

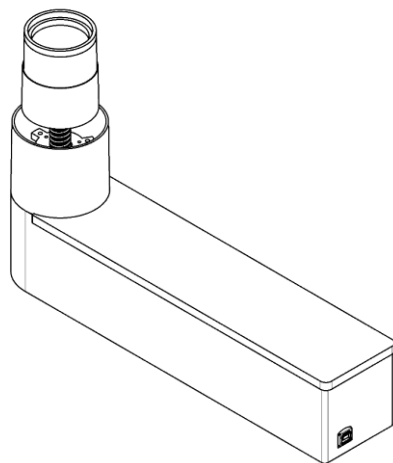
ESTIA Recherche & Centre de Recherche de l'École de l'air

# Rapport de stage

*Reproduction d'un prototype de  
visualisation de la consommation  
instantanée et du niveau de carburant  
des drones*

**LAFITTE CAMPAGNE Titouan**

Sera soutenu le 12/09/2025 à l'ESTIA



# I) Glossaire

## A

### ABS

ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène)

Plastique solide et résistant à la chaleur, mais difficile à imprimer. .... 17

## B

### Bambu Lab Studio

Bambu Lab Studio est un logiciel de tranchage (slicer) qui prépare les modèles 3D pour l'impression, en générant les instructions nécessaires pour les imprimantes Bambu Lab. .... 21

### breadboard

Une breadboard est une plaque de prototypage qui permet de connecter des composants électroniques sans soudure, facilitant la création et le test de circuits temporaires. .... 29

## C

### cable management

Le cable management est l'organisation et la gestion des câbles dans un système afin de les rendre plus accessibles, sécurisés et esthétiques. .... 37

### charge cognitive

La charge cognitive désigne la quantité d'effort mental nécessaire pour traiter et comprendre des informations afin de réaliser une tâche. .... 7

## CNC

CNC (Computer Numerical Control)

Procédé d'usinage qui retire de la matière à partir d'un bloc grâce à des machines commandées par ordinateur. .... 17

### cycle en V

Le diagramme en V est un modèle de projet qui relie la conception d'un système à sa validation par des tests. .... 18

## D

### driver

Un driver de moteur pas à pas est un composant qui contrôle le moteur, en gérant sa vitesse, sa position et son sens de rotation à partir des signaux envoyés par une carte comme l'Arduino. .... 13

## E

### environnement déporté

Un environnement déporté est une situation où l'opérateur contrôle un système à distance, en se basant uniquement sur des données et interfaces. .... 4

## F

### FDM

FDM (Fused Deposition Modeling)

Procédé d'impression 3D qui dépose du plastique fondu couche par couche. .... 16

## J

### jeu fonctionnel

Le jeu fonctionnel est le petit espace prévu entre deux pièces en mouvement pour éviter les frottements, assurer un bon fonctionnement et faciliter l'assemblage. ....	22
<i>P</i>	
PETG	
PETG (Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé)	
Plastique résistant et flexible, plus robuste que le PLA. ....	17
PLA	
Le PLA (acide polylactique) est un plastique biodégradable largement utilisé en impression 3D, apprécié pour sa facilité d'impression et sa faible tendance à la déformation. ....	10
post-traitement	
Le post-traitement désigne l'ensemble des opérations effectuées après une impression 3D, comme le ponçage, le retrait des supports ou l'assemblage, pour améliorer la qualité et la fonctionnalité des pièces. ....	21
<i>S</i>	
SLA	
SLA (Stereolithography Apparatus)	
Procédé d'impression 3D qui solidifie une résine liquide avec un laser ou UV. ....	17
STEP	
Le format STEP est un format de fichier 3D standardisé utilisé pour échanger des modèles CAO entre différents logiciels. ....	20
<i>T</i>	
tangible	
Un système tangible est une interface qui relie le monde physique et numérique, en permettant de manipuler des objets réels pour interagir avec des données ou des commandes virtuelles. ....	4

## II) Résumé

Dans le cadre de ma deuxième année d'ingénierie à l'ESTIA, j'ai réalisé un stage de huit semaines durant l'été 2025 au sein de ESTIA Recherche, en collaboration académique avec l'École de l'air et de l'espace. Ce stage avait pour objectif principal de reproduire, au sein de l'ESTIA, un prototype développé initialement par Valentin Braud dans le cadre de sa thèse à l'École de l'air et de l'espace. La mise en place d'un tel dispositif vise à disposer localement d'un prototype fonctionnel, ouvrant la voie à de futures expérimentations communes, voire à des collaborations à distance entre les deux établissements.

My assignment involved several technical activities: prototyping, wiring, computer-aided design, programming, experimentation, as well as writing user, installation, and maintenance manuals. This work is expected to result in the delivery of a fully functional prototype accompanied by comprehensive documentation to ensure its sustainability.

Más allá de los resultados concretos, estas prácticas me permitieron desarrollar sólidas competencias prácticas, especialmente en programación, electrónica y cableado, así como familiarizarme con una amplia variedad de herramientas de prototipado. También fortalecieron la colaboración entre la ESTIA y la Escuela del Aire y del Espacio, en particular gracias al valioso apoyo de Valentin Braud a lo largo de todo el proyecto. Esta experiencia representó una inmersión enriquecedora en la investigación aplicada y una etapa decisiva en mi trayectoria como ingeniero.

### III) Sommaire

#### Table des matières

I)	Glossaire .....	1
II)	Résumé .....	2
III)	Sommaire .....	3
IV)	Contexte .....	4
V)	Centres de recherche .....	5
VI)	Mission du stage .....	6
1)	Contexte général de la mission .....	6
2)	Problématique et origine du projet .....	7
3)	Définition de la mission confiée .....	8
3.1)	Plan d'action.....	8
3.2)	Explication du prototype original .....	9
4)	Etat de l'art du domaine.....	16
5)	Méthodologie utilisée .....	18
6)	Déroulement de la mission .....	18
6.1)	Acquisition du matériel.....	18
6.2)	Création des pièces .....	20
6.3)	Partie électrique et électronique .....	26
6.4)	Programmation .....	30
7)	Rôle dans l'équipe projet .....	31
8)	Difficultés rencontrées et solutions apportées .....	32
8.1)	Problèmes de commande.....	32
8.2)	Problèmes liés à l'impression 3D .....	32

8.3) Problèmes électriques rencontrés.....	34
8.4) Problèmes de réservoirs .....	35
9) Bilan intermédiaire.....	36
VII) Conclusion et prise de recul .....	38
VIII) Bibliographie .....	39
IX) Annexes .....	40

## IV) Contexte

Ce stage avait pour objectif de reproduire, au sein de l'ESTIA, un prototype initialement conçu par Valentin Braud lors de sa thèse à l'École de l'air et de l'espace. Ce prototype **tangible**<sup>1</sup> est destiné à fournir des informations en temps réel sur la quantité de carburant présente dans le réservoir ainsi que sur la consommation instantanée d'un drone. Il constitue donc un outil essentiel pour améliorer la conscience de la situation dans un **environnement déporté**<sup>2</sup>. La mise en place de ce prototype à l'ESTIA devait permettre non seulement d'en disposer localement, mais aussi d'ouvrir la voie à de futures collaborations y compris à distance, entre les deux établissements partenaires.

Mon travail s'est déroulé au sein des locaux de l'ESTIA, plus précisément dans la Halle technologique, espace dédié aux projets expérimentaux et doté de beaucoup de matériels et d'outils de prototypage. J'ai ainsi pu bénéficier d'un environnement riche et stimulant, dans lequel j'ai réalisé un travail de conception, de câblage, de programmation et d'expérimentation. Tout au long du stage, j'ai également été accompagné par des enseignants-chercheurs de l'ESTIA, qui m'ont apporté conseils et orientations techniques lorsque cela était nécessaire.

Un accompagnement particulier m'a été fourni par Valentin Braud, concepteur du prototype original. Sa contribution a été essentielle pour m'assurer que je développais le projet dans la bonne direction. Nous avons notamment organisé des réunions hebdomadaires en visioconférence via Teams, qui permettaient de faire le point sur l'avancement du projet et de résoudre les problèmes.

---

<sup>1</sup> Un système **tangible** est une interface qui **relie le monde physique et numérique**, en permettant de **manipuler des objets réels** pour interagir avec des données ou des commandes virtuelles.

<sup>2</sup> Un **environnement déporté** est une situation où l'opérateur contrôle un système **à distance**, en se basant uniquement sur des **données et interfaces**.

Ma tutrice de stage, Mme COUTURE Nadine, était physiquement présente à l'ESTIA et m'a également accompagné tout au long du projet, en apportant principalement un soutien organisationnel et administratif.

Ces échanges réguliers ont représenté un véritable atout, en me garantissant un suivi rigoureux et en favorisant une collaboration efficace entre l'ESTIA et l'École de l'air et de l'espace.

Ainsi, ce stage permettait à l'ESTIA de disposer d'un prototype fonctionnel et documenté sur site, afin de renforcer ses capacités expérimentales et de développer ses collaborations scientifiques.

Pour l'École de l'air et de l'espace de bénéficier d'un relais technique au sein de l'ESTIA et accroître la portée de ses travaux de recherche.

Et pour moi d'appliquer et approfondir mes compétences techniques acquises durant ma formation, découvrir un environnement de recherche appliquée et apprendre à travailler en lien étroit avec des chercheurs et des enseignants.

Au fil de ce rapport, je présenterai tout d'abord le cadre institutionnel de mon stage, à travers une description de l'ESTIA et de sa structure de recherche et du Centre de Recherche de l'École de l'Air. Je détaillerai ensuite les missions qui m'ont été confiées, les méthodes mises en œuvre ainsi que les résultats obtenus. Enfin, je conclurai sur les apports professionnels et personnels d'un tel stage et je ferai une prise de recul sur la coopération entre les deux écoles et sur mon projet en général.

## V) Centres de recherche

L'ESTIA est une école d'ingénieurs située à Bidart, au cœur du Pays basque. Elle forme des ingénieurs généralistes capables d'évoluer dans des environnements technologiques complexes, notamment dans les domaines de la mécanique, de l'électronique, du numérique, de l'informatique et du management de l'innovation. Grâce à son implantation au sein de la Technopole Izarbel, l'ESTIA entretient des liens étroits avec un tissu industriel dynamique et des acteurs de la recherche et de l'innovation.

Afin de soutenir ces activités, l'école dispose d'une structure dédiée : ESTIA Recherche. Ce département est chargé de mener des projets de recherche appliquée et d'innovation, souvent en partenariat avec des entreprises, des laboratoires universitaires ou d'autres institutions académiques. Ses domaines d'expertise couvrent notamment : la robotique et les systèmes mécatroniques, les systèmes embarqués et l'électronique, l'intelligence artificielle et la science des données, le design et le prototypage avancé et la transition énergétique et l'industrie durable.

ESTIA Recherche s'appuie sur des infrastructures comme la Halle technologique, où sont réalisés des projets collaboratifs et expérimentaux. C'est dans ce cadre que s'est déroulé mon stage, bénéficiant d'un environnement riche en équipements, en matériel et en encadrement scientifique.

L'École de l'air et de l'espace, située sur la base aérienne 701 à Salon-de-Provence, est un établissement d'enseignement supérieur militaire français chargé de former les officiers de l'armée de l'air et de l'espace. Elle propose également des formations ouvertes à des étudiants civils dans des domaines scientifiques et technologiques liés à l'aéronautique et à l'espace. L'école dispose d'un Centre de recherche qui a pour mission de développer des projets innovants dans des domaines tels que : La propulsion aéronautique et spatiale, les systèmes embarqués et l'électronique de défense, la simulation et la modélisation et les technologies de l'énergie et de la combustion. C'est au sein de ce centre qu'a été conçu le prototype sur lequel s'appuyait mon stage.

L'École de l'air et de l'espace apporte une expertise pointue dans le domaine aéronautique et énergétique tandis que l'ESTIA fournit un environnement de prototypage et des compétences en ingénierie et industrialisation.

Ce partenariat crée un cadre idéal pour développer des projets concrets et innovants, à l'interface entre recherche académique et applications industrielles.

## VI) Mission du stage

### 1) Contexte général de la mission

Dans les systèmes de drones, l'opérateur pilote et supervise un aéronef à distance, ce qui en fait un environnement déporté. Aujourd'hui, les informations, comme le niveau de carburant ou la consommation instantanée, sont uniquement présentées via des interfaces graphiques. Cela augmente la charge cognitive et visuelle des opérateurs et complique la construction d'une conscience de la situation claire (Endsley, 1988).



