

Rapport de conception et retour d'expérience

Dassault UAV Challenge 2024-2025

Equipe Gadz'Aéro - ENSAM



Stépane BINON

Matthieu COLLET

Adeline GARRIGUES

Ombeline MICHAUD

Félix PRADIER

Table des matières

I.	Introduction	8
II.	Contexte et objectifs	8
III.	Organisation et gestion de projet	9
	1. Présentation de l'équipe	9
	2. Gestion de la distance	10
	3. L'association Gadz'Aéro	12
IV.	Conception	13
	1. Les différentes versions du SDAFF	13
	2. Conception de l'avion	13
	3. Conception de l'hexaoptère	14
V.	Réalisation de l'avion	14
	1. Electronique de vol	15
	2. Ailes	15
	3. Fuselage	17
	4. Empennage	18
	5. Fixation du moteur	19
	6. Assemblage final	19
	7. Prise en main de l'avion	20
	8. Instrumentation	24
	9. Gestions des Essais	26
VI.	Développement de l'hexaoptère	26
	1. Prise en main	26
	2. Instrumentation	27
VII.	Vol autonome	29
	1. Automate de vol	29
	2. ROS2 et machine à états	31
	3. Simulation SITL : System In The Loop	33
	4. Architecture de communication	33
	5. Language autonome	34
	6. Atterrissage autonome par Machine Learning	34
VIII.	Procédures de détections	36
	1. Détection de point chaud par seuil thermique	36
	2. Identification de patterns par la bibliothèque OpenCV	37
	3. Identification de patterns par Machine Learning	38
IX.	Budget détaillé	40
	1. Budget alloué et financement	40
	2. Gestion de trésorerie	40
X.	Conclusion	42

XI.	Annexes	43
1.	Drone hexacoptère de surveillance présentée dans la revue Sensors.	43
1.	Conception des ailes.....	43
2.	Conception de l'architecture générale de l'avion.....	46
3.	Dimensionnement et choix du groupe moto propulseur.....	48
4.	Ressources et moyens à disposition	50
5.	Réalisation de l'avion.....	51
6.	Budget détaillé	55
7.	Caractéristique de vols pour une détection optimale.....	57
XII.	Bibliographie	57

Table des figures

Figure 1 : L'incendie "du siècle" en 2022, Gironde	8
Figure 2 : Communauté WhatsApp de l'équipe (anonymisée)	10
Figure 3 : Exemple de réunion Teams	11
Figure 4 : Extrait CR du 18/11	11
Figure 6 : Exemple de dossier	11
Figure 6: Architecture du OneDrive	11
Figure 7 : Résumé des standards d'Olive	13
Figure 8 : Partie du plan d'Olive II	13
Figure 10 : Découpe des nervures au jet d'eau	15
Figure 9 : CAO sous CatiaV5 du NACA 2412	15
Figure 11 : Premier prototype	16
Figure 12 : Structure interne des ailes finales	16
Figure 13: Forme du fuselage avant (gauche) et après(droite) découpe	17
Figure 14: Prototype de fuselage, rigidifié par des languettes de Depron aux quatre coins	18
Figure 15 : Impression du cadre et de l'équerre test sur l'imprimante Bambu Lab	18
Figure 16 : Réalisation en CAO du cadre de soutien sur CatiaV5	18
Figure 17 : Empennage fixé au fuselage	18
Figure 19 : Première version du nez de l'aéronef	19
Figure 19 : Mise en position du moteur avant collage	19
Figure 20 : Olive I terminée	19
Figure 21 : Premier vol d'Olive	20
Figure 22: logement sur-mesure en Depron pour servomoteur	21
Figure 23: Nez en impression 3D Figure 24: Fixation du moteur sur le nez	21
Figure 25: Pièce de renfort du fuselage avant en impression 3D	22
Figure 26: Collage du nez au renfort de fuselage (à gauche) et colle utilisée (à droite)	22
Figure 27: Olive I en vol	23
Figure 28 : Olive II en construction	23
Figure 29 : Caméra thermique MLX 9064X	24
Figure 30 : Olive II complètement équipée	25
Figure 31 : Olive II prêt au vol	26
Figure 32: Popeye en stationnaire automatique	27
Figure 33: Caméra visible dotée d'un zoom USBFHD06H-SFV	28
Figure 34 : CAO du système de largage	28
Figure 35: Masse largable et système de largage complet	29
Figure 36 : Exemple d'un kit Pixhawk	29
Figure 37 : Interface de MissionPlanner, avant connexion au drone	30
Figure 38 : Exemple d'emploi de l'outil de cadrillage natif de MissionPlanner	31
Figure 39: Echange d'informations concernant la position du feu entre Popeye, Olive et la CGS via les MAV_manager_node	32
Figure 40: Illustration de la machine à état (en cours de développement).	32
Figure 41: SITL de PX4 et simulatio physique utilisant Gazebo.	33
Figure 42: Inférence du modèle prédictif sur les bordures gauches, droites et la ligne centrale de la piste d'atterrissage	35
Figure 43: Détection thermique fonctionnelle	36
Figure 44: Stream vidéo des caméras thermiques et visible en vol depuis Popeye	37
Figure 45: Calibration de la caméra.	37
Figure 46: Logo flamme qui a été utilisé pour l'entraînement du modèle Yolov8	38
Figure 47: Etape de labelling avec le logiciel LabelStudio	38
Figure 48: Inférence du modèle prédictif implémenté à bord de l'hexacoptère, utilisant la caméra visible embarquée et la Raspberry PI	39
Figure 49 : Logo de l'incubateur de projets CaMéc-IA	40
Figure 50: Diagramme circulaire des dépenses par secteur	41
Figure 51 : Calcul du nombre de Reynolds	44
Figure 52 : Profils d'ailes choisis pour comparaison	45

