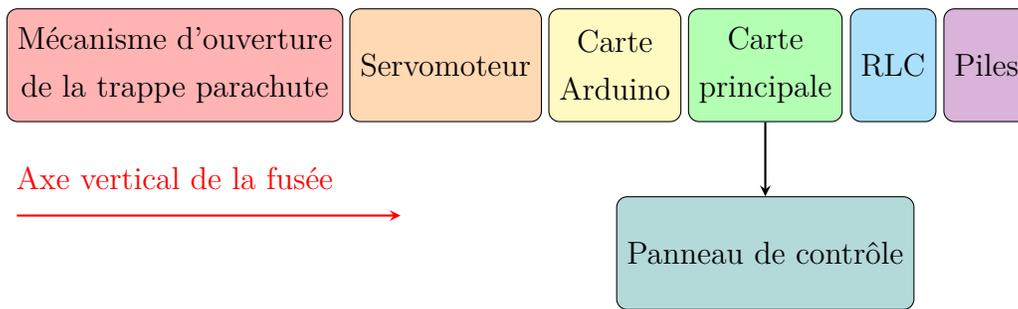


FIGURE 4 – Schéma de l'organisation spatiale des systèmes électroniques

L'objectif initial était de pouvoir démonter une carte du rack sans avoir à en démonter l'intégralité, afin de faciliter les interventions en cas d'éventuels problèmes. Les cartes sont donc fixées à des cadres eux-mêmes fixés à des rails. Cependant, le manque d'espace dans la fusée nous a contraint à concevoir un rack trop petit pour réaliser cet objectif : les rails soutenant les cartes sont trop fins et les diamètres des perçages pour les fixations des cadres trop grands, ce qui rend la structure trop fragile pour supporter des efforts extérieurs liés à un montage/démontage des cadres. Par ailleurs, le montage du rack sur la fusée s'est fait en force, le diamètre intérieur de la fusée étant très proche de celui des cartes. Pour toutes ces raisons et de par un manque de temps qui aurait permis d'améliorer sa conception, aucun élément du rack n'a été retiré après sa mise en place et un démontage reste difficilement possible.

Les trois batteries alimentant tous les systèmes de la fusée sont positionnées dans une boîte situées au sommet du rack.

La carte comportant les LED est fixée à une trappe qui permet d'accéder aux trois cartes sans retirer le troisième étage (cf. Figure 6).

3.5 Quatrième étage et planeur

La dernière section est presque vide afin de pouvoir accueillir le planeur ainsi que son système d'éjection. Une partie du système d'éjection du planeur a été directement intégrée au fuselage : la bague contenant l'électro-aimant ainsi que trois supports servant d'appui pour le système d'éjection en lui-même.

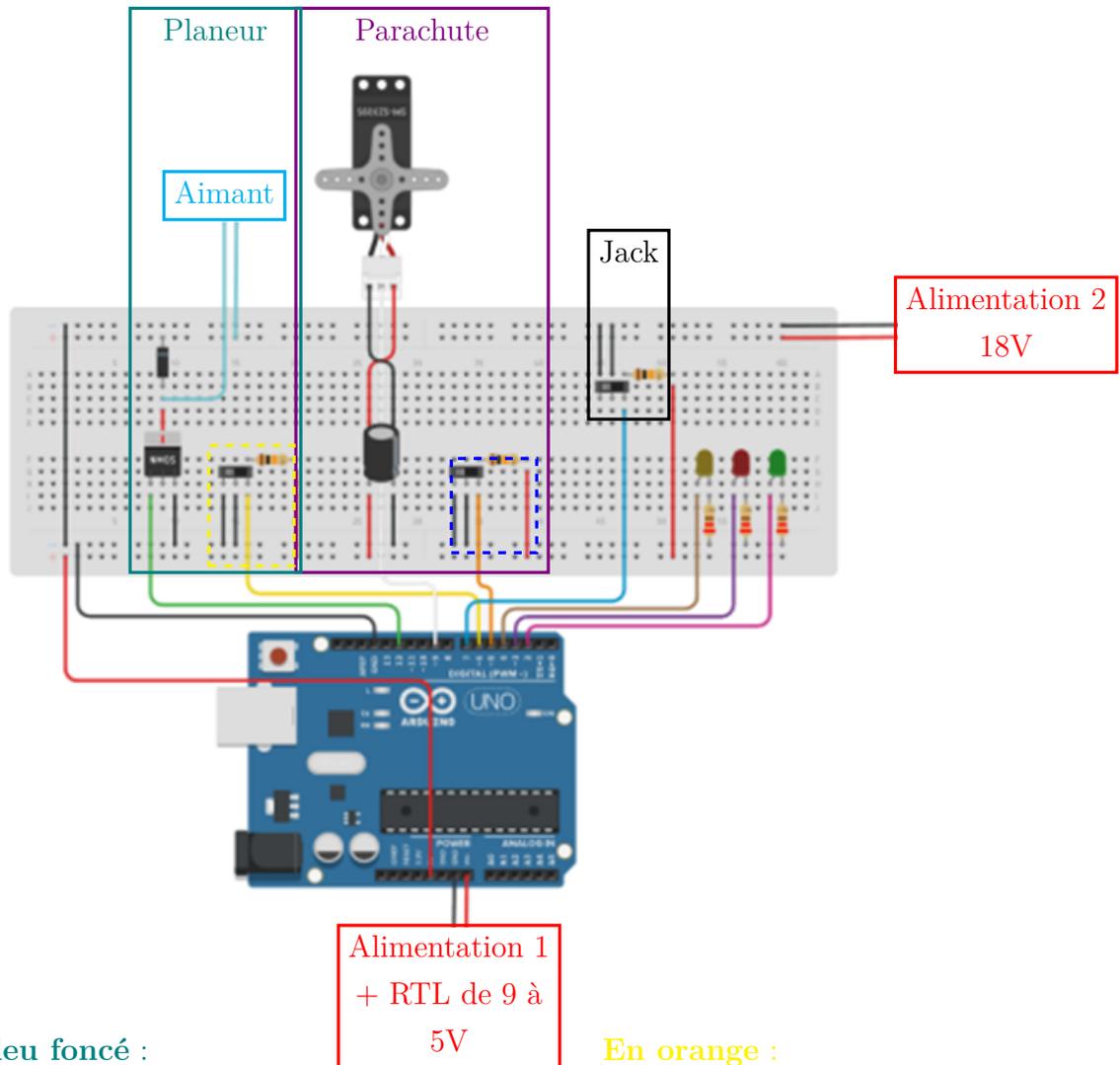
Afin de maintenir le planeur en place dans le lanceur, deux tiges ont également été réalisées tout le long de l'étage selon l'angle de 5° des ailes et empêchent ainsi toute rotation du planeur lorsqu'il est solidaire de la fusée.

Enfin, un chanfrein a été réalisé sur haut de l'étage pour faciliter l'insertion du planeur.

4 Description électronique et informatique

Cette partie n'est qu'un extrait d'un rapport plus détaillé réalisé par Mathys Trotter, qui se trouve en annexe si de plus amples explications sont nécessaires.

4.1 Aperçu général de l'électronique



En bleu foncé :
contrôle de l'ouverture de la
trappe parachute

En orange :
contrôle de l'éjection du
planeur

NB : un interrupteur est présent entre l'alimentation 1 et la carte Arduino mais n'est pas représenté ici

FIGURE 5 – Schéma complet de l'électronique d'Hermès

L'électronique d'Hermès repose sur trois composants principaux :

- Carte Arduino
- Carte principale
- Carte panneau de contrôle

Ces éléments sont intégrés dans un rack électronique placé au troisième étage de la mini-fusée. Une trappe électronique, de dimensions similaires à la trappe parachute est alignée sur cette dernière, permettant un accès facile au rack pour les interventions. La conception de cette trappe permet d'accéder rapidement aux composants électroniques sans avoir à démonter d'autres parties de la fusée. À noter que la carte principale et la carte panneau de contrôle ont été entièrement soudées à la main.

4.2 La carte Arduino

La carte Arduino est montée dans le rack électronique. Cette carte est installée de façon à rendre son port UART facilement accessible, même lorsqu'elle est en place dans le rack. Le bouton de reset reste également atteignable car la trappe électronique est située directement au-dessus de la carte.

La carte Arduino joue un double rôle : celui de séquenceur et de carte d'expérience. L'expérience embarquée par Hermès utilise un unique actionneur, une ventouse magnétique, dont l'activation est simple. L'éventuel échec de cette expérience, qui du point de vue de l'électronique consiste en l'incapacité de désactiver la ventouse, n'affecte pas la récupération de la mini-fusée. Ces considérations ont conduit à la décision de ne pas démultiplier les microprocesseurs à bord d'Hermès.

4.3 La carte principale

La carte principale assure le routage des connexions entre la carte Arduino, la carte panneau de contrôle, le jack, et l'actionneur de récupération (servomoteur) ainsi que celui lié à l'expérience (ventouse magnétique). Elle permet également la distribution de l'alimentation à ces différents éléments.

Cette carte agit comme un hub de connexions, visant à réduire le nombre d'opérations de branchement nécessaires en cas de réparation. Elle permet également de transférer les contrôles (alimentation, ouverture de la trappe parachute et éjection du planeur) vers la carte panneau de contrôle. Pour garantir une utilisation facile, toutes les connexions sont étiquetées et nommées, aussi bien sur les nappes que sur les cartes.

4.4 La carte du panneau de contrôle

Accolée à la trappe électronique, la carte panneau de contrôle est reliée à la carte principale par une seule nappe, suffisamment longue pour permettre d'accéder au rack lorsque la trappe est ouverte. Cette carte fournit des informations sur l'état de la fusée et dispose de plusieurs commandes spécifiques :

- Interrupteur d'alimentation
- LED d'alimentation (verte)
- Interrupteur parachute : permet l'ouverture de la trappe parachute sans lancer la séquence de vol.
- Interrupteur planeur : permet d'éjecter le planeur en désactivant la ventouse magnétique, également sans déclencher la séquence de vol.
- LED état parachute/planeur (jaune) : indique l'état du système d'éjection (parachute ou planeur). Si l'un des systèmes est désactivé, la LED est éteinte.
- LED jack (rouge) : informe de l'état de la fiche Jack ; si le jack n'est pas détecté, la LED reste éteinte.

L'interface utilisateur est conçue pour être claire et intuitive, avec des commandes également étiquetées et nommées pour éviter toute confusion.