Figure 1 Station-sol du REAPER (Air & Space Forces Magazine “MQ-9 Pilots Learn To Take Off and Land Via Satellite in ACE Push by David Roza”)

Le projet de ce stage visait à reproduire un prototype tangible permettant de représenter physiquement ces données critiques. Les interfaces tangibles transforment des informations numériques en objets physiques perceptibles (Ishii & Ullmer, 1997), ce qui favorise une interaction plus naturelle, réduit la **charge cognitive**<sup>3</sup> et améliore la réactivité. Dans ce contexte, rendre tangible le compteur de carburant et la mesure de combustion offre une solution innovante pour améliorer la performance et la sécurité des missions de drones.

## 2) Problématique et origine du projet

L'objectif principal de mon stage était de reproduire le prototype tangible conçu par Valentin Braud, destiné à fournir en temps réel des informations critiques sur la quantité de carburant et la consommation instantanée d'un drone. Ce prototype, développé initialement dans le cadre d'une thèse à l'École de l'air et de l'espace, devait être reproduit au sein de l'ESTIA afin de disposer d'un modèle fonctionnel permettant des expérimentations locales et de futures collaborations entre les deux écoles.

Cependant, la mission s'est révélée bien plus complexe qu'une simple duplication. Le projet s'inscrivait dans un contexte de recherche, sans plans détaillés ni documentation complète, ce qui m'a contraint à analyser minutieusement le prototype existant pour en comprendre le fonctionnement global et la logique interne. Une des principales difficultés provenait du fait que le concepteur original, Valentin Braud, ainsi que le prototype original, n'étaient pas

---

<sup>3</sup> La **charge cognitive** désigne la **quantité d'effort mental** nécessaire pour **traiter et comprendre des informations** afin de réaliser une tâche.

physiquement présents à l'ESTIA. L'accompagnement de Valentin se faisait à distance, via des appels et des réunions hebdomadaires. Bien que précieuses, ces interactions restaient parfois limitées et rendaient la résolution de certains problèmes moins efficace qu'un travail en présentiel.

Dans un premier temps, j'ai dû m'imprégner de la démarche initiale, en cherchant à comprendre les choix techniques faits par le concepteur. Cette phase d'appropriation a nécessité de me mettre à la place du créateur du prototype, de décoder ses solutions et d'interpréter ses intentions. Ce n'est qu'après cette étape que j'ai pu commencer à développer et intégrer les différentes sous-parties du prototype, en assurant la cohérence entre les aspects mécaniques, électroniques et logiciels.

Cette mission a ainsi soulevé la problématique suivante :

**« Comment reproduire un prototype de compteur de carburant tangible pour drone, en l'absence de plans détaillés et avec un accompagnement à distance, tout en assurant une intégration mécanique, électronique et logicielle cohérente et fidèle au modèle original ? »**

Ce projet a donc représenté un véritable travail d'ingénierie exploratoire, nécessitant à la fois des compétences techniques et une démarche analytique pour reconstruire un système complexe en s'appuyant sur des échanges à distance et sur ma propre capacité à comprendre et améliorer un concept qui n'était pas initialement le mien.

### 3) Définition de la mission confiée

#### 3.1) Plan d'action

Dans un premier temps, analyser le prototype existant afin de comprendre son fonctionnement global et la logique de conception. En s'appuyant sur des échanges réguliers avec Valentin Braud via des réunions à distance sur Microsoft Teams et sur la consultation de sa thèse, qui présente les bases théoriques et techniques du dispositif.

Identifier les sous-systèmes mécaniques, électroniques et logiciels ainsi que le rôle de chaque composant.

Établir la liste complète des composants et matériels nécessaires, en distinguant ceux à commander de ceux déjà disponibles dans la Halle technologique de l'ESTIA.

Pendant la période d'attente liée à la réception des pièces, fabriquer la structure mécanique par impression 3D, en choisissant soigneusement les matériaux, les tolérances et les paramètres de qualité d'impression.

Vérifier la conformité de l'assemblage mécanique avec le prototype original.

Étudier le schéma de câblage afin d'en comprendre les subtilités et de préparer l'intégration électrique.

À la réception des composants, réaliser des tests unitaires : câbler, programmer et vérifier individuellement chaque composant à l'aide de programmes de base sur Arduino pour en comprendre le fonctionnement.

Assemblage et création du système de contrôle de débit et d'acheminement de gaz dans le prototype

Procéder à l'assemblage final du prototype, en intégrant la mécanique, l'électronique et le câblage complet.

Effectuer les tests globaux grâce au logiciel développé par Valentin Braud, afin de valider la conformité fonctionnelle et technique du système.

Enfin, rédiger une documentation complète, comprenant un manuel d'utilisation, un manuel d'installation et un manuel de maintenance, afin de faciliter la prise en main du prototype et d'assurer sa pérennité dans le temps.

## 3.2) Explication du prototype original

Cette partie du rapport a pour objectif de décrire en détail le prototype original et de présenter ses différents sous-systèmes, afin de faciliter sa compréhension.

### 3.2.1) Schéma extérieur

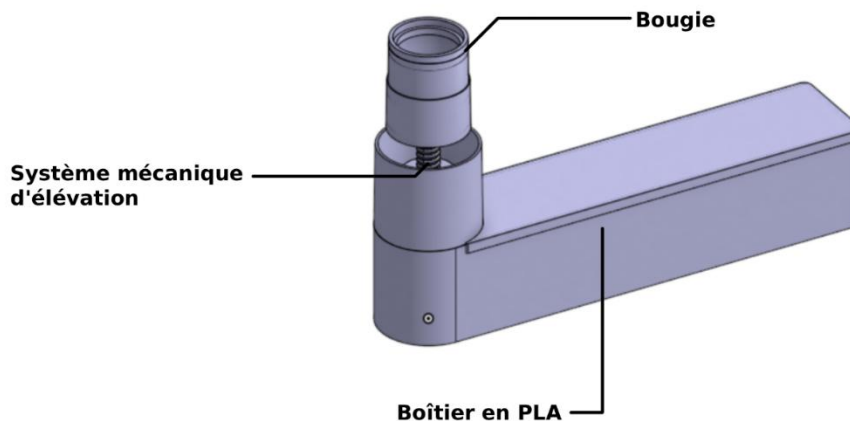


Figure 2 Représentation externe du prototype

À première vue, le prototype se compose de trois éléments principaux : un système mécanique, une bougie et un boîtier en **PLA**<sup>4</sup>, comme illustré dans la Figure 2.

### 3.2.2) Fonctions de la bougie

La bougie est composée de plusieurs pièces, principalement en PLA, avec une partie en aluminium pour résister à la chaleur de la flamme. Elle est conçue pour accueillir une flamme et permettre le passage de deux câbles d'allumage, nécessaires à la création d'une étincelle, ainsi qu'un tube en silicone pour acheminer le gaz jusqu'au sommet.



*Figure 3 Photo de la bougie en fonctionnement*

Cette bougie indique à l'opérateur la consommation instantanée de carburant du drone. Un sous-système ajuste le débit de gaz envoyé au sommet : plus le débit est élevé, plus la flamme est grande, ce qui correspond à une consommation de carburant plus importante, et inversement.

---

<sup>4</sup> Le **PLA** (acide polylactique) est un **plastique biodégradable** largement utilisé en impression 3D, apprécié pour sa **facilité d'impression** et sa **faible tendance à la déformation**.

### 3.2.3) Fonctions du système mécanique

Le système mécanique est constitué de vis et d'écrous en PLA. À sa base, un moteur pas à pas fait tourner les vis, tandis que la rotation des écrous est bloquée par des tiges en acier, non représentées ici. Ainsi, la rotation des vis se transforme en un mouvement vertical de translation de l'ensemble du système.

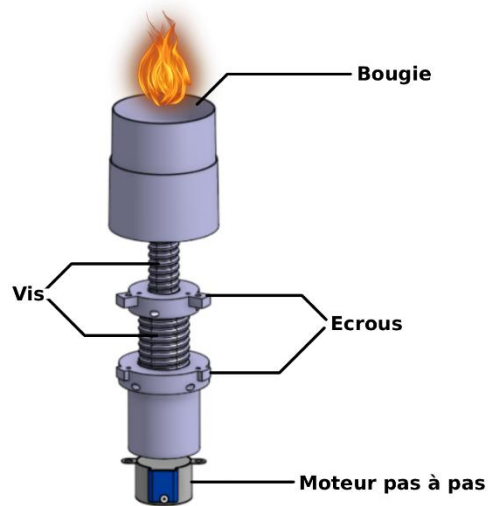


Figure 4 Système mécanique en position haute

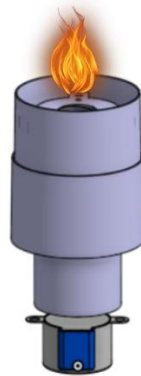
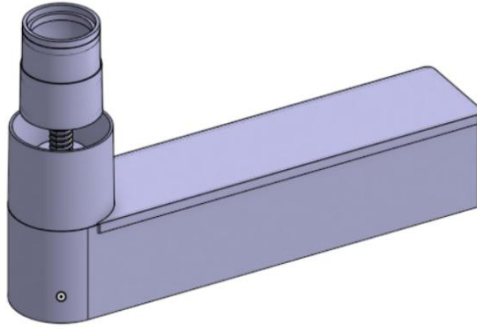
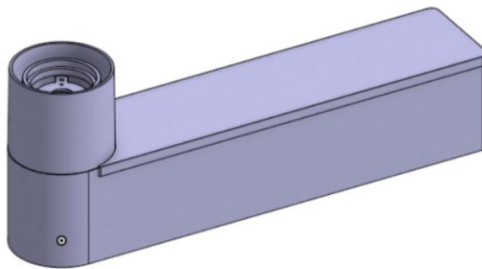


Figure 5 Système mécanique en position basse

Ce système ajuste la hauteur de la bougie d'environ 10 cm pour indiquer la quantité de carburant restante dans les réservoirs du drone. Plus la bougie est haute, plus le réservoir est plein, et inversement.



*Figure 6 Prototype en position haute*



*Figure 7 Prototype en position basse*

### 3.2.3) Systèmes internes

Le boîtier en PLA est muni d'un couvercle. Sous ce couvercle se trouvent plusieurs composants électriques, dont les fonctions seront détaillées par la suite. Les câbles électriques ne sont pas représentés ici afin de préserver la lisibilité du schéma.

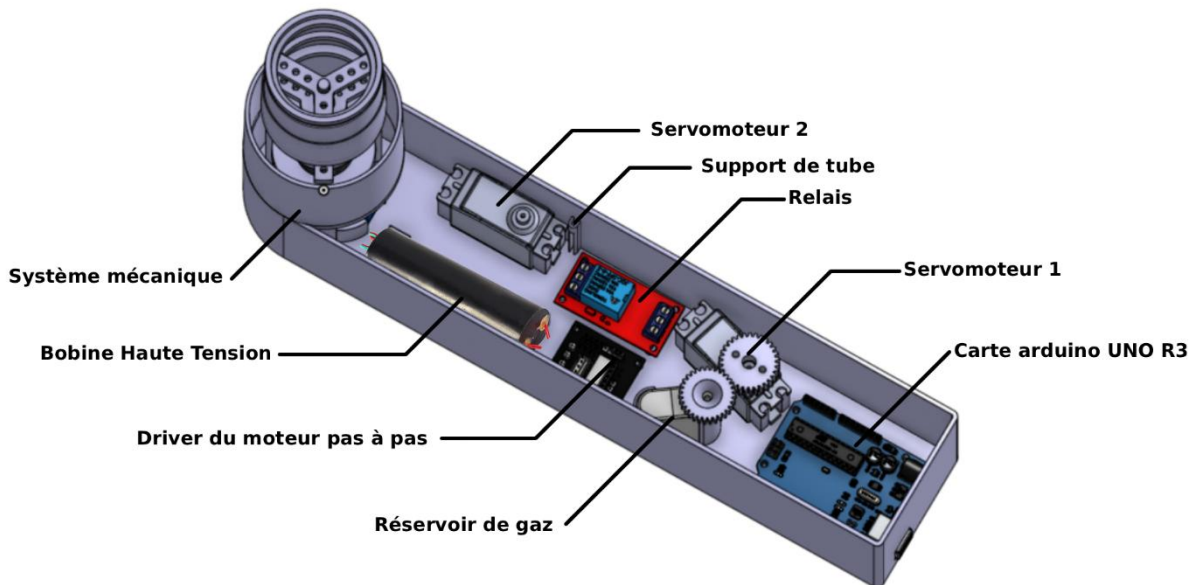


Figure 8 Représentation interne des systèmes du prototype

Dans un premier temps, le prototype est équipé d'une carte Arduino UNO R3 qui assure le contrôle de l'ensemble des composants électriques. Elle est alimentée en 5 volts via un câble USB relié à un ordinateur.