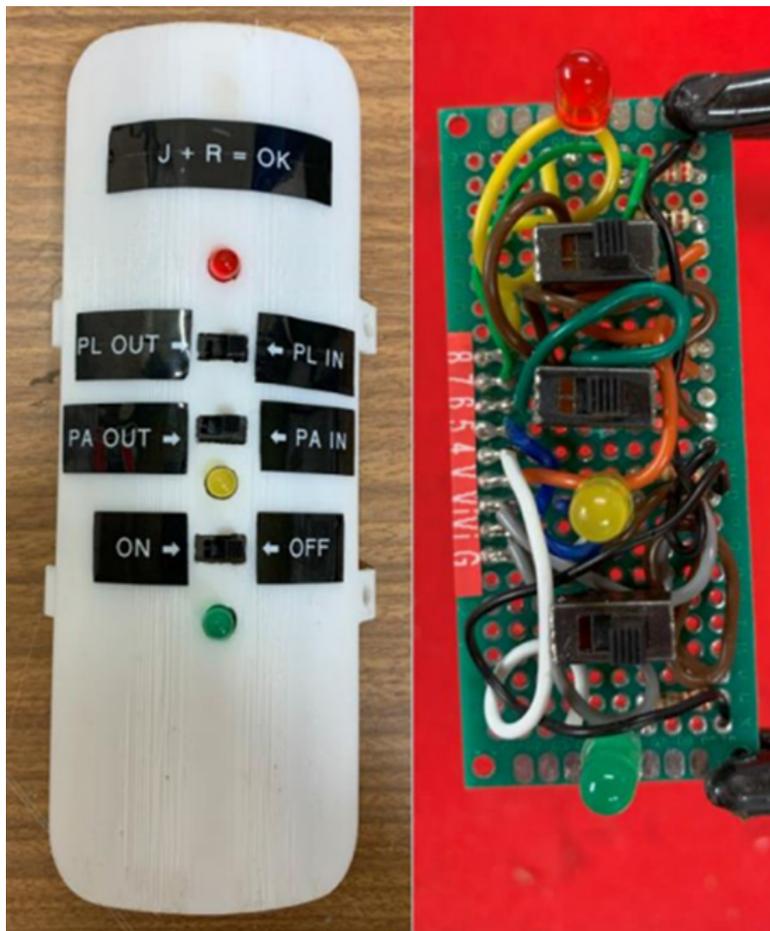


FIGURE 6 – Carte panneau de contrôle et trappe élec

4.5 Détection du décollage

Le système de détection du décollage repose sur un système Jack. Une fiche est fixée à la rampe de lancement et est connectée à la fusée grâce à une prise. Lorsque la fusée décolle, la fiche est arrachée de la prise, ce qui permet de détecter le décollage. Le circuit suivant, proposé par Planète Science, permet de détecter l'instant de l'arrachement, et donc du décollage :

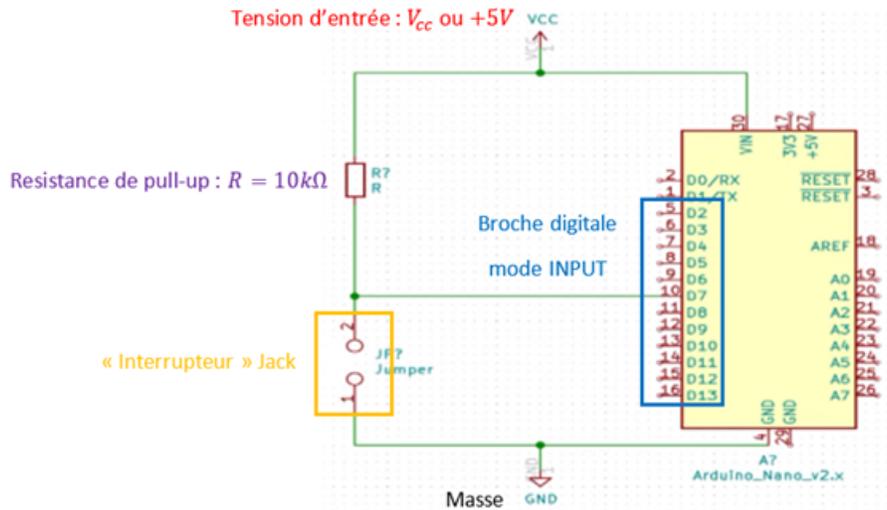


FIGURE 7 – Circuit de détection du décollage

En particulier, le changement de tension mesuré dans la broche indique le changement d'état de la fusée :

- Avant le décollage : la fiche est branchée à la prise, l'interrupteur est ouvert donc la tension mesurée est non nulle.
- Après le décollage : la fiche est arrachée, l'interrupteur est fermé donc la tension mesurée est nulle.

Dans le cas d'Hermès, la détection du décollage est réalisée à l'aide d'un système Jack mono. La prise mono ne possède que deux points de contact.

4.6 Contrôle de la trappe parachute

L'éjection de la trappe parachute est assurée par un servomoteur, contrôlé par la bibliothèque Arduino "Servo". Le servomoteur est alimenté par l'Arduino, mais son action entraîne une chute de tension. Pour compenser ces fluctuations, un condensateur a été ajouté entre l'alimentation et la masse. Néanmoins, ce condensateur s'est avéré insuffisant en raison de la puissance du servomoteur utilisé. Pour y remédier, un module régulateur linéaire de tension (RLT) a été placé entre la carte Arduino et son alimentation. Ce composant permet de maintenir, dans une certaine mesure, une tension de sortie constante, indépendamment des variations de courant ou de la

tension d'entrée. Dans le cas d'Hermès, le module utilisé laisse la possibilité de régler la tension de sortie.

4.7 Contrôle de l'éjection du planeur

L'éjection du planeur est réalisée par la désactivation d'une ventouse magnétique, qui consiste en un aimant permanent qui perd ses propriétés lorsqu'il est traversé par un courant. Il n'est pas possible de connecter directement la ventouse à l'Arduino pour deux raisons principales :

- La ventouse nécessite des tensions et des courants bien plus élevés que ce que l'Arduino peut fournir.
- La ventouse peut agir comme un alternateur, risquant d'endommager les composants du circuit.

Néanmoins, le choix a été fait d'interfacer le circuit de contrôle avec le circuit de la ventouse grâce à un transistor. En effet, un transistor est un composant permettant de gérer de forts courants et de fortes tensions par l'intermédiaire de faibles courants et de faibles tensions fournis par l'Arduino.

Ainsi, le transistor peut être considéré comme un interrupteur numérique, ici le transistor utilisé est de type NMOS :

- Si une tension est appliquée à la borne grille, le circuit relié aux broches sources et drains est fermé.
- Sinon, le circuit est ouvert.

La ventouse est contrôlée par un circuit identique à celui d'un moteur à courant continu, dont le montage est donné ci-dessous. De plus, la ventouse se contrôle simplement comme une LED, il n'y a pas besoin d'importer de bibliothèque particulière. De plus, l'ajout d'une diode en parallèle de la ventouse permet d'empêcher le courant d'entrer dans le circuit de contrôle. A noter que l'alimentation de la ventouse choisie consiste en deux piles 9V, dissociées de l'alimentation de la carte Arduino.

5 Le code Arduino

Le programme a été conçu pour être embarqué sur une carte Arduino UNO R4 Minima. Il s'agit d'un système de contrôle destiné à gérer l'ouverture d'une trappe et la désactivation d'aimants retenant un planeur, en assurant une vérification rigoureuse du Jack avant et pendant le vol pour éviter tout faux-contact.

5.1 Objectifs principaux

— Contrôle du Jack avant le décollage

Le Jack joue un rôle essentiel dans ce système. Il permet d'indiquer si l'appareil est prêt pour le décollage. Lorsqu'il est branché, il signale que tout est en ordre. Mais s'il est retiré et rebranché par erreur avant ou pendant la minuterie, cela pourrait entraîner un dysfonctionnement. Ainsi, le code implémente une série de vérifications pour s'assurer que le Jack n'est pas rebranché de manière intempestive.

— Gestion du servomoteur et des aimants

Le servomoteur est utilisé pour contrôler l'ouverture de la trappe. À un moment critique, ce servomoteur libère le parachute en changeant de position. La ventouse magnétique est responsable de la rétention du planeur avant le décollage. Une fois que les conditions de vol sont remplies (vérification du Jack et minuterie écoulée), cette ventouse est désactivée, permettant ainsi au planeur de se libérer.

5.2 Fonctionnement détaillé du code

— Initialisation

Lors de l'initialisation dans la fonction 'setup()', tous les composants (servo, ventouse, LED d'alimentation, interrupteurs) sont correctement configurés pour être utilisés. Le servomoteur est positionné à son angle initial (30°), et la ventouse est désactivée par défaut.

— Vérification avant le vol

Le programme effectue plusieurs lectures des interrupteurs et du Jack pour vérifier si tous les éléments sont en place. Si l'interrupteur de la trappe est déclenché

(‘switchParachute == HIGH’), cela signifie que la trappe doit s’ouvrir. Le servomoteur change alors d’angle pour ouvrir la trappe. Si l’interrupteur de la ventouse est déclenché (‘switchPlaneur == HIGH’), cette dernière est désactivée pour libérer le planeur.

— Détection du Jack

Le Jack est l’élément crucial de la séquence de vol. Le programme s’assure qu’il est branché avant le décollage et qu’il ne subit pas de faux-contacts pendant la phase critique. Lorsque le Jack est détecté comme branché (‘jack == LOW’), l’appareil est prêt pour le décollage (‘BRANCHE = true’). Cependant, si le Jack est retiré et rebranché pendant la phase de temporisation, cela doit annuler le processus de vol.

— Vérification du faux-contact pendant le vol

Avant de commencer la minuterie (qui simule la durée du vol, ici de 6000 ms), le programme effectue une dernière vérification pour s’assurer que le Jack n’a pas été rebranché par erreur. Une fois que le délai de vol démarre, le programme continue de vérifier le Jack à chaque seconde. Si le Jack est rebranché pendant ce laps de temps, le processus de vol est annulé, ce qui signifie que la trappe ne s’ouvrira pas et que le planeur ne sera pas libéré.

— Actions après la vérification

Si le Jack reste correctement débranché et que la minuterie s’écoule sans interruption (c’est-à-dire si aucun faux-contact n’a eu lieu), alors deux actions principales se déclenchent :

1. Le servomoteur ouvre la trappe du parachute en passant à l’angle final (0°).
2. La ventouse retenant le planeur est désactivée, ce qui permet au planeur de s’envoler.

— Sécurité thermique :

Le programme prévoit également de réactiver la ventouse une fois que son rôle est terminé afin d’éviter toute surchauffe. Cela est fait immédiatement après que le planeur ait été libéré.

5.3 Partie critique du code : vérification du Jack

La partie la plus critique de ce programme est la vérification du Jack avant le déclenchement de la minuterie. En voici les étapes :

Avant le vol : Le programme vérifie que le Jack est bien débranché avant le décollage. Si le Jack est branché au moment du démarrage, le programme active une LED indiquant que le système est prêt pour le décollage.

Pendant la minuterie : Une fois la minuterie commencée (qui simule la durée de vol), une vérification continue est effectuée à chaque seconde pour s'assurer que le Jack ne soit pas rebranché. Si cela se produit, cela déclenche une annulation des actions prévues (comme l'ouverture de la trappe ou la désactivation des aimants).

Conditions de validation : Si le Jack reste débranché pendant toute la durée de la temporisation, la trappe s'ouvre et les aimants sont désactivés, permettant ainsi au parachute et au planeur de s'activer. Sinon, le processus est stoppé.

6 Expérience

6.1 Introduction

L'expérience d'Hermès était l'éjection d'un planeur à l'apogée du vol. Cette expérience étant intégrée à une minifusée, pour des raisons de poids et de complexité nous avons fait le choix de ne pas ajouter de capteurs au sein de ce planeur.

6.2 Définition de l'expérience

La première étape de la conception du planeur a été de définir correctement son intégration par rapport à la fusée afin de pouvoir obtenir ses dimensions maximales et les possibilités de conception qui nous étaient offertes. Après des discussions et l'évaluation de différentes idées comme par exemple l'éjection d'un planeur par une trappe latérale, nous avons finalement décidé de concevoir un planeur qui servirait de coiffe à notre fusée et ainsi la coiffe serait éjectée à l'apogée du vol.

Suite au choix de la manière dont nous allions intégrer le planeur nous avons pu définir plusieurs exigences qui en découlaient. Les principales exigences que nous avions étaient alors d'avoir un système d'éjection efficace afin que le planeur ne s'éjecte pas trop tôt dans le vol mais qu'il s'éjecte suffisamment loin pour ne pas

gêner le déploiement du parachute et également d'avoir des ailes dépliables pour permettre au planeur de s'éjecter efficacement du reste de la fusée.

6.3 Conception mécanique du corps

Dès lors, nous avons pu commencer la conception du planeur. Nous avons d'abord voulu garder simplement la forme d'une coiffe et y ajouter en dessous le système de déploiement des ailes mais pour des raisons aérodynamiques nous avons finalement décidé d'utiliser une forme élancée pour le corps du planeur au sein de laquelle nous avons ajouté le système de déploiement des ailes.

De plus, au centre de ce planeur nous avons choisi d'insérer une tige en carbone comme axe principal du planeur. Cette tige nous a permis d'intégrer des éléments vitaux au système d'éjection du planeur tout au long de cette tige.

Le choix des matériaux a été effectué pour à la fois suivre notre volonté de concevoir une fusée imprimée en 3D tout en permettant de garantir la solidité du planeur en minimisant son poids. C'est pour ces raisons que nous avons imprimé en PETG le corps du planeur et que le carbone nous a semblé être une solution raisonnable pour fabriquer l'axe principal du planeur.

6.4 Conception mécanique du système d'éjection

Le système d'éjection a été l'un des éléments nécessitant le plus de réflexion et de tests lors de la conception du planeur. Suite à nos réflexions par rapport à la configuration choisie pour l'intégration du planeur dans la fusée, il nous a paru raisonnable de choisir d'utiliser un système aimant-ressort pour éjecter le planeur.

Ainsi, nous avons un électro-aimant qui lorsqu'il n'était pas alimenté en courant était aimanté et qui nous a servi à retenir le planeur solidaire du reste de la minifusée. Et dans le sens inverse, nous avons placé autour de la tige un ressort avec une pièce à son extrémité qui servait de point d'appui pour comprimer ce ressort lorsque le planeur se trouvait dans la coiffe. Ce système est représenté dans le schéma ci-dessous.

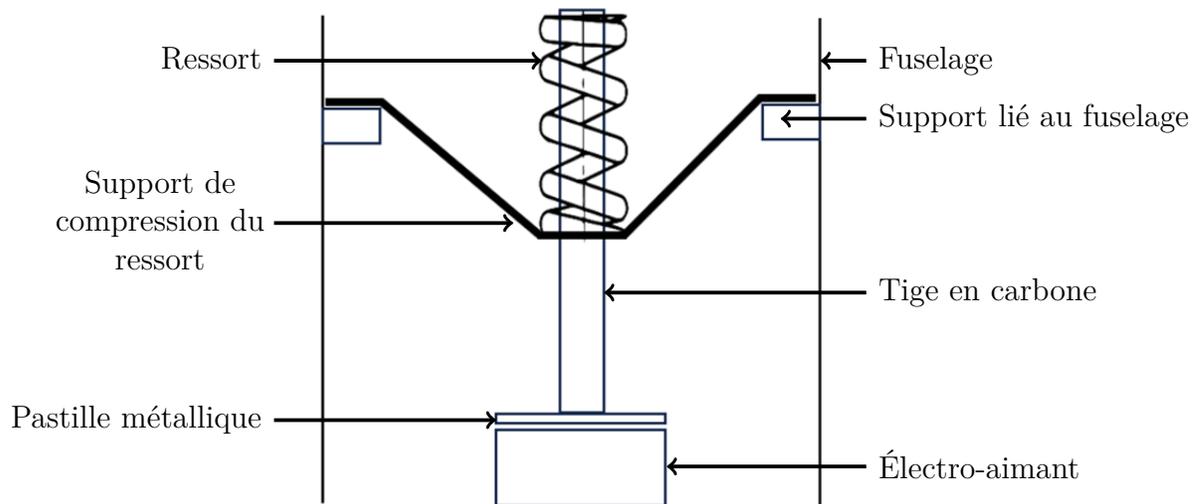


FIGURE 8 – Schéma du système d'éjection du planeur

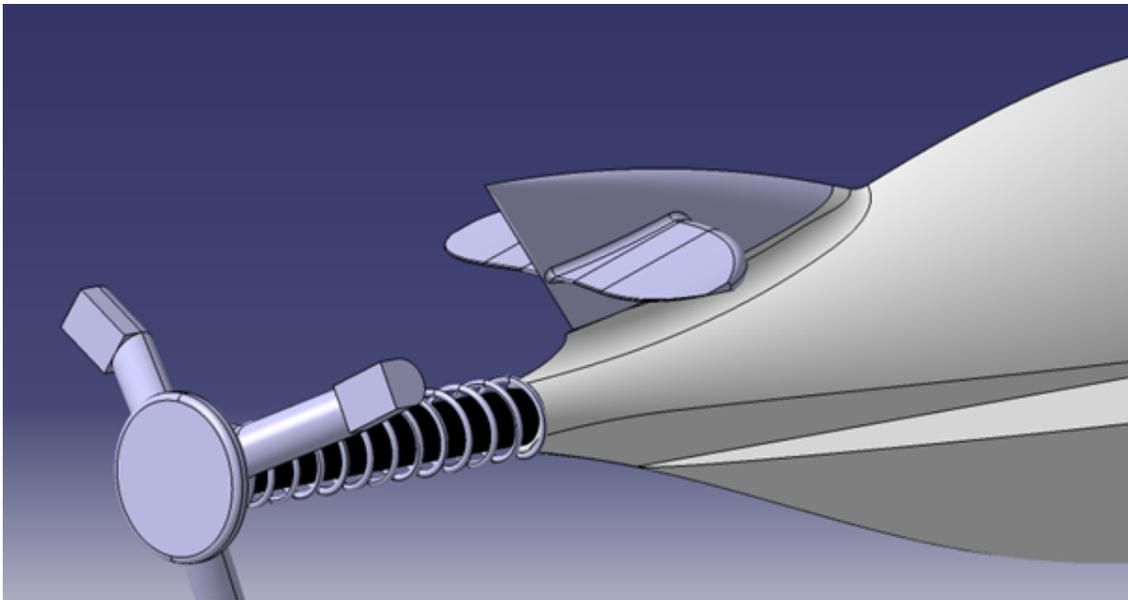


FIGURE 9 – Plan CATIA du système de propulsion du planeur

Ainsi, lorsque le minuteur avait atteint la durée estimée pour que nous soyons à l'apogée, nous injectons du courant dans l'électro-aimant qui ne servait alors plus de ventouse et le planeur s'éjectait hors de la fusée grâce au ressort. Afin de s'assurer la bonne éjection du planeur, nous avons posé les équations mécaniques liées au problème d'éjection et avons ensuite modélisé le problème à l'aide d'un programme python pour déterminer les couples puissance du ressort et puissance de

l'électro-aimant admissibles. Ce programme nous indiquait ainsi la vitesse d'éjection du planeur ainsi que sa distance pour une configuration d'éjection la plus défavorable c'est-à-dire à la verticale.

6.5 Conception mécanique du déploiement des ailes

Pour le déploiement des ailes, nous avons décidé d'utiliser un ressort de torsion par aile. Nous avons alors un axe principal qui traversait l'aile et était retenu en dessous et au-dessus de l'aile au sein du corps du planeur. Dans cet axe qui servait pour la rotation nous avons percé un trou qui a permis de loger l'une des extrémités du ressort de torsion alors que l'autre extrémité venait se loger directement dans une fente prévue à cet effet au sein de l'attache de l'aile. L'axe de l'aile pouvait être mis en rotation uniquement dans un sens à l'aide d'un système de cliquet ce qui nous a permis de d'augmenter facilement la tension des ressorts et contrôler ainsi la vitesse de déploiement des ailes.

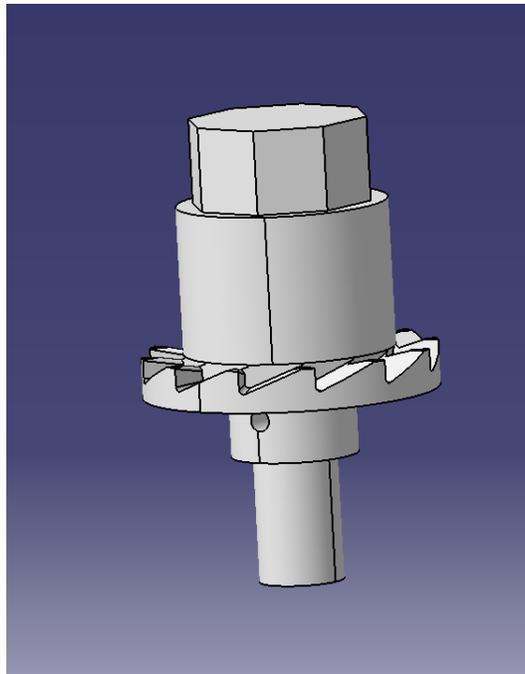


FIGURE 10 – Empennage et système de propulsion du planeur

Enfin, afin de prévoir l'arrêt des ailes, un deuxième axe traversait la fente d'attache des ailes et une fois déployées la rotation de ces dernières venait être bloquée contre cet axe. Ainsi, lors du vol les ailes restaient déployées et en position bloquée contre l'axe d'arrêt grâce à la force exercée par les ressorts de torsion.

6.6 Fabrication des ailes

Pour fabriquer les ailes nous nous sommes inspirés de ce qui est fait dans le modélisme en utilisant du polystyrène. Ainsi, nous avons utilisé du polystyrène haute densité, toutefois la surface portante restant faible par rapport à la masse du planeur il a fallu que nous renforçons les ailes à l'aide de deux tiges en métal par aile le long de ces dernières. De plus, puisque nous n'avions pas de fil chaud à notre disposition afin de découper les ailes et de former les bords d'attaque et de fuite nous avons décidé de les couper à l'aide d'une scie sauteuse puis de les tailler en les ponçant à l'aide d'une ponceuse électrique.