Le **driver**<sup>5</sup> du moteur pas à pas fait le lien entre la carte Arduino et le moteur. Il traduit les signaux de commande en impulsions électriques précises, permettant de contrôler la position, la vitesse et le sens de rotation du moteur, tout en évitant de surcharger l'Arduino.

L'ensemble composé de la bobine haute tension et du relais 5 V constitue le sous-système d'allumage, chargé de produire une étincelle au sommet de la bougie. Deux câbles, non représentés ici, partent de la bobine et traversent l'intégralité du système mécanique pour servir d'électrodes au sommet.

Lorsque le relais 5 V se ferme, il laisse passer du courant dans le primaire de la bobine, créant ainsi un champ magnétique. Quand il s'ouvre brusquement, ce champ s'effondre et génère une forte surtension dans le secondaire, provoquant une étincelle très brève entre les électrodes.

L'ensemble composé du réservoir de gaz, des servomoteurs 1 et 2, du support de tube et du tube en silicone (non représentés ici) forme le sous-système de contrôle du débit et d'acheminement du gaz, qui permet d'envoyer le gaz directement au sommet de la bougie.

<sup>5</sup> Un **driver de moteur pas à pas** est un composant qui **contrôle le moteur**, en gérant sa **vitesse**, sa **position** et son **sens de rotation** à partir des signaux envoyés par une carte comme l'Arduino.

Le réservoir de gaz a pour rôle de contenir du butane, de pouvoir être rempli à l'aide de bonbonnes et de libérer le gaz lorsqu'il est dévissé. Il résulte de l'assemblage de deux briquets différents :

- la partie principale provient d'un briquet DJEEP, modifié par un trou à sa base,
- dans lequel a été intégré le système de remplissage d'un briquet CLIPPER.

Ainsi, le réservoir combine les fonctions des deux briquets : remplissage pratique et contrôle du gaz.



*Figure 9 Partie inférieure du briquet avec système de remplissage*

Sa partie supérieure est équipée d'une vis collée à un engrenage. La rotation de cet engrenage, assurée par l'un des servomoteurs, ouvre plus ou moins la vis, permettant de réguler la quantité de gaz qui s'échappe.



*Figure 10 Vis du réservoir et engrenage*

Le servomoteur 1 est équipé d'un engrenage fixé à son axe, qui, lorsqu'il tourne, entraîne directement l'engrenage du réservoir auquel il est collé. Ce mécanisme permet de contrôler la rotation de la vis du réservoir, et donc de réguler le débit de gaz envoyé vers la bougie.

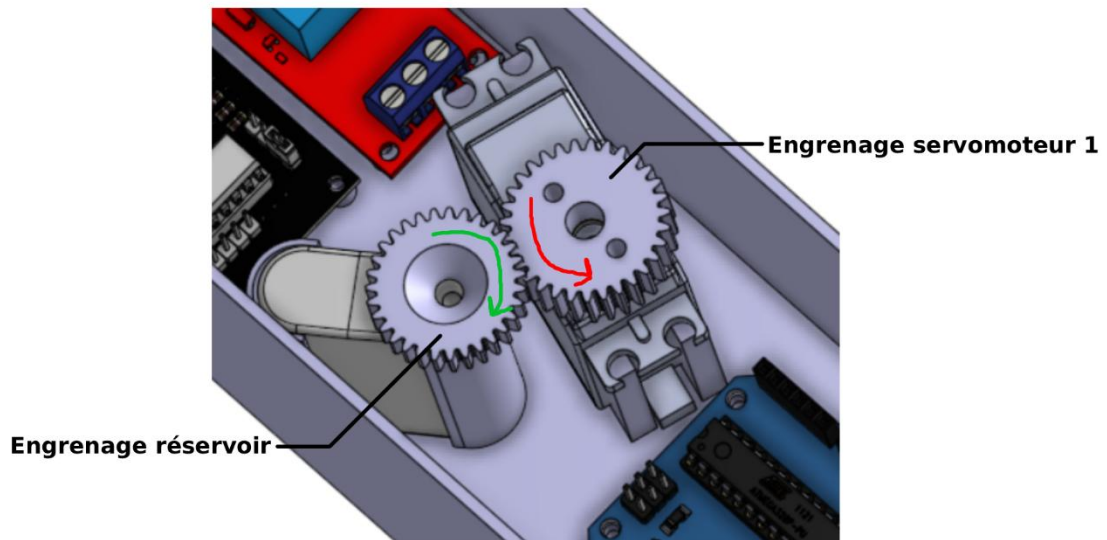


Figure 11 Représentation du système de débit de gaz

Le servomoteur 2 est placé à proximité du support de tube, dont la fonction est de maintenir le tube en silicone qui transporte le gaz. Lorsque le servomoteur 2 tourne, il touche le support de manière à pincer le tube, ce qui bloque totalement le passage du gaz. Ce système de pincement est utilisé pour éteindre la flamme en coupant l'alimentation en gaz.

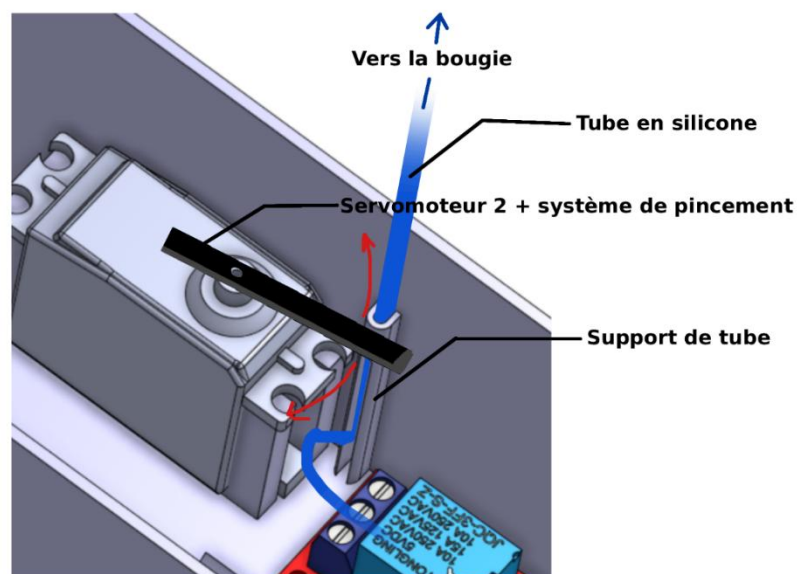


Figure 12 Représentation du système d'arrêt du gaz

Le tube en silicone permet d'acheminer le gaz depuis le sommet du réservoir jusqu'au sommet de la bougie. Il traverse le système mécanique de bas en haut et se termine près des électrodes, afin de permettre l'ignition du gaz lorsque l'étincelle est produite.

#### 4) Etat de l'art du domaine

J'ai choisi de centrer cet état de l'art sur la fabrication additive, car elle a occupé une place essentielle dans mon projet. Toutes les pièces mécaniques du prototype ont été créées grâce à ce procédé. Pour replacer ce choix dans un contexte plus large, il est intéressant de comparer l'impression 3D à d'autres techniques de fabrication traditionnelles ainsi qu'à différents matériaux utilisés dans le prototypage.

Procédé / Matériau	Principe	Avantages	Limites / Points de vigilance	Utilisation dans mon projet
<b>FDM</b> <sup>6</sup> / FFF (dépôt de filament fondu)	Dépôt couche par couche d'un filament thermoplastique fondu.	Peu coûteux, rapide, idéal pour prototypage et itérations fréquentes.	Précision moyenne, strates visibles, résistance limitée selon l'orientation des couches.	Procédé choisi, parfaitement adapté au prototypage rapide en laboratoire.
<b>SLA</b> <sup>7</sup> (impression résine)	Solidification d'une résine liquide par laser ou lumière UV.	Très haute précision, surface lisse et esthétique.	Post-traitement chimique obligatoire, résine fragile, coût élevé.	Non utilisé, non nécessaire pour les pièces fonctionnelles de ce projet.
Usinage <b>CNC</b> <sup>8</sup>	Retrait de matière par découpe à partir d'un bloc.	Précision dimensionnelle élevée, matériaux variés (métaux, plastiques).	Temps de fabrication plus long, gaspillage de matière, coût plus élevé.	Non retenu : moins flexible pour des pièces complexes et modifiables.

<sup>6</sup> **FDM (Fused Deposition Modeling)** : Procédé d'impression 3D qui dépose du plastique fondu couche par couche.

<sup>7</sup> **SLA (Stereolithography Apparatus)** : Procédé d'impression 3D qui solidifie une résine liquide avec un laser ou UV.

<sup>8</sup> **CNC (Computer Numerical Control)** : Procédé d'usinage qui **retire de la matière** à partir d'un bloc grâce à des machines commandées par ordinateur.

Injection plastique	Fabrication en série grâce à un moule injecté.	Production en grande série, excellent état de surface, pièces robustes.	Investissement initial très élevé (moule), pas adapté pour petites séries ou prototypes.	Non retenu, car trop coûteux et inadapté au prototypage
PLA (filament)	Thermoplastique biodégradable et rigide, facile à imprimer.	Peu de déformation (warping), large choix de couleurs, impression fiable.	Sensible à la chaleur, résistance mécanique limitée.	Matériau principal utilisé pour toutes les pièces imprimées.
PETG <sup>9</sup> (filament)	Thermoplastique plus résistant et flexible que le PLA.	Bon compromis rigidité / flexibilité, meilleure résistance aux chocs.	Légèrement plus difficile à imprimer, adhérence au plateau à surveiller.	Envisageable pour des pièces plus robustes, mais non utilisé ici.
ABS <sup>10</sup> (filament)	Thermoplastique résistant aux chocs et à la chaleur.	Très robuste mécaniquement.	Déformation importante (warping), nécessite enceinte chauffée et bonne ventilation.	Non retenu : impression trop complexe et risquée.

Tableau 1 Etat de l'art sur la fabrication additive et soustractive

Ce tableau montre que l'impression 3D FDM avec le PLA est la solution la plus adaptée pour un projet de prototypage rapide comme celui-ci. Comparée à l'usinage CNC ou à l'injection plastique, elle offre une grande flexibilité et des coûts réduits, au prix d'une précision et d'une résistance légèrement inférieures. Le choix du PLA s'explique par sa fiabilité d'impression et sa disponibilité, tandis que des matériaux comme le PETG ou l'ABS pourraient être envisagés pour des versions futures nécessitant une résistance accrue.

<sup>9</sup> **PETG (Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé)** : Plastique résistant et flexible, plus robuste que le PLA.

<sup>10</sup> **ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène)** : Plastique solide et résistant à la chaleur, mais difficile à imprimer.