L'attache des ailes qui les relie au corps a été imprimé en 3D afin d'être plus résistant et d'améliorer la précision de la fente dans laquelle le ressort de torsion venait se loger. Ainsi, pour relier l'attache de l'aide au reste de l'aile nous avons inséré deux tiges en métal en quinconce au sein des deux pièces puis nous avons ajouté de la colle pour s'assurer que l'air ne pourrait pas circuler entre les deux pièces.

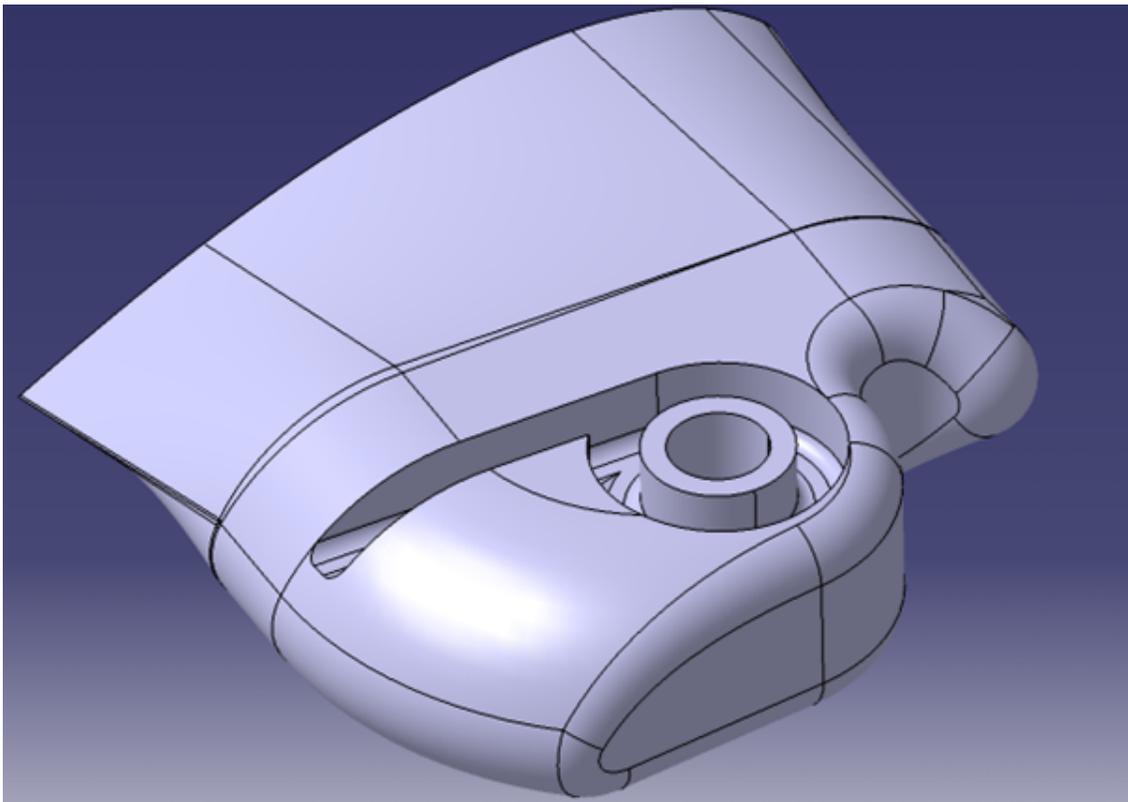


FIGURE 11 – Attache des ailes ?

Enfin, pour améliorer l'état de surface de l'aile et de la liaison, nous avons recouvert l'ensemble d'un scotch d'électricien pour ainsi obtenir une surface lisse permettant une bonne circulation de l'air autour de l'aile.

6.7 Stabilité du planeur

Finalelement, les dernières améliorations que nous avons apportées au planeur sont celles concernant sa stabilité. Tout d'abord, afin de s'assurer que le planeur tombe à plat quel que soit son sens d'éjection, nous avons introduit un dièdre de 5° aux ailes. Ainsi, si le planeur débutait sa chute à l'envers, il se retournerait automatiquement pour retrouver sa stabilité. De plus, nous avons ajouté un empennage réglable afin d'ajuster les moments cabreurs et piqueurs du planeur à nouveau pour permettre que lors de son vol il se retrouve à plat. Enfin, nous avons également ajouté un peu de masse à l'aide de petites billes de plomb près du nez afin d'avancer légèrement son centre de gravité et à nouveau améliorer sa stabilité.

7 Conclusion

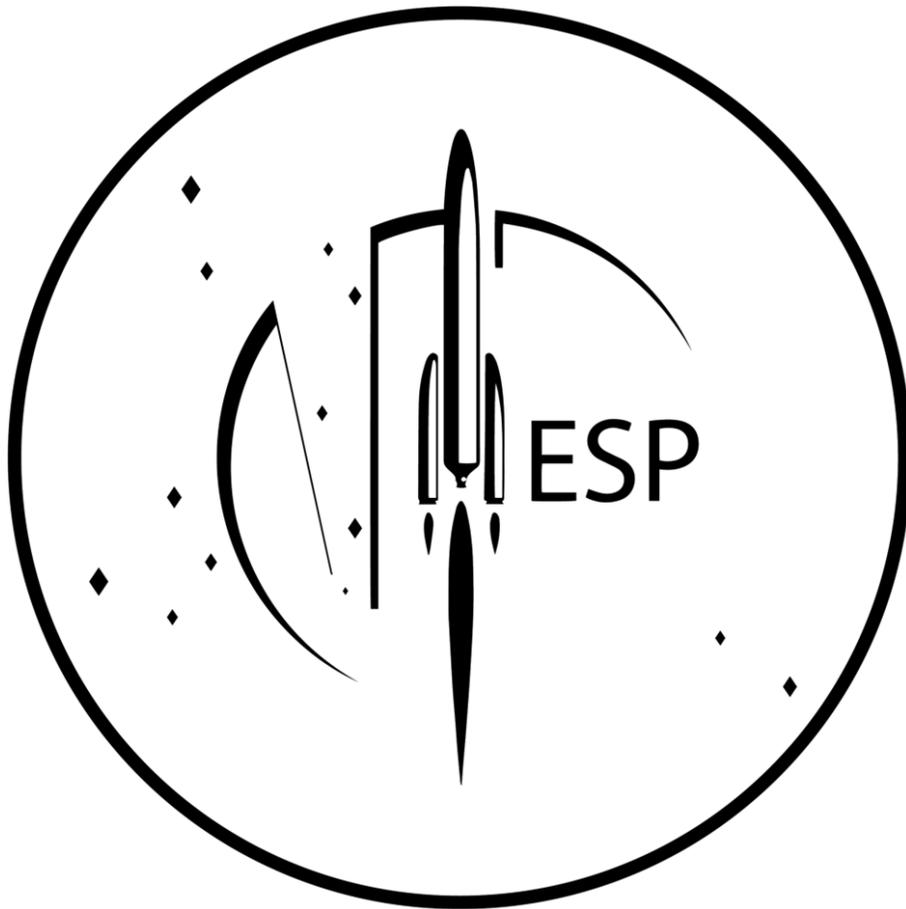
En conclusion, après le vol et analyse des vidéos nous pouvons dire que le planeur a fonctionné conformément à nos espérances et a été récupéré presque intact après le vol. L'éjection du planeur s'est effectuée juste après l'apogée comme prévu, et a été franche, les ailes se sont bien déployées et sont restées bien déployées tout au long du vol. Le planeur a conservé sa stabilité à plat lors de sa descente. Même concernant la vitesse de chute, nous avons anticipé une vitesse de chute moyenne de l'ordre de 11 m s^{-1} et après analyse des vidéos la vitesse de chute moyenne a été de 12 m s^{-1} ce qui est cohérent. Ainsi, nous avons pu valider de nombreux choix de conception. Toutefois, il reste encore des points qui auraient pu être améliorés, notamment le système d'attache des ailes qui aurait pu être plus résistant ou encore le fait de déporter l'empennage plus à l'arrière du planeur afin de contrôler plus facilement la stabilité de ce dernier.



8 Annexes

ELECTRONIQUE D'HERMES

Mini-fusée ESP 2023 – 2024

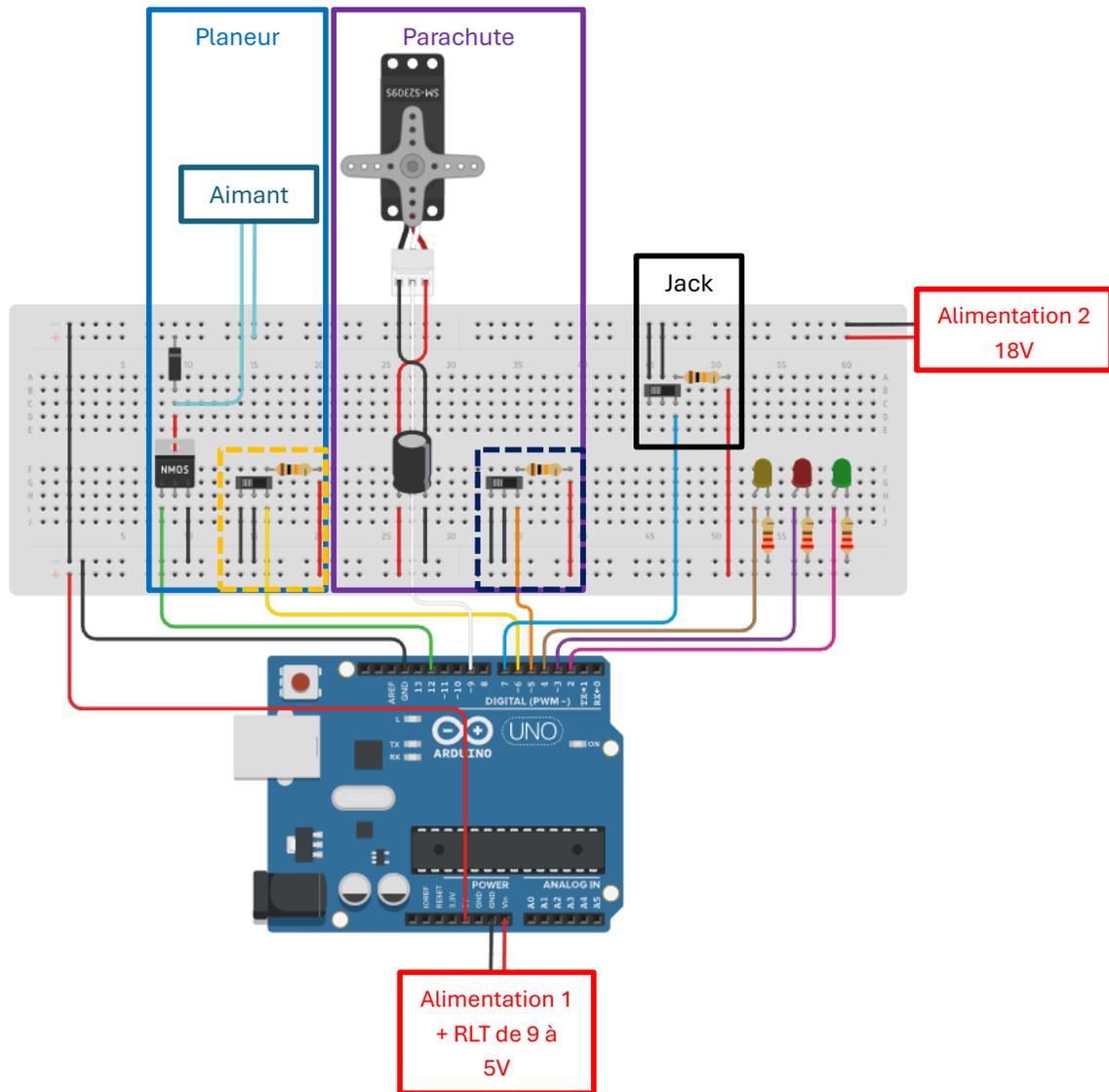


ISAE – ENSMA
Rapport de projet – ESP

Table des matières

Aperçu général de l'électronique d'Hermès	2
La carte Arduino	3
La carte principale	3
La carte panneau de contrôle	3
Détection du décollage	6
Contrôle de la trappe parachute	8
Contrôle de l'éjection du planeur	9
Annexes	11

Aperçu général de l'électronique d'Hermès



En bleu foncé : contrôle de l'ouverture de la trappe parachute

En orange : contrôle de l'éjection du planeur

NB : un interrupteur est présent entre l'alimentation 1 et la carte Arduino mais n'est pas représenté ici.

Figure 1 : Schéma complet de l'électronique d'Hermès

L'électronique d'Hermès repose sur trois composants principaux :

- Carte Arduino
- Carte principale
- Carte panneau de contrôle

Ces éléments sont intégrés dans un rack élec placé au troisième « étage » de la mini-fusée. Une trappe élec, de dimensions similaires à la trappe parachute est aligné sur cette dernière, permettant un accès facile au rack pour les interventions. La conception de cette trappe permet d'accéder rapidement aux composants électroniques sans avoir à démonter d'autres parties de la fusée.

A noter que la carte principale et la carte panneau de contrôle ont été entièrement soudées à la main.

La carte Arduino

La carte Arduino est montée dans le rack élec. Cette carte est installée de façon à rendre son port UART facilement accessible, même lorsqu'elle est en place dans le rack. Le bouton de reset reste également atteignable grâce à l'emplacement de la trappe élec, située directement au-dessus de la carte.

La carte Arduino joue un double rôle : **celui de séquenceur et de carte d'expérience**. L'expérience embarquée par Hermès utilise un unique actionneur, une ventouse magnétique, dont l'activation est simple. L'éventuel échec de cette expérience, qui du point de vue de l'élec consiste en l'incapacité de désactiver la ventouse, n'affecte pas la récupération de la mini-fusée. Ces considérations ont conduit à la décision de ne pas démultiplier les microprocesseurs à bord d'Hermès.

La carte principale

La carte principale assure le routage des connexions entre la carte Arduino, la carte panneau de contrôle, le jack, et l'actionneur de récupération (servomoteur) ainsi que celui lié à l'expérience (ventouse magnétique). Elle permet également la distribution de l'alimentation à ces différents éléments.

Cette carte agit comme un hub de connexions, visant à réduire le nombre d'opérations de branchement nécessaires en cas de réparation. Elle permet également de transférer les contrôles (alimentation, ouverture de la trappe parachute et éjection du planeur) vers la carte panneau de contrôle. Pour garantir une utilisation facile, toutes les connexions sont étiquetées et nommées, aussi bien sur les nappes que sur les cartes.

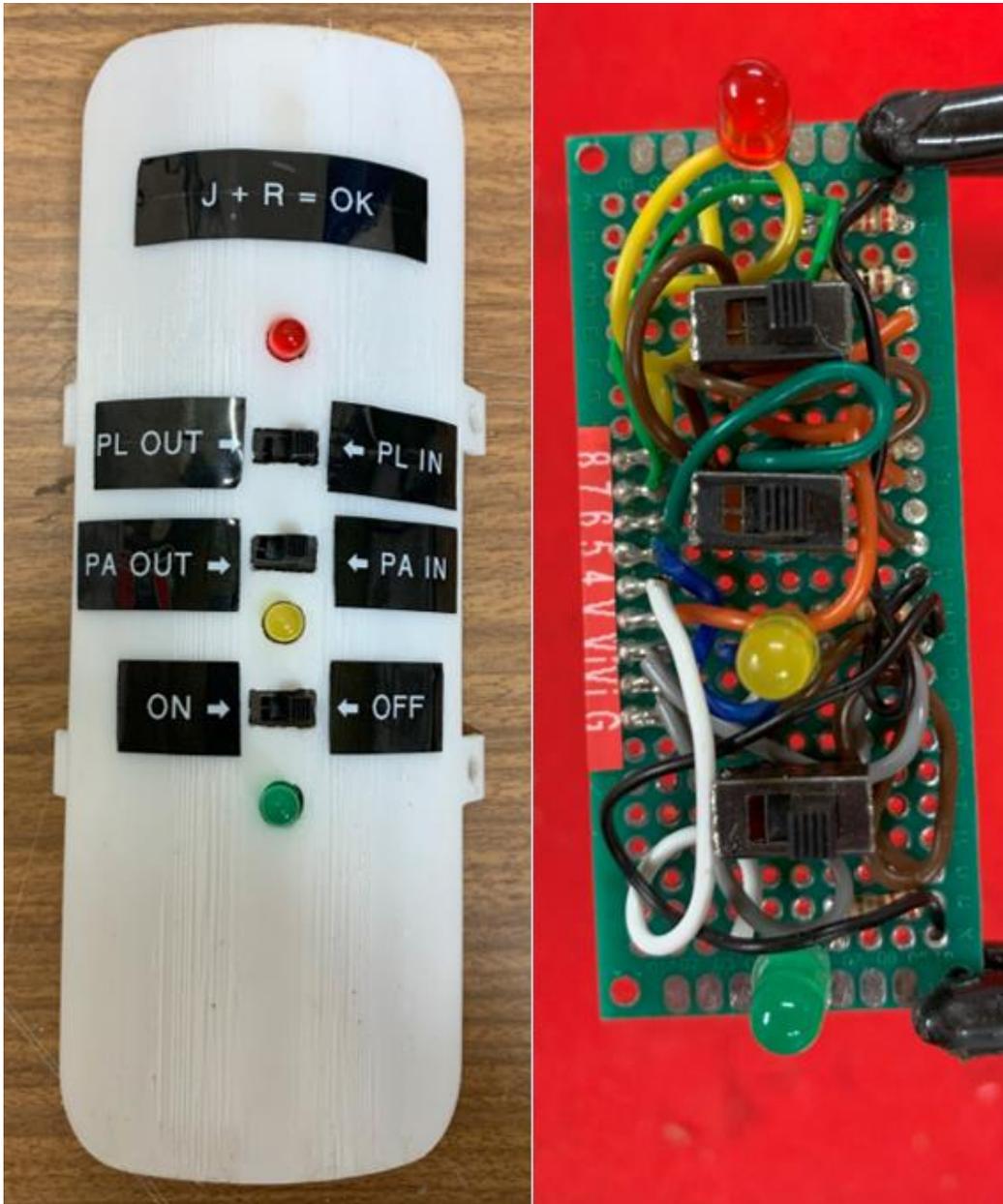
La carte panneau de contrôle

Accolée à la trappe élec, la carte panneau de contrôle est reliée à la carte principale par une seule nappe, suffisamment longue pour permettre d'accéder au rack lorsque la trappe est ouverte. Cette carte fournit des informations sur l'état de la fusée et dispose de plusieurs commandes spécifiques :

- Interrupteur d'alimentation
- LED d'alimentation (verte)
- Interrupteur parachute : permet l'ouverture de la trappe parachute sans lancer la séquence de vol.

- Interrupteur planeur : permet d'éjecter le planeur en désactivant la ventouse magnétique, également sans déclencher la séquence de vol.
- LED état parachute/planeur (jaune) : indique l'état du système d'éjection (parachute ou planeur). Si l'un des systèmes est désactivé, la LED est éteinte.
- LED jack (rouge) : informe de l'état de la fiche Jack ; si le jack n'est pas détecté, la LED reste éteinte.

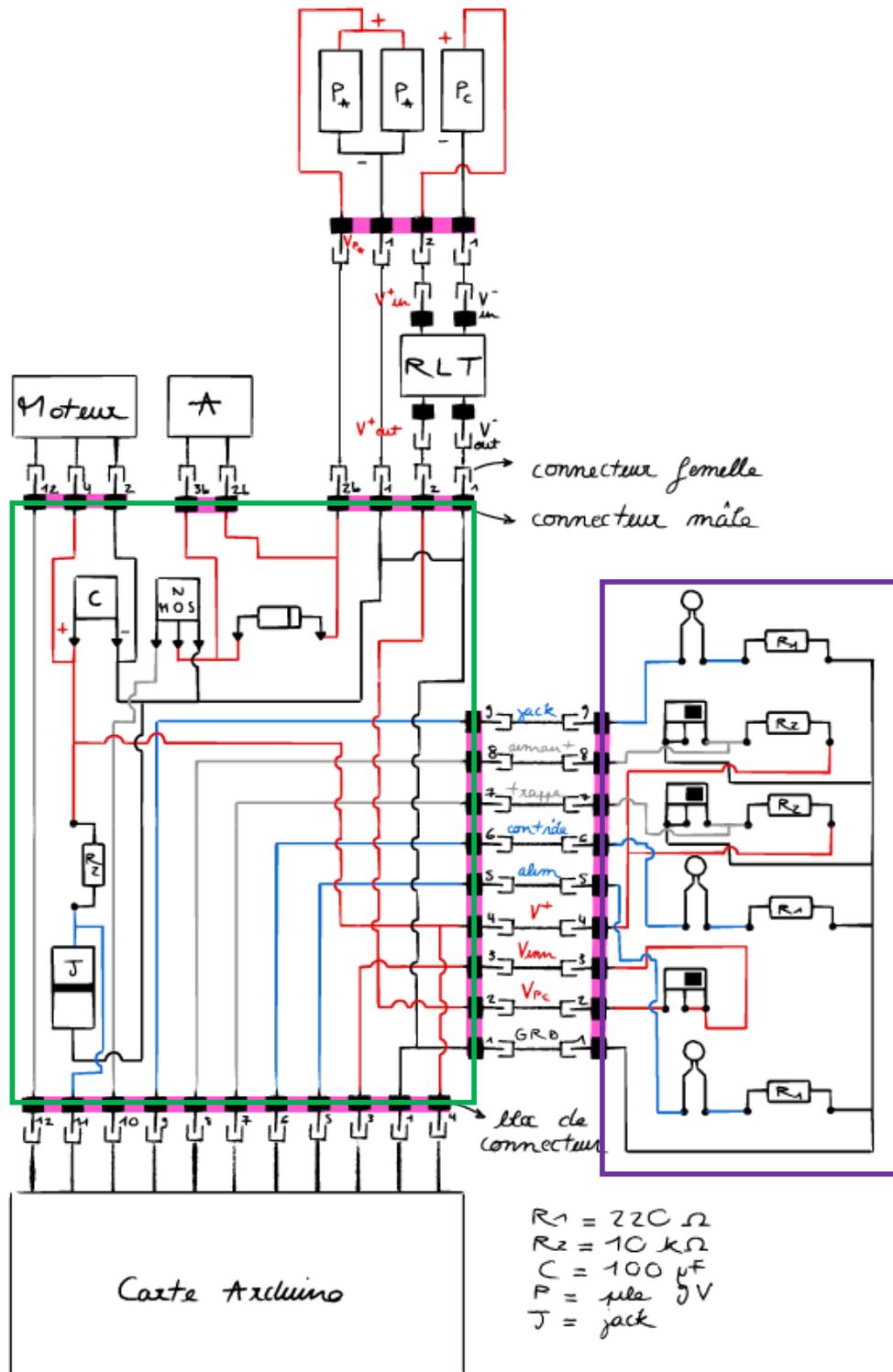
L'interface utilisateur est conçue pour être claire et intuitive, avec des commandes également étiquetées et nommées pour éviter toute confusion.