## 5) Méthodologie utilisée

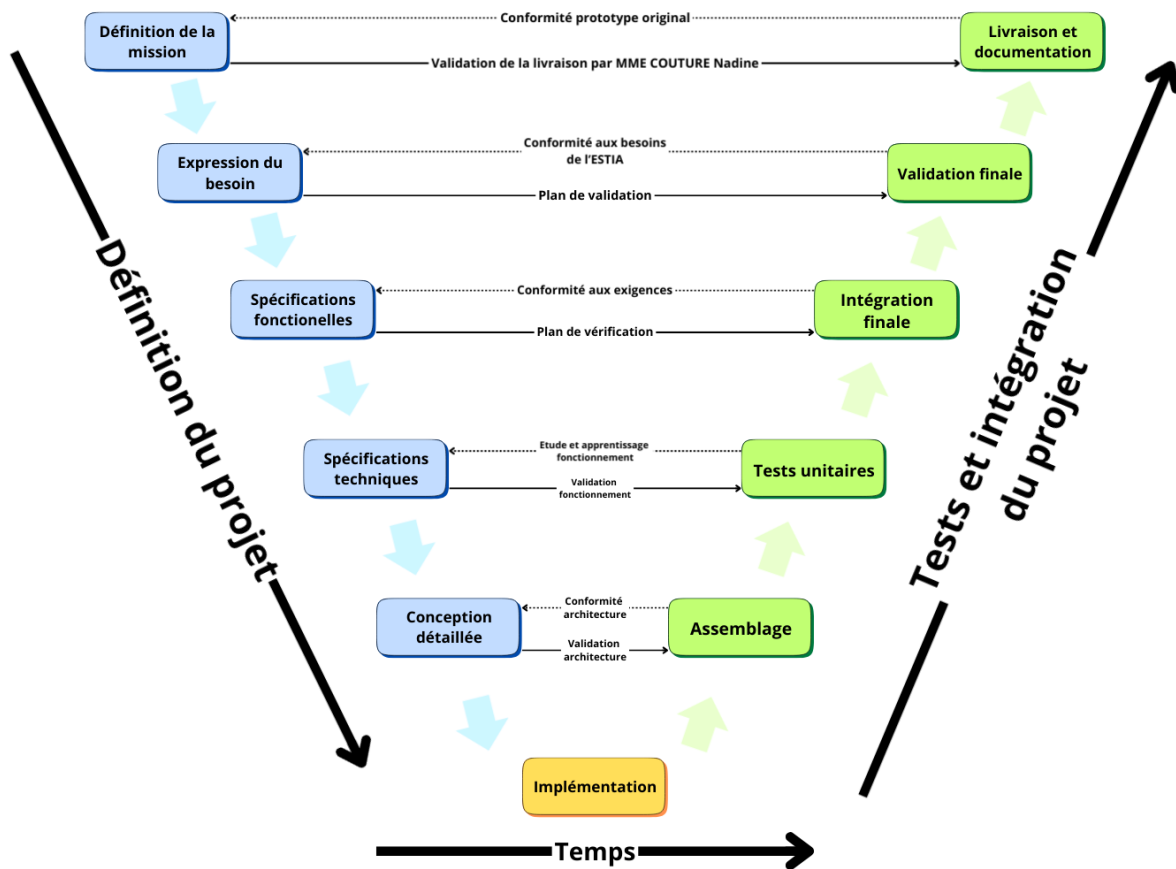


Figure 13 Cycle en V du projet

Le **cycle en V**<sup>11</sup> a été choisi car il offre une approche structurée, adaptée à la reproduction d'un prototype complexe, en permettant de lier chaque étape de conception à une phase de test et de validation correspondante, garantissant ainsi la fiabilité du résultat final.

## 6) Déroulement de la mission

### 6.1) Acquisition du matériel

#### 6.1.1) Commande des composants

Dans un premier temps, l'objectif principal a été de déterminer rigoureusement la liste des composants nécessaires à la reproduction du prototype. Pour cela, j'ai commencé par échanger

<sup>11</sup> Le **diagramme en V** est un modèle de projet qui relie la **conception** d'un système à sa **validation** par des tests.

avec Valentin Braud, le concepteur du prototype original, afin d'identifier les éléments qu'il avait utilisés dans sa réalisation. Ces discussions se sont accompagnées d'une lecture attentive de sa thèse, qui constituait une source d'informations précieuse pour extraire des données techniques et repérer les références des matériels intégrés au prototype.

Afin de lever certaines ambiguïtés, j'ai également demandé à Valentin des photographies détaillées de certaines parties du système, ce qui m'a permis de mieux comprendre l'architecture globale du prototype et de ne pas oublier de composants critiques lors de la commande.

Une fois cette première liste préliminaire établie, j'ai procédé à une vérification du stock disponible dans la Halle technologique de l'ESTIA. Cette étape avait pour but d'éviter des achats inutiles en réutilisant du matériel déjà disponible sur place. Ce travail de comparaison m'a finalement permis d'extraire la liste définitive des composants à commander, en ne conservant que les éléments absents du stock local.

Nom	Prix (TTC)	Frais de port	Quantité	Fournisseur	Liens	Total	Hall Tech.
Arduino UNO	0,00 €		1	ESTIA		0,00 €	Oui
Relais 5V	0,00 €		1	ESTIA		0,00 €	Oui
Capteur de p	0,00 €		1	ESTIA		0,00 €	Oui
Servomoteur	28,95 €	4,50 €	2	Gotronic	<a href="#">Lien</a>	62,40 €	Non
Moteur 28BYJ	7,90 €		1	Gotronic	<a href="#">Lien</a>	12,40 €	Non
800-1000 KV	15,79 €		1	Amazon	<a href="#">Lien</a>	15,79 €	Non
Capillaire 3m	0,00 €		1	ESTIA		0,00 €	Oui
Djeep Briquet	3,90 €	5,80 €	5	Amazon	<a href="#">Lien</a>	25,30 €	Non
Filament PLA	0,00 €		1	ESTIA		0,00 €	Oui
Assortiment c	0,00 €		1	ESTIA		0,00 €	Oui
3 recharge de	16,78 €		1	Amazon	<a href="#">Lien</a>	16,78 €	Non
<b>Total</b>							
Somme globale						132,67 €	

Tableau 2 Liste des composants à se procurer

### 6.1.2) Gestion des commandes et contraintes administratives

Pour ce projet, il était recommandé de privilégier les fournisseurs spécialisés tels que GoTronic, Farnell ou RS Components, qui proposent des composants fiables et adaptés aux projets techniques. Cependant, étant donné que le travail s'inscrivait dans une phase de prototypage, il a parfois été nécessaire de commander certains éléments sur des sites plus généralistes, comme Amazon, notamment pour des pièces spécifiques difficiles à trouver sur les sites spécialisés. C'était le cas par exemple pour l'achat des briquets, du tube en silicone ou encore des composants électriques particuliers, tels que la bobine haute tension.

Dans le cadre d'un stage de recherche, chaque dépense devait être rigoureusement tracée afin de permettre un remboursement par le service comptabilité de l'ESTIA. Pour cela, il était indispensable d'obtenir une facture pour chaque commande effectuée, faute de quoi le remboursement pouvait être refusé. Cette contrainte impliquait d'attendre l'expédition des commandes, puisque la facture n'était généralement disponible qu'une fois l'envoi effectué. Une fois la facture reçue, elle devait être transmise à Madame Nadine Couture, ma tutrice de stage, qui supervisait l'ensemble des achats réalisés.

Une autre contrainte importante concernait les délais de livraison, très variables selon les sites. Certaines commandes pouvaient être livrées rapidement, tandis que d'autres nécessitaient plusieurs jours, voire semaines, ce qui pouvait impacter directement l'avancement du projet. De plus, pendant les périodes de vacances, les services de livraison pouvaient être indisponibles sur certains sites.

Enfin, pour finaliser le processus de remboursement, il était également nécessaire de conserver soigneusement chaque bon de livraison associé à chaque colis. Les factures et les bons de livraison constituaient la base documentaire indispensable pour garantir la bonne gestion administrative du projet.

En résumé, la gestion des commandes dans un projet de ce type doit être menée avec rigueur. Il est essentiel de prendre en compte les délais de livraison, les contraintes administratives et la traçabilité des dépenses, car l'avancement du projet dépend étroitement de la disponibilité des composants commandés.

## 6.2) Création des pièces

### 6.2.1) Impression 3D et tolérances mécaniques

Après réception de tous les modèles 3D au format **STEP**<sup>12</sup> envoyés par Valentin Braud, j'ai commencé par effectuer un travail de modification sur certaines pièces afin d'optimiser leur conception pour l'impression et leur futur assemblage mécanique. Une fois les fichiers finalisés, je les ai transférés sur un ordinateur relié aux imprimantes 3D via le logiciel **Bambu Lab Studio**<sup>13</sup>, qui permet de préparer les impressions, configurer les paramètres et superviser le bon déroulement de l'impression en temps réel.

---

<sup>12</sup> Le **format STEP** est un **format de fichier 3D standardisé** utilisé pour **échanger des modèles CAO** entre différents logiciels.

<sup>13</sup> **Bambu Lab Studio** est un **logiciel de tranchage (slicer)** qui prépare les modèles 3D pour l'**impression**, en générant les instructions nécessaires pour les imprimantes Bambu Lab.

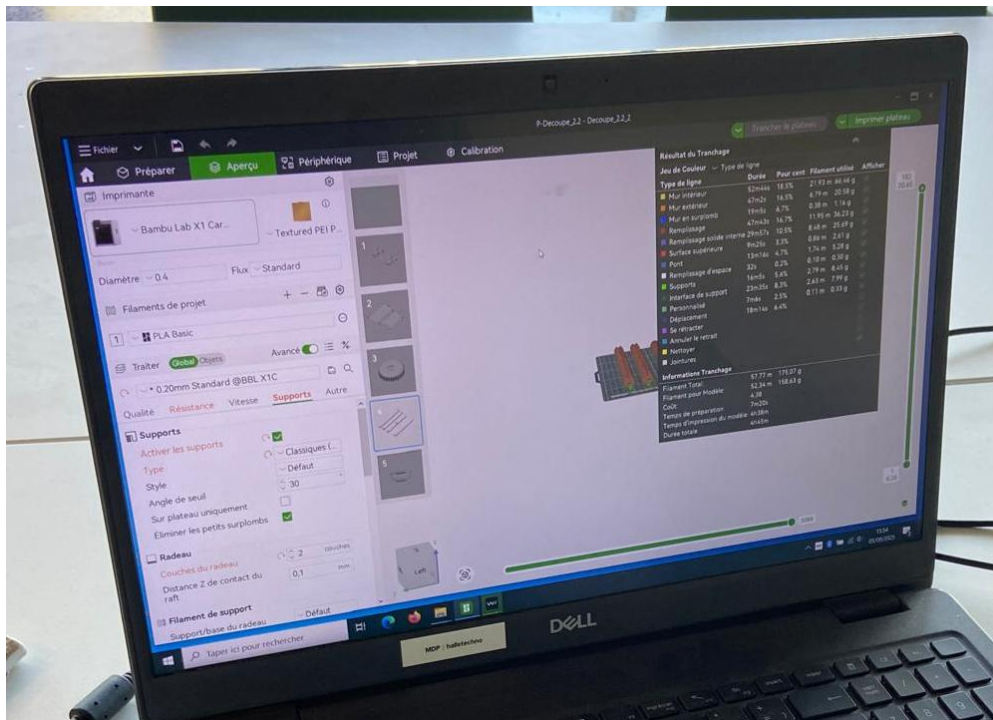


Figure 14 Interface de Bambu Lab Studio

Lors de la préparation, il était essentiel de paramétrer chaque impression de manière optimale. Les modèles avaient été conçus pour limiter l'usage de supports, ce qui réduit le temps d'impression et facilite le **post-traitement**<sup>14</sup>. Pour les pièces comportant des ouvertures ou des trous, des formes en arche avaient été intégrées. Ce choix de conception est une technique couramment utilisée en impression 3D : la forme en arche permet de soutenir le filament couche après couche, évitant ainsi qu'il ne s'effondre dans le vide, ce qui aurait nécessité des supports supplémentaires.

Malgré cette optimisation, j'ai systématiquement ajouté des supports à la base des pièces pour assurer une bonne adhésion au plateau et faciliter le décrochage après impression.

Pour obtenir une précision élevée, j'ai privilégié l'imprimante Bambu X1 plutôt que la Bambu A1, car elle offre une meilleure gestion des détails fins, une précision dimensionnelle supérieure et une vitesse d'impression plus élevée, ce qui est indispensable pour des pièces mécaniques devant s'assembler avec un faible **jeu fonctionnel**<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> Le **post-traitement** désigne l'ensemble des **opérations effectuées après une impression 3D**, comme le ponçage, le retrait des supports ou l'assemblage, pour **améliorer la qualité et la fonctionnalité** des pièces.

<sup>15</sup> Le **jeu fonctionnel** est le **petit espace prévu entre deux pièces en mouvement** pour éviter les frottements, assurer un bon fonctionnement et faciliter l'assemblage.