A gauche, carte panneau de contrôle monté sur la trappe élec

A droite, carte panneau de contrôle

Figure 2 : Carte panneau de contrôle et trappe élec



En vert : carte principale

En violet : carte panneau de contrôle

Figure 3 : Routage d'Hermès

Détection du décollage

Le système de détection du décollage repose sur un système Jack. Une fiche est fixée à la rampe de lancement et est connectée à la fusée grâce à une prise. Lorsque la fusée décolle, la fiche est arrachée de la prise, ce qui permet de détecter le décollage. Le circuit suivant, proposé par Planète Science, permet de détecter l'instant de l'arrachement, et donc du décollage :

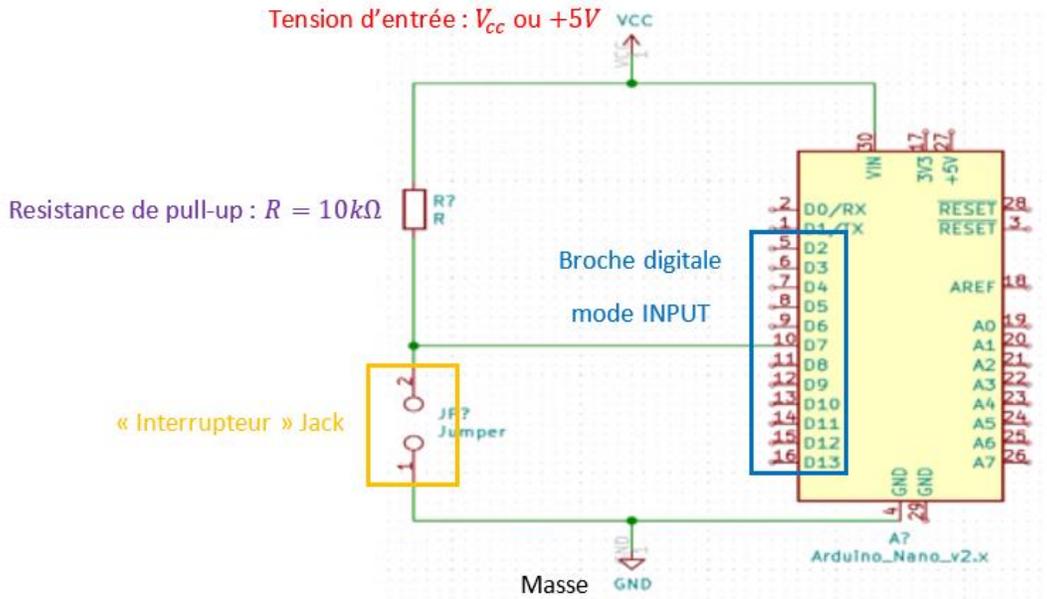


Figure 4 : Schéma circuit de détection du décollage

En particulier, le changement de tension mesuré dans la broche indique le changement d'état de la fusée :

- **Avant le décollage** : la fiche est branchée à la prise, l'interrupteur est ouvert donc la tension mesurée est non nulle.
- **Après le décollage** : la fiche est arrachée, l'interrupteur est fermé donc la tension mesurée est nulle.

Dans le cas d'hermès, la détection du décollage est réalisée à l'aide d'un système Jack mono. La prise mono ne possède que deux points de contact. Sur le schéma suivant : la bague 1 est connectée à la masse tandis que la lamelle 2 est reliée au reste du circuit.

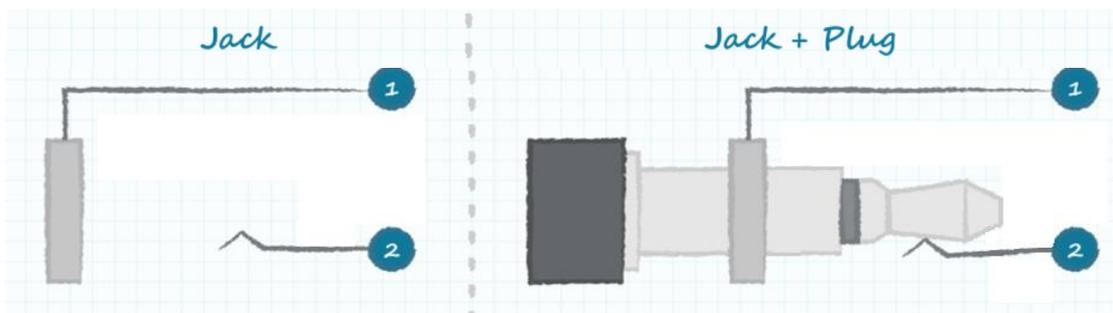


Figure 5 : Schéma système Jack mono

A noter que les points de contact de la fiche sont initialement isolés, sur la photo suivante on peut identifier :

- Le pin connecté au point de contact 1, et donc à la masse du circuit.
- Le pin connecté au point de contact 2, et donc au reste du circuit.

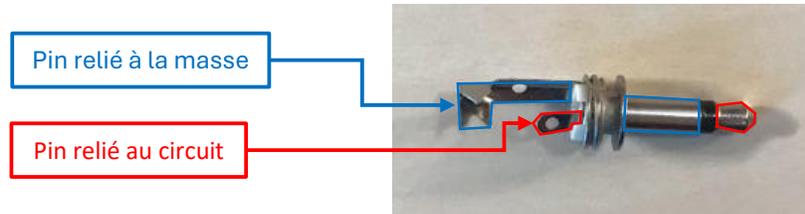


Figure 6 : Fiche dont le cache a été retiré

Dans le cadre de la détection du décollage d'une fusée, il est possible de transformer la fiche en simple interrupteur. Pour cela, il suffit de connecter les deux pins décrits précédemment à l'aide d'un fil : le courant passe lorsque la fiche est connectée à la prise, à l'inverse le circuit est ouvert lorsque la fiche est retirée. Ainsi, en s'appuyant du circuit présenté précédemment :

- **Avant le décollage** : la fiche est branchée dans la prise, l'interrupteur est fermé donc la tension mesurée est nulle.
- **Après le décollage** : la fiche est arrachée, l'interrupteur est ouvert donc la tension mesurée est non nulle.

L'avantage de cette méthode réside dans la sécurité qu'elle offre. En effet, dans le montage réel représenté sur le schéma suivant, le fil reliant les deux pins de la fiche est laissé accessible, ce dernier est accroché à la rampe de lancement. Si lors du décollage la fiche reste bloquée dans la prise, alors le fil est sectionné. Le circuit est donc ouvert, le décollage peut être détecté par la carte Arduino malgré un dysfonctionnement mécanique de la fiche ou de la prise.

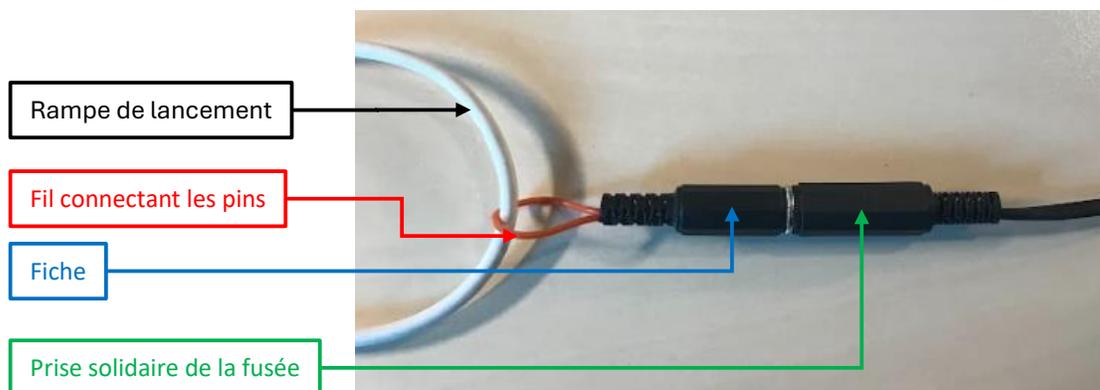


Figure 7 : Disposition de la fiche et de la prise Jack

Contrôle de la trappe parachute

L'éjection de la trappe parachute est assurée par un servomoteur, contrôlé par la bibliothèque Arduino "Servo". Le servomoteur est alimenté par l'Arduino, mais son action entraîne une chute de tension. Pour compenser ces fluctuations, un condensateur a été ajouté entre l'alimentation et la masse. Néanmoins, ce condensateur s'est avéré insuffisant en raison de la puissance du servomoteur utilisé.

Pour y remédier, un module régulateur linéaire de tension (RLT) a été placé entre la carte Arduino et son alimentation. Ce composant permet de maintenir, dans une certaine mesure, une tension de sortie constante, indépendamment des variations de courant ou de la tension d'entrée. Dans le cas d'Hermès, le module utilisé laisse la possibilité de régler la tension de sortie.

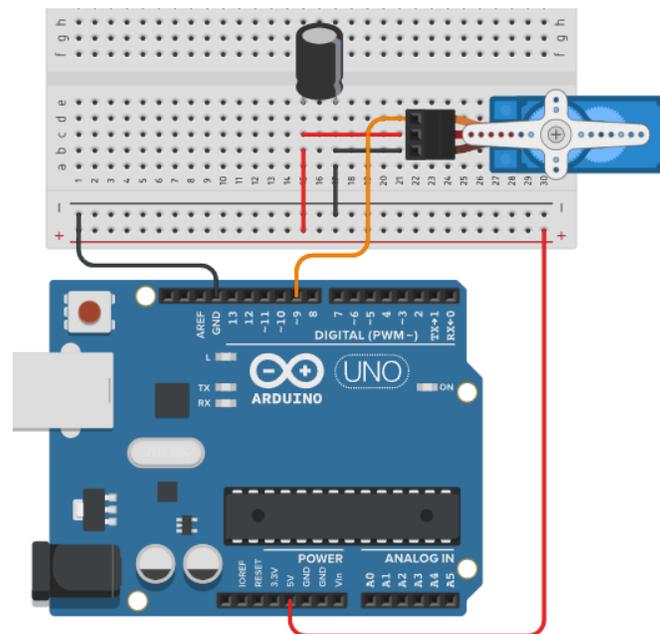


Figure 8 : Circuit de contrôle du servomoteur



Figure 9 : Module régulateur linéaire de tension

Contrôle de l'éjection du planeur

L'éjection du planeur est réalisée par la désactivation d'une ventouse magnétique, qui consiste en un aimant permanent qui perd ses propriétés lorsqu'il est traversé par un courant. Il n'est pas possible de connecter directement la ventouse à l'Arduino pour deux raisons principales :

- La ventouse nécessite des tensions et des courants bien plus élevés que ce que l'Arduino peut fournir.
- La ventouse peut agir comme un alternateur, risquant d'endommager les composants du circuit.

Néanmoins, le choix a été fait d'interfacer le circuit de contrôle avec le circuit de la ventouse grâce à un transistor. En effet, un transistor est un composant permettant de gérer de forts courants et de fortes tensions par l'intermédiaire de faibles courants et de faibles tensions fournis par l'Arduino. Ainsi, le transistor peut être considéré comme un interrupteur numérique, ici le transistor utilisé est de type NMOS :

- Si une tension est appliquée à la borne grille, le circuit relié aux broches sources et drains est fermé.
- Sinon, le circuit est ouvert.

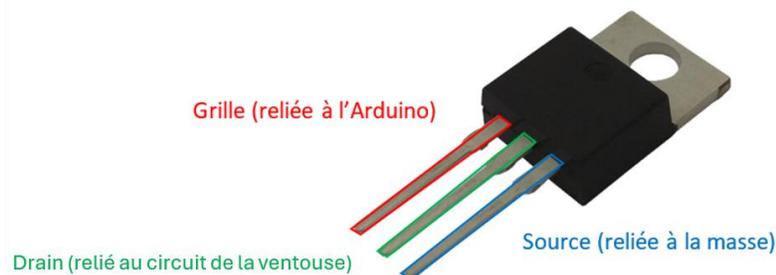


Figure 10 : Transistor MOFSET

La ventouse est contrôlée par un circuit identique à celui d'un moteur à courant continu, dont le montage est donné ci-dessous. De plus, la ventouse se contrôle simplement comme une LED, il n'y a pas besoin d'importer de bibliothèque particulière.

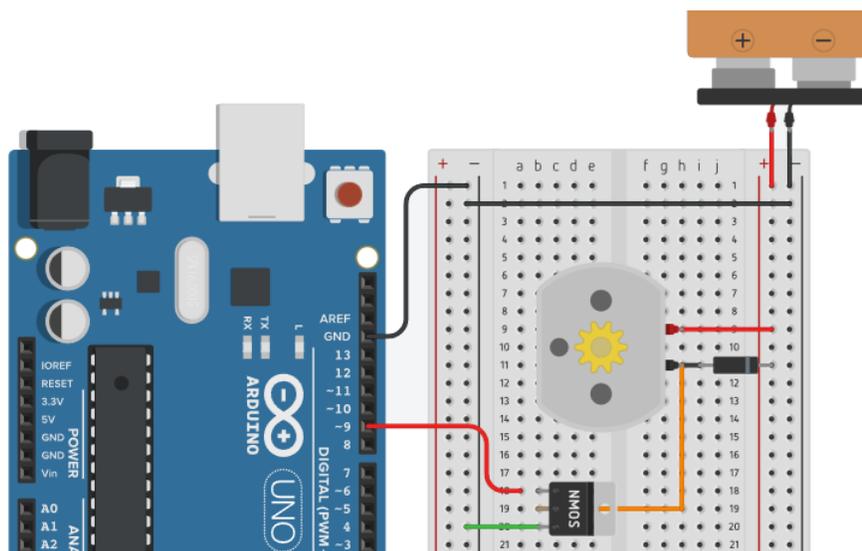
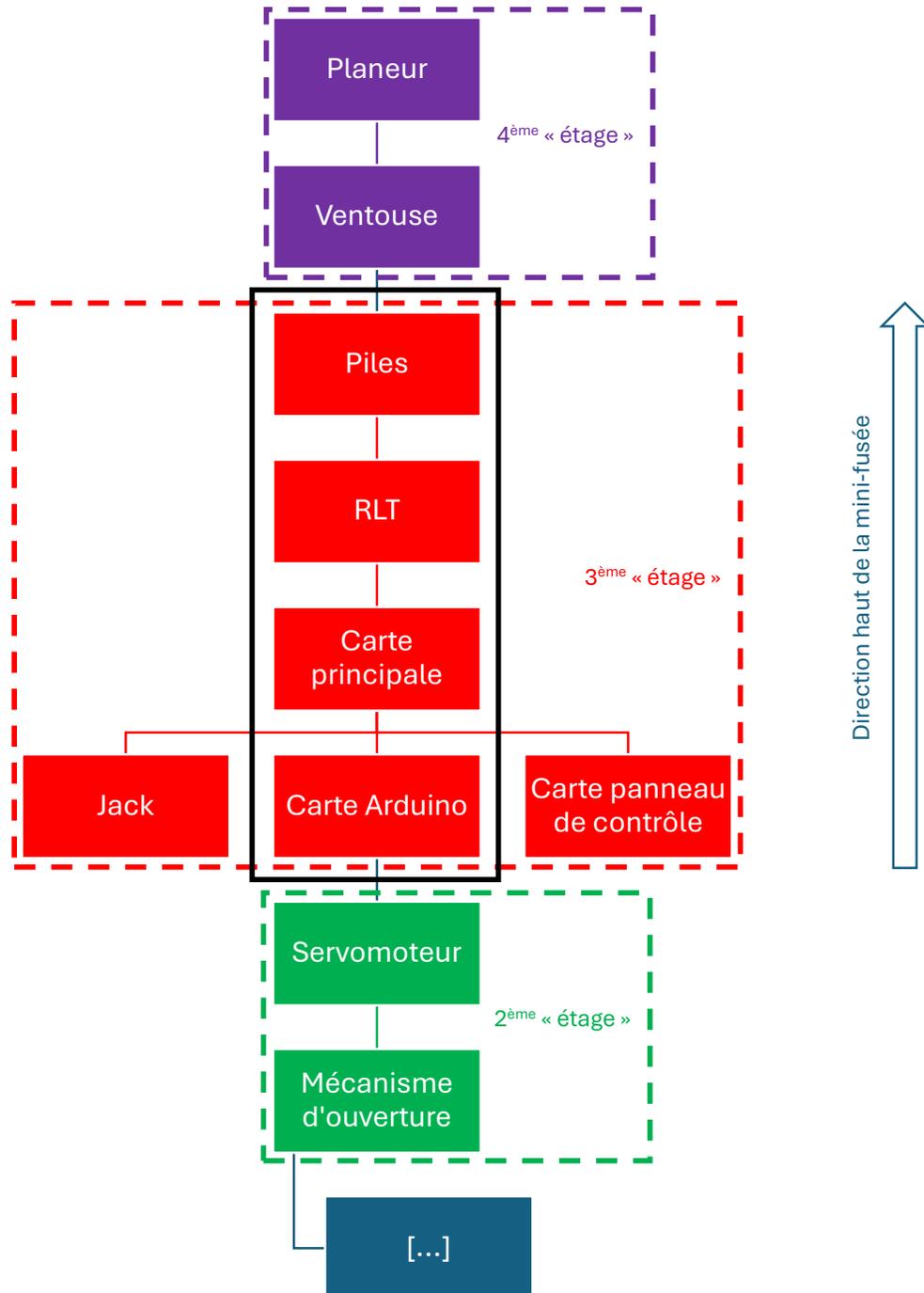


Figure 11 : Circuit de contrôle d'un moteur à courant continu/ventouse magnétique

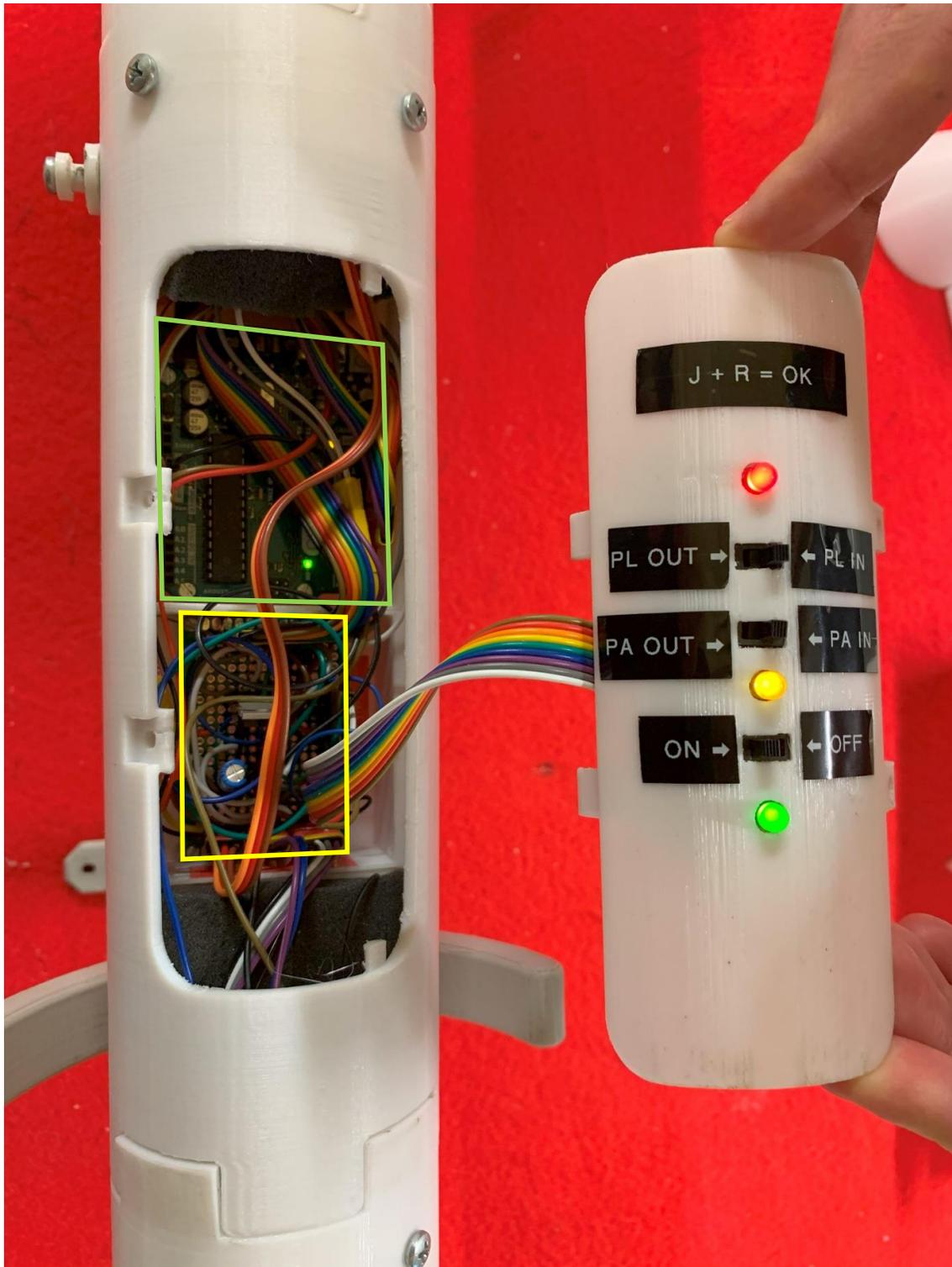
De plus, l'ajout d'une diode en parallèle de la ventouse permet d'empêcher le courant d'entrer dans le circuit de contrôle. A noter que l'alimentation de la ventouse choisie consiste en deux piles 9V, dissociées de l'alimentation de la carte Arduino.