Figure 15 Photographie Bambu Lab X1

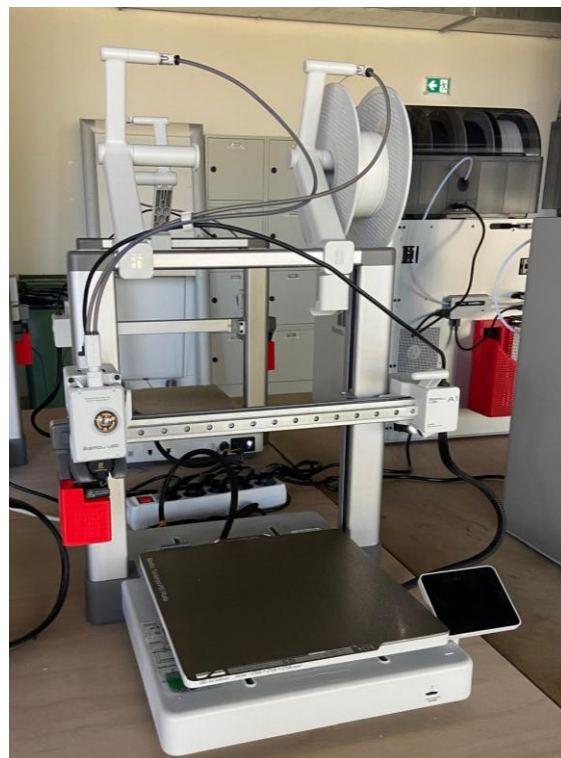


Figure 16 Photographie Bambu Lab A1

Une réflexion particulière a été menée sur les traces de jointure. Elles marquent l'endroit où l'imprimante commence et termine chaque couche, j'ai parfois opté pour une disposition aléatoire. Cette approche évite d'avoir une ligne visible concentrée sur une zone précise et facilite le ponçage ultérieur, ce qui améliore à la fois l'esthétique et le fonctionnement des pièces mécaniques.

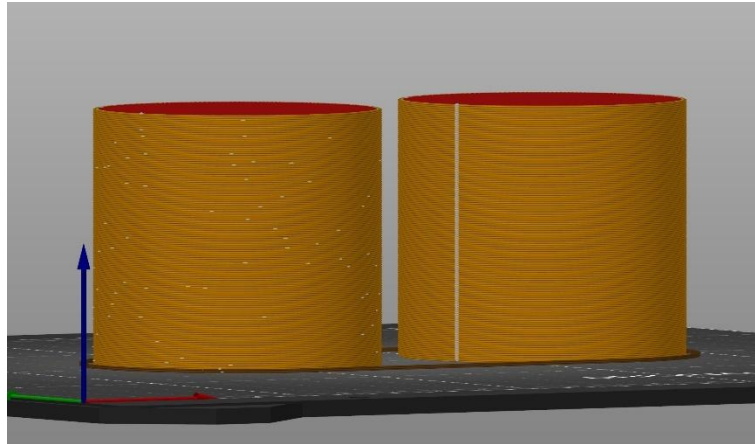


Figure 17 Comparaison entre jointure aléatoire (gauche) et jointure linéaire (droite) ([help.prusa3d.com](http://help.prusa3d.com) "Position de la jointure")

Pour le choix du matériau, j'ai opté pour le PLA plutôt que l'ABS. Le PLA réduit le risque de déformation ou **warping**<sup>16</sup> et ne nécessite pas d'enceinte chauffée, contrairement à l'ABS. Il est plus facile à imprimer, ce qui diminue les risques d'échec lors des impressions longues. Il était disponible en grande quantité dans la Halle technologique, avec un large choix de couleurs, ce qui facilitait l'identification des différentes pièces du prototype.



Figure 18 Photo de warping ([printer-box.com](http://printer-box.com) "PETG et décollement (warping)")

---

<sup>16</sup> Le warping en impression 3D est un défaut qui se produit lorsque les bords d'une pièce se soulèvent du plateau pendant l'impression.

Enfin, un point clé de cette étape a été la gestion du temps d'impression. J'ai choisi de fractionner les impressions en plusieurs séries, plutôt que de lancer des impressions très volumineuses, afin de limiter les risques et le gaspillage. En cas d'erreur de conception ou de panne d'imprimante, cela permettait de réduire les pertes de temps et de matériau. Cette approche a également facilité l'identification rapide d'éventuels défauts sur une pièce avant de lancer la production des suivantes.

Pour finir, j'ai porté une attention particulière aux jeux fonctionnels nécessaires pour certaines pièces en mouvement, comme celles impliquant des translations ou rotations. Un ajustement trop serré aurait entraîné des blocages mécaniques, tandis qu'un jeu excessif aurait réduit la précision globale du système.

### 6.2.2) Post-traitement

Toutes les pièces imprimées ont été soumises à un post-traitement systématique, une étape indispensable pour garantir la qualité finale et la fiabilité mécanique du prototype.

- Ponçage : Avant tout collage ou assemblage, chaque pièce a été soigneusement poncée afin d'éliminer les résidus de filament, d'améliorer l'esthétique et de garantir des ajustements précis lors des montages.



*Figure 19 Exemple d'un écrou poncé*

- Retrait des supports : Certains supports ont été retirés manuellement à l'aide d'une pince de précision. Lorsque des supports étaient plus difficiles à retirer, j'ai utilisé des outils fins pour éviter d'endommager la pièce.

- Insertion de pièces métalliques : Certaines pièces nécessitent l'ajout d'éléments métalliques, tels que des vis, qui ont été chauffés légèrement avant d'être emboîtés dans le PLA. Ce procédé permet d'obtenir un ancrage solide et durable sans fissurer la pièce plastique.



*Figure 20 Incrustation de la vis en métal dans un engrenage*

Ce travail minutieux a permis d'obtenir des pièces propres, robustes et prêtes à être intégrées dans l'assemblage mécanique final, tout en réduisant les risques de dysfonctionnement liés à des bavures ou des ajustements imprécis.



*Figure 21 Exemple d'un assemblage de précision comprenant plusieurs pièces différentes*



*Figure 22 Impression complète du prototype*

## 6.3) Partie électrique et électronique

### 6.3.1) Câblage et test des composants

La réalisation du câblage électronique a représenté une étape cruciale du projet, car elle conditionnait le fonctionnement global du prototype. Dès le départ, j'ai dû faire face à une contrainte importante : dans le cadre de ce projet de recherche, je ne disposais pas de plans détaillés ni de schéma électronique complet, uniquement d'un schéma fait main fourni par Valentin Braud. Ce document servait de référence principale, mais nécessitait une interprétation approfondie pour en comprendre la logique et la structure.

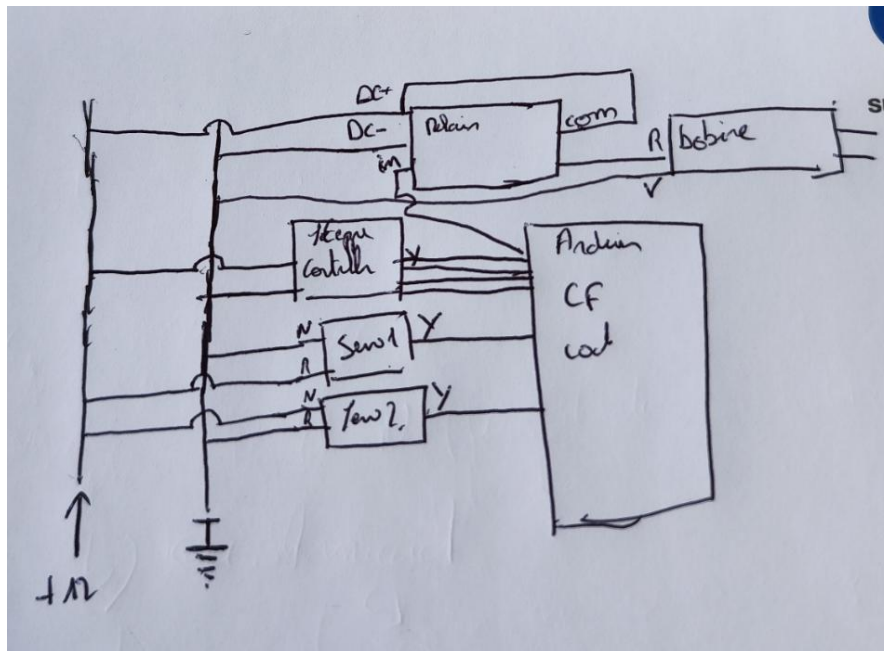


Figure 23 Schéma fourni par Valentin Braud

Pour progresser méthodiquement et limiter les risques de détérioration des composants, j'ai décidé de tester chaque élément individuellement avant d'entreprendre un câblage complet. Cette approche servait à comprendre le fonctionnement de chaque composant et sa manière d'interagir avec l'Arduino et l'alimentation. Et aussi de vérifier l'état des composants fraîchement commandés, afin de s'assurer qu'ils étaient en parfait état de marche avant leur intégration dans le système final.

J'ai donc isolé chaque composant et étudié sa fiche technique afin de déterminer la tension (Voltage) et le courant (Ampérage) nécessaires pour l'alimenter correctement. Cela m'a permis d'éviter tout risque de surchauffe ou de destruction des composants. Par exemple, pour un servomoteur Hitec HS485HB, la fiche technique indique une alimentation optimale à 6 V pour un courant d'environ 1,5 A si l'on souhaite faire fonctionner uniquement ce composant.

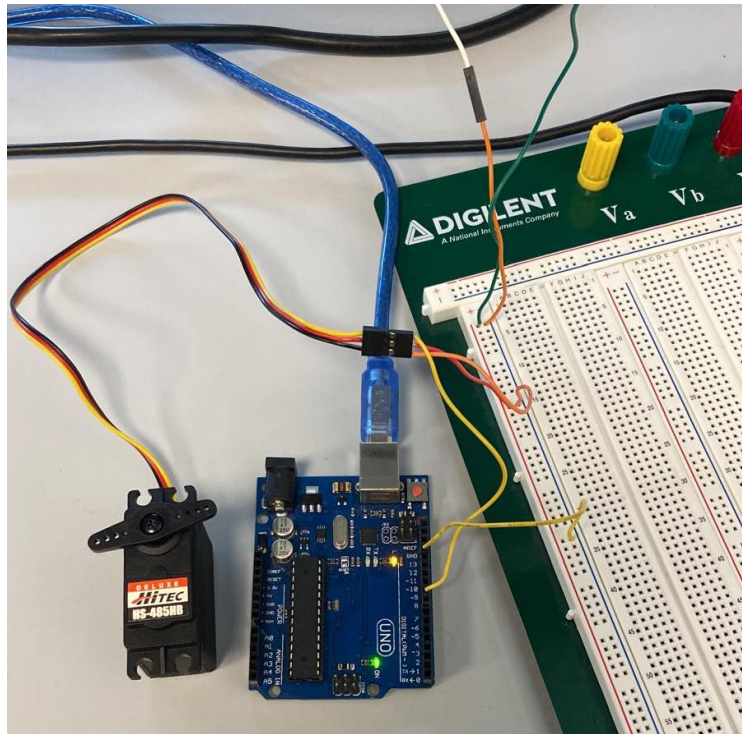


Figure 24 Câblage individuel d'un servomoteur

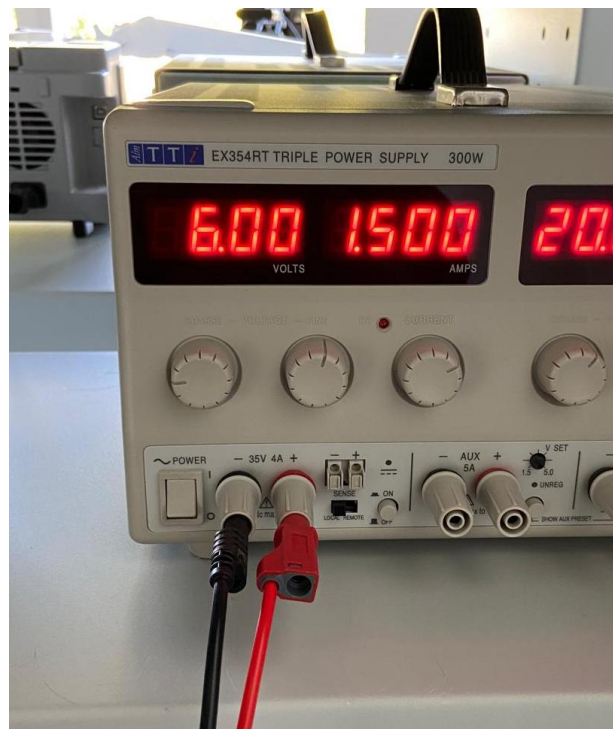
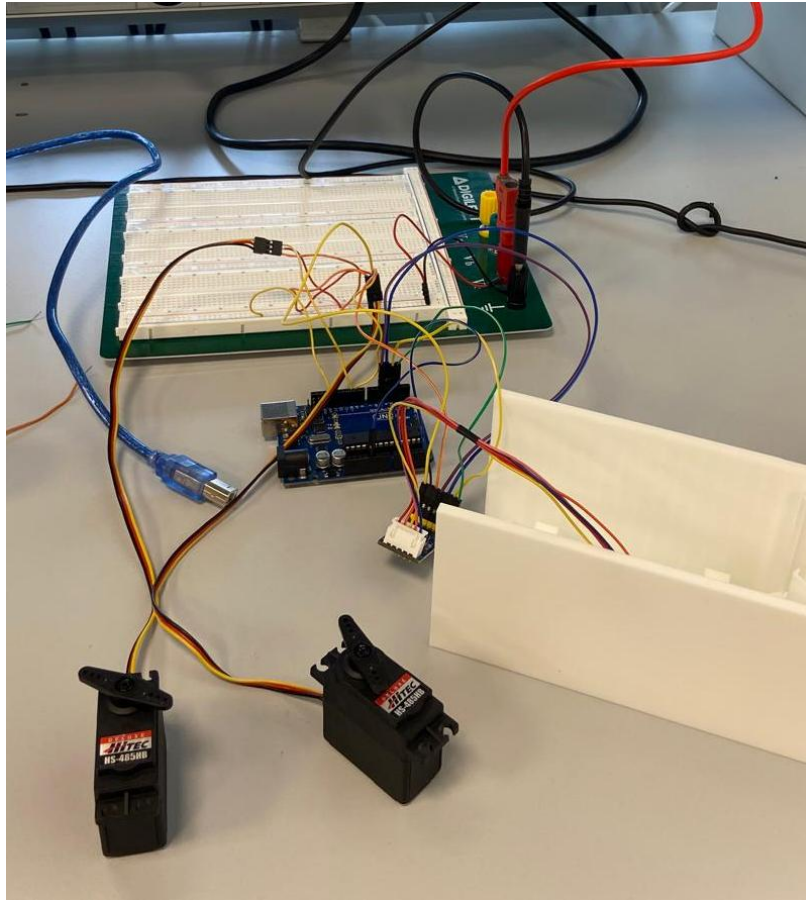


Figure 25 Alimentation réglée pour le test unitaire d'un servomoteur

À l'aide d'une alimentation de laboratoire réglable, j'ai donc alimenté chaque élément en respectant ces paramètres, tout en le connectant à l'Arduino pour vérifier la communication et le contrôle. Une fois que tous les tests unitaires ont été validés, j'ai entrepris un premier câblage

global sur une **breadboard**<sup>17</sup>, ce qui m'a permis de connecter simultanément tous les composants et d'évaluer leur compatibilité en fonctionnement simultané.



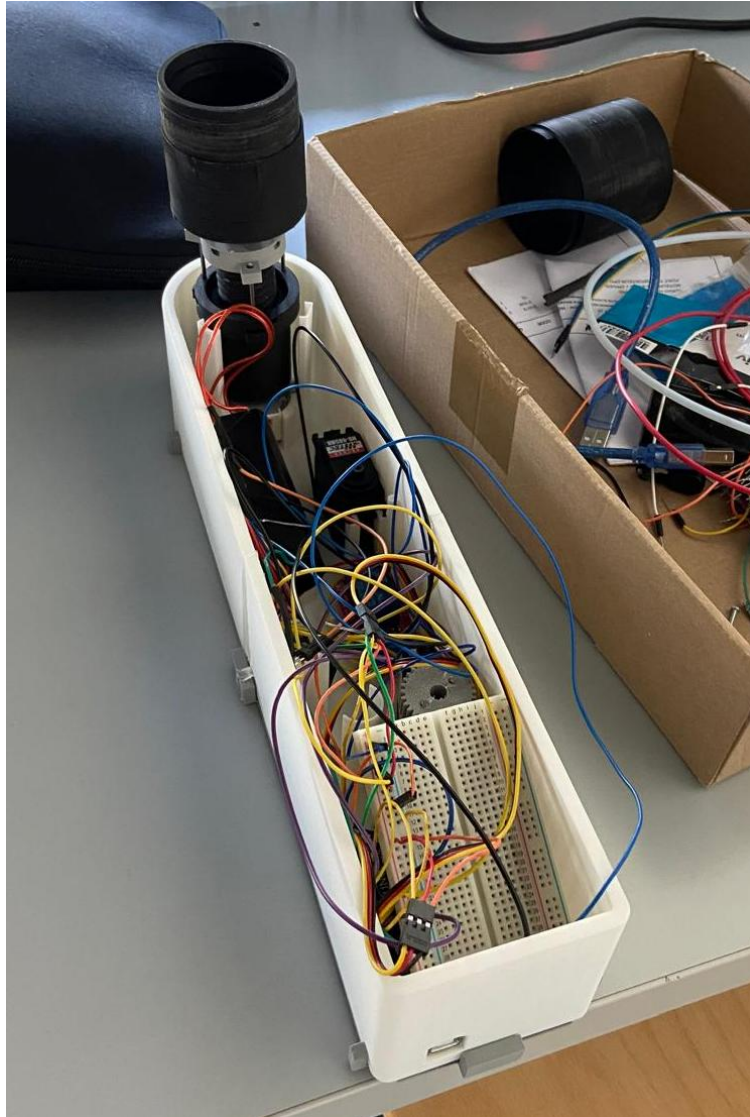
*Figure 26 Câblage de plusieurs composants sur la breadboard*

Ces tests ont montré que le système réagissait correctement, ce qui m'a permis de passer à l'étape suivante : intégrer l'ensemble du circuit dans le support imprimé en 3D. Pour cela, j'ai dû trouver une breadboard dont les dimensions correspondaient à l'espace disponible dans le boîtier, car j'avais fait le choix de ne pas utiliser de carte de soudure, préférant une breadboard afin de faciliter les ajustements et modifications futures.

Après plusieurs essais, j'ai réussi à intégrer l'ensemble des composants, servomoteurs, moteur pas à pas, cartes électroniques et câblages dans le boîtier imprimé en 3D. À ce stade, tous les éléments semblaient fonctionner correctement, à la fois via l'alimentation de laboratoire et via la connexion à l'Arduino relié à l'ordinateur.

---

<sup>17</sup> Une **breadboard** est une **plaque de prototypage** qui permet de **connecter des composants électroniques sans soudure**, facilitant la création et le test de circuits temporaires.



*Figure 27 Intégration de tous les composants électroniques et électriques*

Cette première intégration a constitué une étape clé, car elle validait la cohérence générale du système électronique avant le lancement des tests complets et du pilotage par le logiciel développé par Valentin Braud.

## 6.4) Programmation

### 6.3.1) Programmation individuelle des composants

À ce stade du projet, l'intégration finale du prototype n'était pas encore possible, car certaines pièces essentielles, notamment celles permettant l'allumage de la bougie, n'avaient pas encore été reçues. Sans cette fonction clé, il m'était impossible d'utiliser le logiciel développé

par Valentin Braud, et donc de vérifier si le programme fourni était pleinement fonctionnel ou nécessitait des ajustements.

Cependant, j'ai tout de même pu travailler sur la programmation de la carte Arduino lors de la phase de tests individuels des composants. Pour m'aider, je me suis appuyé sur les fiches techniques des différents éléments, qui contiennent souvent des exemples de codes Arduino réutilisables. Cela m'a permis de me familiariser avec la carte Arduino, de comprendre le fonctionnement de chaque port et de réaliser les premiers essais de commande des composants.

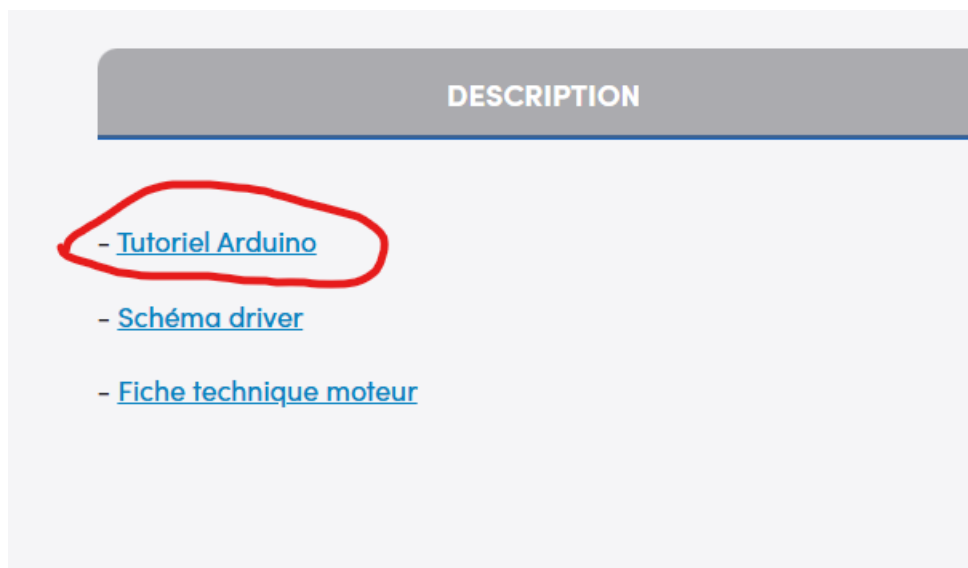


Figure 28 Ressources disponibles sur gotronic

Ces tests m'ont amené à adapter certains codes afin d'obtenir le comportement attendu. Par exemple, pour le système bobine + relais, il a été nécessaire de régler précisément les valeurs dans le programme pour que l'étincelle générée par la bobine ne dure qu'une fraction de seconde.

Cette phase a donc constitué une première approche de la programmation du prototype, me préparant à l'étape suivante où le logiciel global pourra être testé dès que l'intégration finale du système sera terminée.

## 7) Rôle dans l'équipe projet

Tout au long du stage, j'ai travaillé de manière autonome sur la réalisation des différentes étapes techniques du projet, de la conception à l'intégration des composants. Cette autonomie m'a

permis de développer mes compétences et de prendre des décisions techniques en accord avec les objectifs fixés.

Cependant, j'ai bénéficié de l'appui ponctuel de Valentin Braud, concepteur du prototype original qui a joué un rôle essentiel en répondant à mes interrogations et en me guidant dans la compréhension des solutions techniques qu'il avait mises en place lors de la première version du système. Ainsi que de Madame Nadine Couture, ma tutrice de stage qui m'a apporté un encadrement méthodologique et organisationnel, notamment pour la gestion administrative et la planification des différentes étapes.

Enfin, je tiens à souligner l'importance du rôle des gérants de la Halle technologique, qui m'ont apporté une aide précieuse pour résoudre des problèmes techniques liés aux outils du laboratoire, en particulier les imprimantes 3D. Leur expertise a été déterminante pour assurer le bon déroulement du projet.

Ainsi, même si la majeure partie du travail a été menée en autonomie, ce projet s'est appuyé sur une collaboration efficace avec différents membres de l'équipe, ce qui a contribué à la réussite des différentes phases de développement.

## 8) Difficultés rencontrées et solutions apportées

### 8.1) Problèmes de commande

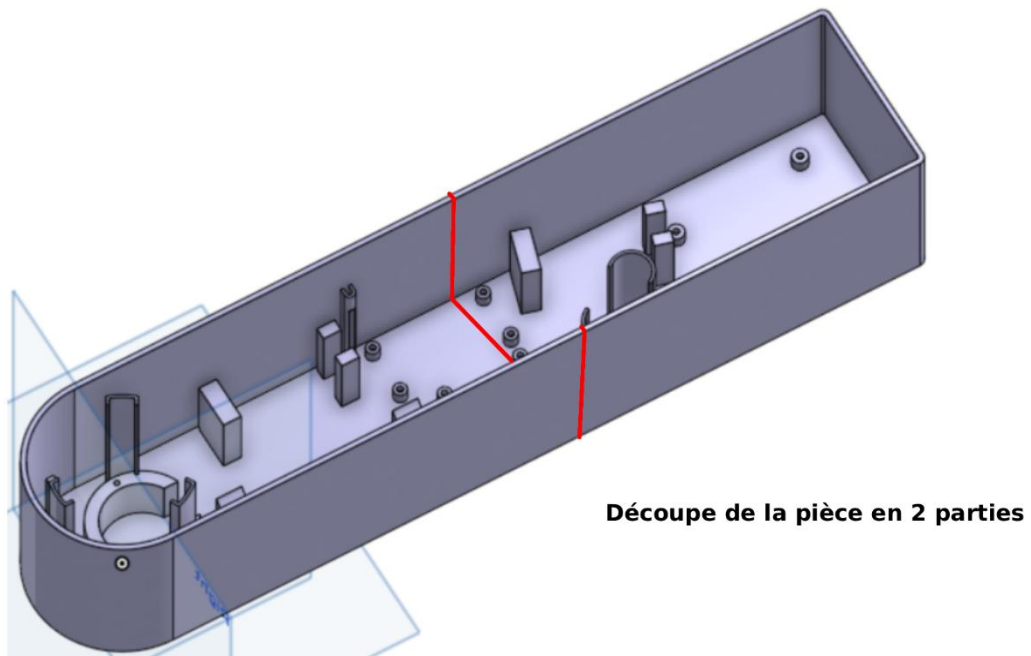
Lors de la commande de certains composants essentiels sur le site GoTronic, j'ai rencontré un contretemps qui a retardé l'avancement du projet. Initialement, je pensais que la commande avait été validée et expédiée, mais quelques jours plus tard, j'ai reçu un e-mail indiquant que l'expédition ne pouvait pas avoir lieu en raison de la période de vacances scolaires. Le site précisait que la livraison n'était possible que si la commande était clairement identifiée comme étant destinée à un projet professionnel.