Annexes



En noir : contenu du rack

Annexe 1 : Organisation de l'électronique



En vert : carte Arduino

En jaune : carte principale

Annexe 2 : Vue du rack élec depuis la trappe élec

```

```.cpp
/* Ce programme est adapté pour le circuit global avec les caractéristiques
suivantes :
> Les aimants permanents, ils doivent être alimentés pour être activés.
> Le Jack peremt le passage du courant, ainsi la tension détectée lorsque
le Jack est en place est nulle.
Si les propriétés de ces éléments sont inversés, il doit en être de même
pour toutes les vérifications intervenant dans le programme. */

#include <Servo.h>

Servo myServo;

int angleInitial = 30; // angle avec lequel le servomoteur retiens la
trappe
int angleFinal = 0; // angle d'ouverture de la trappe
int jack = 0;
int switchParachute = 0;
int switchPlaneur = 0;
int dureeVol = 6000; // temps de vol (en ms)
bool BRANCHE = false;
unsigned long chrono = millis();
unsigned long origineTemps = 0;
unsigned long delaiPlaneurPara = 500; // données obtenues sur le prog
python
int pinLED_Jack = 8;
int pinLED_Controlle = 5;
int pinLED_Alim = 4;
int pinJack = 10;
int pinServo = 11;
int pinAimant = 9;
int pinSwitch_Trappe = 6;
int pinSwitch_Aimant = 7;

```

```

void setup() {
 myServo.attach(pinServo); // initialisation controle du servo
 myServo.write(angleInitial);
 pinMode(pinAimant,OUTPUT); // initialisation controle des aimants
 (aimants permanants)
 digitalWrite(pinAimant,LOW);
 pinMode(pinLED_Alim,OUTPUT); // initialisation LED d'alimentation
 digitalWrite(pinLED_Alim,HIGH);
 pinMode(pinLED_Jack,OUTPUT); // initialisation LED détection du Jack
 digitalWrite(pinLED_Jack,HIGH);
 pinMode(pinLED_Controle,OUTPUT); // initialisation LED controle des
 aimants et de la trappe
 digitalWrite(pinLED_Controle,HIGH);
 pinMode(pinSwitch_Trappe, INPUT); // controle switch de la trappe du
 parachute
 pinMode(pinSwitch_Aimant, INPUT); // controle switch des aimants
 retenant le planeur
 pinMode(pinJack,INPUT); // initialisation mesure de la tension aux
 bornes du Jack
}

void loop() {

 switchParachute = digitalRead(pinSwitch_Trappe); // mesure de la tension
 aux bornes de l'interrupteur de la trappe

 switchPlaneur = digitalRead(pinSwitch_Aimant); // mesure de la tension
 aux bornes de l'interrupteur des aimants

 jack = digitalRead(pinJack); // mesure de la tension aux bornes du Jack

 if(switchParachute == HIGH) { // l'interrupteur de la trappe est mis sur
 OFF
 digitalWrite(pinLED_Controle,LOW);
 myServo.write(angleFinal); // la trappe est ouverte
 while(switchParachute == HIGH) {
 switchParachute = digitalRead(pinSwitch_Trappe);
 }
 }
}

```

```

 myServo.write(angleInitial);
 digitalWrite(pinLED_Controle,HIGH);
}

if(switchPlaneur == HIGH) { // l'interrupteur des aimants est mis sur
OFF
 digitalWrite(pinLED_Controle,LOW);
 digitalWrite(pinAimant,HIGH); // les aimants sont désactivés
 while(switchPlaneur == HIGH) {
 switchPlaneur = digitalRead(pinSwitch_Aimant);
 }
 digitalWrite(pinAimant,LOW);
 digitalWrite(pinLED_Controle,HIGH);
}

if ((jack == LOW) and !BRANCHE) {
 BRANCHE = true; // Jack branché
 digitalWrite(pinLED_Jack,HIGH); // Prêt pour le décollage
}

if ((jack == HIGH) AND BRANCHE) { // Potentiel Décollage
 BRANCHE = false;
 digitalWrite(pinLED_Jack,LOW);

 origineTemps = millis();
 chrono = millis();
 while ((chrono - origineTemps < dureeVol) and !BRANCHE) { // mesure du
temps de vol de la fusée
 chrono = millis();
 if(jack == LOW) { // On détecte le Jack à nouveau
 BRANCHE = true;
 digitalWrite(pinLED_Jack, HIGH);
 break;
 }
 }
}
}

```

```
 jack = digitalRead(pinJack); // mesure de la tension aux bornes du
 Jack (de nouveau)

 if ((jack == HIGH) and (chrono - origineTemps >= DureeVol)) { // On
 revérifie si le jack est toujours arraché pour éviter le faux contact

 digitalWrite(pinLED_Control,LOW);

 digitalWrite(pinAimant, HIGH); // les aimants sont désactivés
 (aimants non permanents) -> planeur décolle

 myServo.write(angleFinal); // le servo est mis en position ouverte ->
 trappe ouverte

 digitalWrite(pinAimant, LOW); // on désactive l'aimant pour éviter
 qu'il chauffe
 }
}

}
...

```

A

m

c

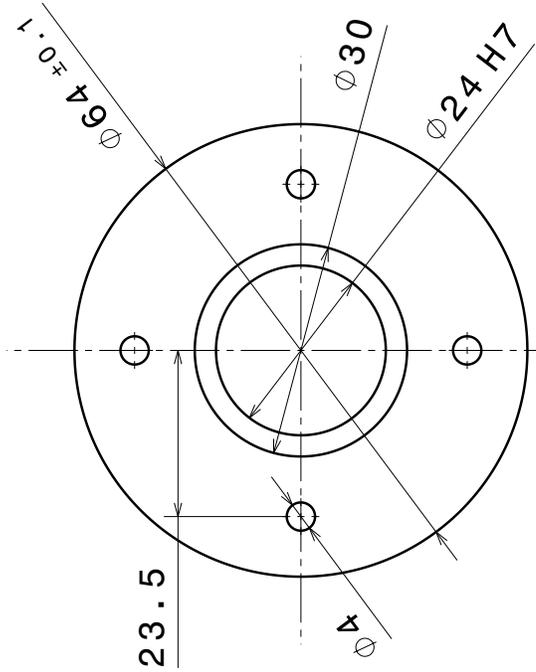
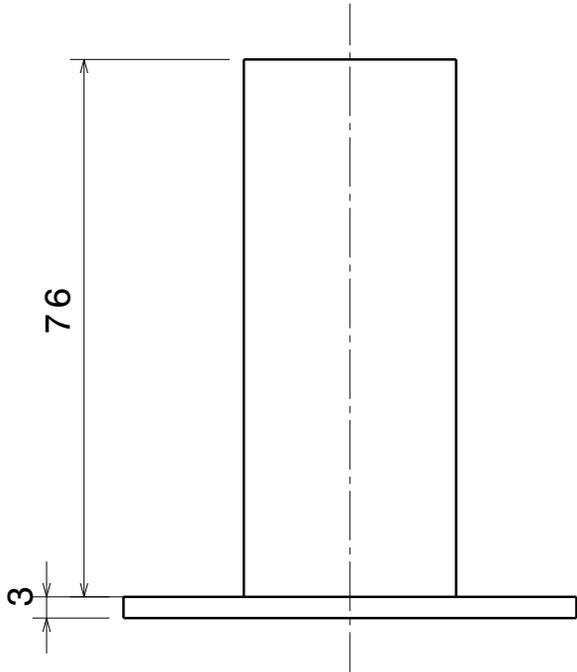
D

4

3

2

1



DESIGNED BY: Ensmat Space Project		ISAE - ENSMA		Ra 0.8	
DATE: 08/02/2024		Minif Hermès		Tolérance : ± 0,2	
SIZE A4		Bague moteur		Matériau : Al	
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) 0,03	DRAWING NAME SHEET 1/1			
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.					

A

D

4

3

2

1



# STABILITO

stabilité de fusée à aileron

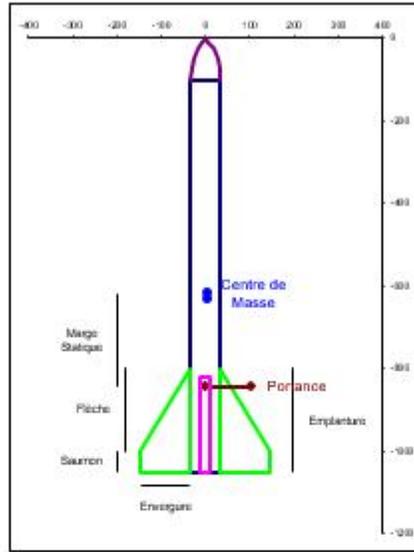
Remplir les cases jaunes

Fusée		
Nom	Hermès	
Club	ESP	
Matricule	MF 25	
Type	Minifusée	
Masse	1867 g	sans propu
Centre de Mass	600 mm	sans propu
Longueur totale	1050 mm	

Propulseur	
Type	Pandora (Pro24-6G BS)
Position du bas	1050 mm

Coiffe	
Forme	Ogivale (pointue)
Hauteur	100 mm
Diamètre	70 mm

Ailerons	
Mono-empennage	
Emplanture	250 mm
Saumon	50 mm
Flèche	200 mm
Envergure	110 mm
Epaisseur	4 mm
Nombre	4
Position du bas	1050 mm



#####	Min	Résultats	Max
Finesse	10	15,0	20
Portance	15	22,4	22,4
MargeSta	1,5 D	3,09 D	3,26 D
Couple	30	69,1	72,9
XCp		#####	#####
MS /L		21% L	22% L

STABLE

Language/Langu Français

## Fusée mono-diamètre

	Propulseur	Propuide	Sans propu
Masse propu	0,16 kg	0,08 kg	-
CdM propu	114 mm	114 mm	-
Masse fusée	2,027 kg	1,95 kg	1,867 kg
CdM fusée	627 mm	615 mm	600 mm

	XCp	Cna
Coiffe	47 mm	2,0
Ailerons	921 mm	20,4