Ce malentendu a entraîné une perte de plusieurs jours, durant lesquels les pièces manquantes bloquaient certaines étapes du projet. J'ai finalement résolu ce problème en contactant directement le service client de GoTronic et en leur confirmant que la commande était bien liée à un projet de recherche au sein de l'ESTIA. Suite à cet échange, la commande a été validée et expédiée, permettant de reprendre le déroulement du projet sans autres retards majeurs.

### 8.2) Problèmes liés à l'impression 3D

La phase d'impression 3D a été marquée par plusieurs difficultés techniques qui ont eu un impact direct sur le temps de production et la qualité des pièces obtenues.

Le premier problème concernait la taille des pièces à imprimer. Valentin disposait initialement d'une imprimante avec un plateau d'impression plus grand que ceux disponibles à l'ESTIA. Par conséquent, certaines pièces du prototype dépassaient les dimensions maximales de nos imprimantes. Pour résoudre ce problème, j'ai dû scinder ces pièces en deux parties distinctes, puis les imprimer séparément. Cette adaptation nécessitait un travail supplémentaire, car les pièces d'origine n'étaient pas conçues pour être découpées. J'ai donc dû ajouter des supports de collage, c'est-à-dire des zones spécifiques permettant d'appliquer la colle et d'assurer une liaison mécanique robuste entre les deux parties une fois assemblées. Après impression, les pièces ont été soigneusement ajustées et collées pour retrouver la solidité et la géométrie initiales du modèle.



*Figure 29 Découpe du boîtier avant impression 3D*

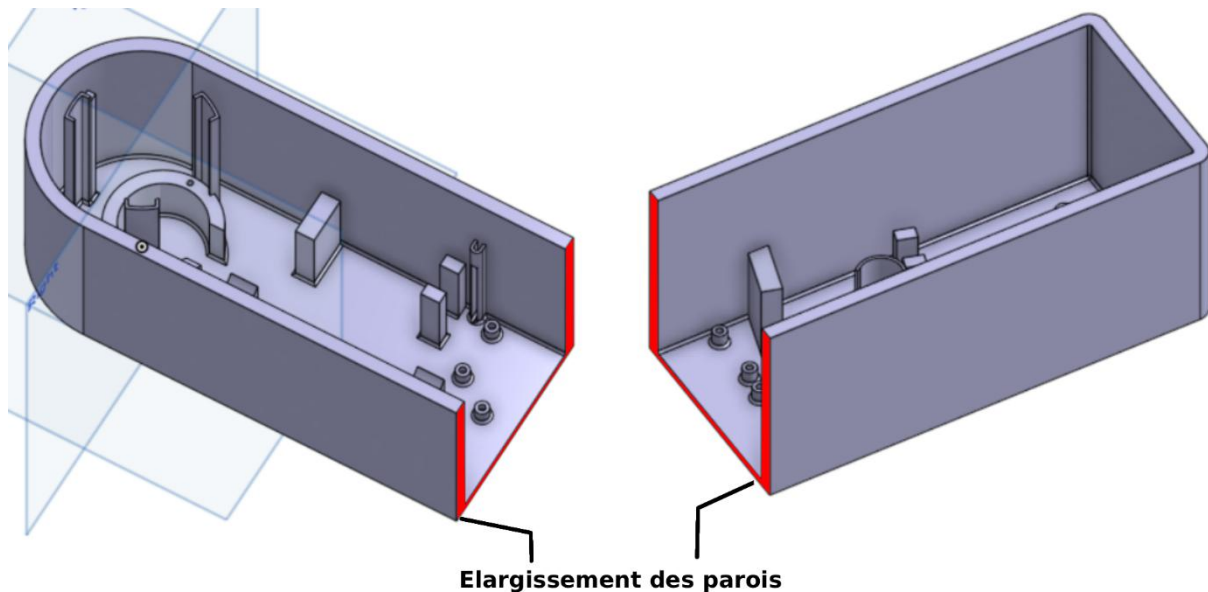


Figure 30 Boîtier après découpe et élargissement des parois

Un autre problème récurrent était lié à des pannes des imprimantes Bambu Lab, principalement au niveau de l'extrusion du PLA par la buse. Ces dysfonctionnements pouvaient provoquer l'arrêt complet de l'impression ou bien produire des pièces incomplètes et de mauvaise qualité, totalement infidèles au modèle conçu. Ces incidents se sont traduits par une perte de temps importante, car certaines impressions longues de plusieurs heures devaient être reprises intégralement.

Après une phase d'investigation, nous avons identifié que la cause probable de ces problèmes venait de bobines de PLA trop anciennes. Avec le temps et une mauvaise conservation, le filament peut absorber l'humidité ou voir ses caractéristiques mécaniques se dégrader, ce qui perturbe l'extrusion et entraîne des impressions défectueuses. Pour résoudre ce problème, de nouvelles bobines de PLA ont été achetées. Dès leur utilisation, la qualité des impressions s'est nettement améliorée et les défaillances ont quasiment disparu.

À la fin de mon stage, ces problèmes avaient été complètement résolus, me permettant de produire des pièces de très haute qualité, conformes aux modèles d'origine et parfaitement adaptées à l'assemblage mécanique du prototype.

### 8.3) Problèmes électriques rencontrés

Certains câbles se sont révélés trop courts une fois les composants fixés à leur emplacement définitif. En phase de test des composants je m'étais concentré uniquement sur le fonctionnement global, sans tenir compte de la disposition finale des éléments. J'ai donc dû

rallonger plusieurs câbles par soudure afin d'assurer des connexions fiables et de faciliter l'assemblage à l'intérieur du boîtier en PLA.



Figure 31 Photographie de l'atelier de soudure

#### 8.4) Problèmes de réservoirs

La création d'un réservoir pour le prototype repose actuellement sur une méthode artisanale, qui présente de nombreux risques et limites. Pour fabriquer un réservoir, il est nécessaire de démonter la partie supérieure d'un briquet DJEEP. Cette première étape est particulièrement délicate, car elle peut provoquer une explosion du réservoir s'il reste du gaz sous pression.

Une fois le démontage réussi, il faut vider totalement le briquet en dévissant sa vis de réglage afin de laisser s'échapper le gaz. Lorsque le réservoir est vide, l'étape suivante consiste à poncer soigneusement la partie supérieure pour obtenir une surface adaptée à l'intégration avec le reste du système. Cependant, cette opération comporte un risque élevé de perçage du réservoir, ce qui le rend inutilisable. Ce problème est fréquent : lors de mes essais, tous les briquets initialement commandés ont été percés, les rendant inutilisables pour le prototype.



*Figure 32 Photographie d'un réservoir correctement poncé*

En conséquence, j'ai dû commander de nouveaux briquets en fin de stage. Cette situation a entraîné un blocage dans l'avancement du projet, car le sous-système de stockage et de transport de gaz ne peut pas être finalisé tant que les réservoirs ne sont pas opérationnels. Le projet reste donc en pause jusqu'à la réception de ces nouvelles pièces.

Cette difficulté met en évidence les limites de la méthode actuelle, trop fragile et aléatoire. Pour y remédier, je réfléchis déjà à la conception d'un nouveau système de réservoir, plus fiable et sécurisé, qui pourrait être intégré dans une version 2 du prototype, afin de fiabiliser l'ensemble du dispositif et d'éviter ce type de blocage à l'avenir.

## 9) Bilan intermédiaire

À la date de rédaction de ce rapport, le prototype n'est pas encore fonctionnel à 100 %, principalement en raison de l'absence de certaines pièces essentielles encore en cours de livraison, comme le tube en silicone et les briquets DJEEP et CLIPPER nécessaires à la fabrication des réservoirs. Le projet est donc temporairement en pause dans l'attente de ces

éléments. Une fois toutes les pièces reçues, je pourrai finaliser le système de stockage et d'acheminement du gaz. Je pourrai en suivant finir la partie programmation, qui nécessite que le prototype soit entièrement assemblé et opérationnel pour être correctement testée et validée.

En parallèle, je réfléchis déjà à plusieurs axes d'amélioration pour une future version 2 du prototype, notamment :

- Diminuer le jeu entre les pièces mécaniques afin d'obtenir des mouvements plus précis et fluides,
- Concevoir une alternative plus fiable au réservoir de briquet, afin de remplacer ce système artisanal,
- Revoir la conception du boîtier pour intégrer des emplacements dédiés au passage et à l'organisation des câbles, dans l'optique d'un **cable management**<sup>18</sup> optimisé.

Le projet va donc se poursuivre avec pour objectif la livraison d'un prototype finalisé et stable, capable de répondre pleinement aux besoins de la collaboration entre l'ESTIA et l'École de l'air et de l'espace.



*Figure 33 Photographie de l'état du prototype à la date de rédaction du rapport*

---

<sup>18</sup> Le **cable management** est l'**organisation et la gestion des câbles** dans un système afin de les rendre **plus accessibles, sécurisés et esthétiques**.

## VII) Conclusion et prise de recul

Ce stage a été une expérience extrêmement enrichissante, tant sur le plan technique que personnel. N'ayant aucune expérience préalable en prototypage, j'ai dû me former rapidement à une multitude d'outils d'ingénieur, ce qui m'a permis d'acquérir des compétences précieuses et transférables à d'autres projets.

Sur le plan technique, j'ai perfectionné ma maîtrise de l'impression 3D. J'ai appris non seulement à configurer et optimiser des impressions complexes, mais aussi à comprendre la logique derrière cette technologie : gestion des supports, orientation des pièces, tolérances et prévention des problèmes comme le *warping*. Grâce à cette expérience, je sais désormais anticiper et éviter les défauts d'impression, ce qui m'a permis de produire des pièces précises et fiables.

J'ai également développé des compétences solides en électronique. J'ai appris à câbler différents composants tout en consultant attentivement leurs fiches techniques, afin d'éviter d'endommager du matériel coûteux. Cette étape était particulièrement exigeante, car une erreur peut entraîner la destruction d'un composant, provoquant des délais importants liés au temps de réapprovisionnement. J'ai aussi appris à souder correctement des câbles, une compétence indispensable dans tout projet de prototypage. Aujourd'hui, je me sens capable de monter intégralement un système électronique et de l'intégrer dans un ensemble mécanique.

Un autre aspect clé de mon apprentissage a été la documentation technique. Pour la première fois, j'ai rédigé des manuels d'installation, d'utilisation et de maintenance du prototype. Ce travail m'a appris à communiquer clairement des informations techniques, une compétence essentielle pour assurer la pérennité d'un projet et faciliter les collaborations futures.

Même si mon prototype n'est pas encore finalisé à 100 %, je suis convaincu que le résultat final sera quasi identique au prototype original de Valentin Braud. J'ai suivi scrupuleusement ses conseils et validé chaque étape avec lui. Ce respect du design initial est primordial pour permettre des expérimentations fiables et garantir la continuité des collaborations entre l'ESTIA et l'École de l'air et de l'espace.

Avec du recul, je pense que le projet aurait gagné en efficacité si j'avais travaillé avec un collègue ingénieur. Certaines étapes auraient pu être réalisées en parallèle, ce qui aurait permis de livrer le prototype dans les délais tout en intégrant des améliorations supplémentaires.

En termes de collaboration, je suis globalement satisfait des échanges avec l'École de l'air et de l'espace, mais j'ai constaté que le système actuel, basé sur Teams, n'est pas optimal pour un projet aussi technique. Les vidéoconférences sont parfois limitées en qualité et ne permettent pas toujours une communication fluide sur des sujets complexes. Je pense qu'il serait intéressant d'envisager des salles équipées pour la visioconférence de haute qualité, voire

d'explorer l'usage de réalité augmentée (AR) ou réalité virtuelle (VR) pour partager en direct la manipulation du prototype. Cela faciliterait grandement la compréhension mutuelle et réduirait les incompréhensions, notamment pour des tâches très artisanales et complexes, où il est difficile de se mettre à la place du concepteur initial.

Enfin, je pense qu'un projet de ce type aurait beaucoup de potentiel dans un cadre académique. Par exemple, une équipe de quatre ingénieurs en deuxième année pourrait, selon moi, réaliser un tel prototype en une vingtaine d'heures de travaux pratiques, à condition que je leur fournisse une documentation claire et détaillée. Cela constituerait une expérience formatrice, tout en permettant de répartir la charge de travail et d'accélérer le développement.

En conclusion, ce stage m'a permis de développer des compétences techniques variées, de comprendre en profondeur les enjeux d'un projet collaboratif entre deux institutions et d'identifier des axes d'amélioration organisationnels et techniques. Je repars avec une expérience riche et la conviction que ce prototype, une fois finalisé, ouvrira la voie à de nouvelles expérimentations et à une collaboration encore plus étroite entre l'ESTIA et l'École de l'air et de l'espace.

## VIII) Bibliographie

**Braud, V.** (2025). *La cognition incarnée et les interfaces utilisateur tangibles pour améliorer la conscience de la situation : Le cas des environnements déportés*. Thèse de doctorat, Aix-Marseille Université. NNT : 2025AIXM0105.

**Endsley, M. R.** (1988). Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement. Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting, 32(2), 97-101. <https://doi.org/10.1177/154193128803200221>

**Ishii, H., & Ullmer, B.** (1997). Tangible bits : Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 234-241. <https://doi.org/10.1145/258549.258715>

**How To Mechatronics.** *Stepper Motors and Arduino – The Ultimate Guide*. Chaîne YouTube How To Mechatronics. Consulté le vendredi 30 août 2025. [https://www.youtube.com/watch?v=7spK\\_BkMJys](https://www.youtube.com/watch?v=7spK_BkMJys)

**Arduino. Stepper Motors, Arduino Documentation.** Consulté le vendredi 30 août 2025.  
<https://docs.arduino.cc/learn/electronics/stepper-motors/>

**Apprendre la microsoudure.** Savoir souder 2 fils à l'étain. Chaîne YouTube Apprendre la microsoudure. Consulté le vendredi 30 août 2025.  
<https://www.youtube.com/watch?v=nfFirVaUKa0>

## IX) Annexes

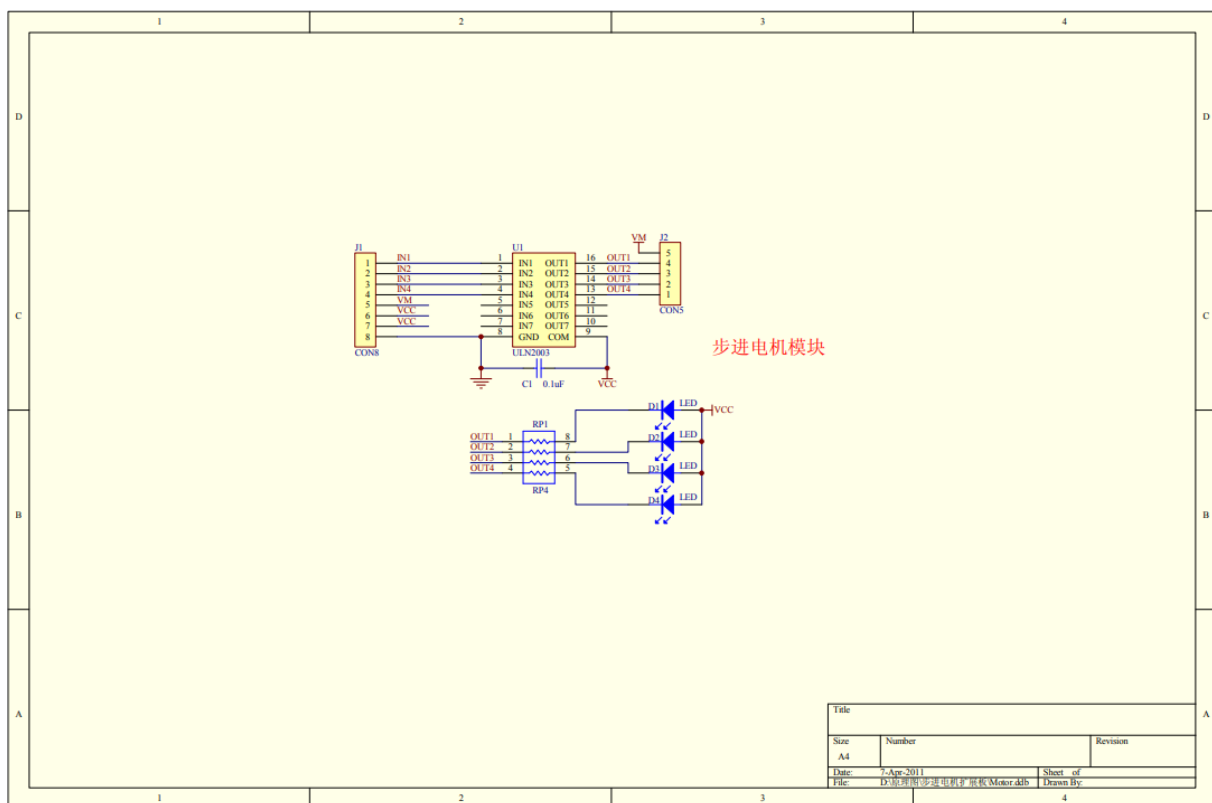


Figure 34 Schéma de fonctionnement du driver du moteur pas à pas

### Features

- Top Selling Heavy Duty Standard Servo
- High Impact Karbonite Gears
- Top Ball Bearings
- Excellent Centering and Resolution

### HS-485HB Servo Specifications

Performance Specifications	
Operating Voltage Range (Volts DC)	4.8V – 6.0V
Speed (Second @ 60°)	0.22 – 0.18
Maximum Torque Range oz. / in.	67 – 83
Maximum Torque Range kg. / cm.	4.8 – 6.0
Current Draw at Idle	10 mA
No Load Operating Current Draw	200 mA
Stall Current Draw	1,200 mA
Dead Band Width	3 $\mu$ s
Physical Specifications	
Dimensions (Inches)	1.57 x 0.78 x 1.49
Dimensions (Metric)	39.8 x 19.8 x 38.0
Weight (Ounces)	1.59
Weight (Gram)	45.0
Circuit Type	HT7003 Analog SMT
Motor Type	3 Pole Metal Brush Ferrite
Gear Material	Karbonite
Bearing Type	Top Ball Bearing
Output Shaft (type / Ømm)	Standard 24
Case Material	Plastic

Figure 35 Fiche technique servomoteurs



Relisez votre rapport et utilisez la « check-list » ci-dessous pour vérifier que vous avez évité les erreurs les plus fréquemment commises.

<input checked="" type="checkbox"/>	J'ai bien relu et corrigé les fautes d'orthographe et de syntaxe.
<input checked="" type="checkbox"/>	Je ne fais pas confiance aux traducteurs automatiques : je relis bien l'anglais et l'espagnol.
<input checked="" type="checkbox"/>	Toutes les figures, schémas et tableaux sont numérotés et ont un titre.
<input checked="" type="checkbox"/>	L'alignement du texte est justifié (alignement à droite et à gauche).
<input checked="" type="checkbox"/>	J'ai utilisé une seule police de caractère dans tout le document.
<input checked="" type="checkbox"/>	J'ai numéroté les paragraphes en conservant un style uniforme (police plus grosse pour les titres, plus petites pour les sous-titres)..
<input checked="" type="checkbox"/>	La table des matières est à jour.
<input checked="" type="checkbox"/>	Aucune figure ne dépasse dans les marges.
<input checked="" type="checkbox"/>	Les pages sont numérotées.
<input checked="" type="checkbox"/>	La qualité des images est suffisante. Les figures sont lisibles.
<input checked="" type="checkbox"/>	Je fais systématiquement référence aux figures dans le texte (cf. fig X). Les figures sont toutes introduites par quelques lignes de texte et commentées.
<input checked="" type="checkbox"/>	Je pense à faire ressortir des conclusions partielles, les éléments importants à retenir.
<input checked="" type="checkbox"/>	Lorsque cela est possible, je remplace de longs paragraphes descriptifs par des schémas, des graphiques, des organigrammes.
<input checked="" type="checkbox"/>	Le document déposé sur Moodle est un pdf.
<input checked="" type="checkbox"/>	J'ai bien cité toutes les références. Je n'ai pas fait de copier-coller d'internet.
<input checked="" type="checkbox"/>	Mon tuteur a validé mon rapport avant transmission à l'ESTIA
<input checked="" type="checkbox"/>	J'ai fait preuve de vigilance par rapport aux informations confidentielles.
	Mon rapport présente avec clarté (cf paragraphe 2.4) :
<input checked="" type="checkbox"/>	La problématique et la mission confiée
<input checked="" type="checkbox"/>	Des éléments de gestion de projet et de relations humaines
<input checked="" type="checkbox"/>	Des éléments techniques
<input checked="" type="checkbox"/>	Des éléments méthodologiques
<input checked="" type="checkbox"/>	Je n'oublie pas de conclure et d'évaluer mon travail au regard des objectifs fixés (objectifs technique, planning prévisionnel vs réalisé...).
<input checked="" type="checkbox"/>	Un bilan personnel, une prise de recul par rapport aux compétences acquises.

Reproduction d'un prototype de visualisation  
De la consommation instantanée et du niveau de carburant  
Dans le réservoir d'un drone

### CONTEXTE DU PROJET :

Le projet vise à **reproduire le prototype tangible développé par Valentin Braud** afin que l'ESTIA dispose d'un modèle fonctionnel pour **tester et améliorer la conscience de la situation des opérateurs de drones** dans un **environnement déporté**. Il répond au problème de **surcharge cognitive**, en transformant des données complexes (niveau de carburant, consommation instantanée) en **informations physiques et intuitives**. Ce projet est **important pour la recherche et la formation**, car il renforce la **collaboration entre l'ESTIA et l'École de l'air et de l'espace**, tout en ouvrant la voie à des **interfaces plus ergonomiques** pour les systèmes de drones. À terme, il pourrait **influencer la conception des stations de contrôle**, faciliter les **expérimentations à distance**, et réduire le risque d'erreurs humaines dans des contextes critiques.

### OBJECTIFS :

Reproduire un **prototype tangible fonctionnel d'ici fin septembre 2025**, identique à celui de Valentin Braud, pour **améliorer la compréhension et la prise de décision des opérateurs de drones**, en utilisant les **ressources disponibles à l'ESTIA** et en suivant un **plan de travail précis et mesurable**.

### LIVRABLES :

Un **prototype tangible fonctionnel** et fidèle à l'original, accompagné de **manuals d'installation, d'utilisation et de maintenance**. Livrables intermédiaires : pièces imprimées, sous-systèmes testés. Livrable final : **prototype complet et documenté** prêt pour les expérimentations.

### RESSOURCES :

Halles technologiques à l'ESTIA  
Via TEAMS/Video conférences  
Imprimantes 3D, Arduino, composants électroniques, briquets, bobines PLA, logiciels **Bambu Lab Studio** et **CAO**

### PARTIES PRENANTES :

Le **client principal** est l'École de l'air et de l'espace, qui utilisera le prototype pour ses expérimentations et travaux de recherche.  
L'**équipe projet** est composée de moi-même, en charge de la conception, du prototypage, du câblage et de la documentation, de **Mme COUTURE Nadine**, tutrice à l'ESTIA apportant un soutien organisationnel et administratif, et de **Valentin Braud**, concepteur du prototype initial et référent technique.  
Les **partenaires principaux** sont **ESTIA Recherche** et l'École de l'air et de l'espace, appuyés par des enseignants-chercheurs experts.  
Les **utilisateurs finaux** sont les **opérateurs de drones** et les **chercheurs** travaillant sur l'amélioration de la conscience de la situation dans des environnements déportés.

### RISQUES :

**Composants défectueux**  
**Problèmes de livraison**

### BUDGET :

Quelques centaines d'euros pour l'achat de tous les composants.  
Environ 200€ pour la création  
Environ 10€ de maintenance par mois

### CALENDRIER :

Début de stage 30 juin

Stage pas encore fini

### JALONS :

Semaine 1-2 -> Etude du besoin  
Semaine 3-7 -> Fabrication et intégration  
Semaine 8 -> Documentation et validation  
Semaine 9 - ... -> Livraison du prototype et de la documentation