Figure 53 : Option de dessin des profils.....	45
Figure 54 : Comparaison des Cz et Cx.....	46
Figure 55 : Profil NACA 2412 sélectionné	46
Figure 56 : Dimensions des ailes, du stabilisateur et du fuselage selon RC AEROLAB	47
Figure 57 : Vue 3D de l'architecture choisie.....	47
Figure 58 : Schéma de centrage de l'appareil.....	47
Figure 59 : Dimensionnement des surfaces de contrôles	48
Figure 60 : Feuille de calcul RCaérolab.....	48
Figure 61 : Détermination du GMP à partir des caractéristiques du moteur	48
Figure 62 : Caractéristiques de la batterie	49
Figure 63: Graphique des caractéristiques du GMP en fonction de l'avancement J	49
Figure 64: calculs relatifs à l'hélice	50

Table des tableaux

Tableau 1 : Cours académiques des membres.....	9
Tableau 2 : Champs de compétences annexes du groupe.....	9
Tableau 3 : Répartition des rôles dans l'équipe.....	10
Tableau 4: Table récapitulative des dépenses effectuées par l'association Gadz'Aéro	40

Résumé des conseils

Un soin particulier doit être porté à la tenue du drive. Architecture explicite (éventuellement détaillée dans un fichier « read me » à la racine du drive), nommage des répertoires et documents puis archivage sont des bonnes pratiques à adopter dès le début mais surtout à maintenir tout du long..... 12

En cas de travail à distance, il faut absolument avoir un lieu de travail commun où se retrouver. 12

Éventuellement disperser le matériel chez différentes personnes afin de toujours pouvoir avancer en parallèle. 12

Prendre un plan disponible sur internet représente un gain de temps énorme et une assurance d'avoir une architecture éprouvée en plus de potentiellement avoir le soutien d'une communauté d'utilisateurs en cas de problèmes. Divers tutoriels, notamment sur Youtube, présentent des avions extrêmement simples amplement suffisant pour le Dassault UAV Challenge. 14

Nous conseillons l'empennage en T. Même si plus complexe à réaliser, il permet de protéger le stabilisateur et la gouverne de profondeur des chocs à l'atterrissage. 14

Attention à bien choisir un moteur, une batterie et une hélice compatibles et notamment une hélice optimum pour la plage de vitesses de rotation du moteur considérée ! 14

Il faut rester sobre dans la conception d'un drone multi-rotors. Par essence c'est un aéronef qui a besoin de beaucoup de puissance pour voler à l'instar d'un avion dont les ailes font l'essentiel du travail de sustentation. Un drone léger subira également moins de dégâts lors des crashes qui arriveront inévitablement..... 14

Nous recommandons d'avoir deux types de colles : une à prise rapide pour le prototypage et le collage de petits éléments (électroniques notamment) et une deuxième à prise lente afin d'avoir le temps pour assembler les grandes pièces (ailes surtout)..... 15

Par ailleurs, il ne faut pas hésiter à user et abuser de scotch fort : peu couteux, léger et résistant !..... 15

Attention toutefois à la résistance en flexion avec la méthode des languettes : trop de facteur de charge (ressource trop brutale ou un virage trop serré) et c'est la rupture !..... 16

Attention à faire les gouvernes suffisamment grandes : trop peu de surface et le contrôle en roulis sera mauvais voire inefficace ! Mieux vaut prévoir plus grand et coupé par ensuite..... 17

Pour les découpes longues dans le Dépron : utiliser un cutter bien affûté au risque de faire des bavures. 17

Pour du pliage par source chaude, nous conseillons de prévoir des surfaces d'appuis afin de parfaitement donner la forme voulue.	17
Les cadres sont essentiels pour éviter toutes déformations d'un fuselage aux parois souples, les équerres elles ne sont pas révélées aussi efficaces que prévues.....	18
La masse d'un avion détermine en grande partie ses caractéristiques de vol. Il faut absolument chasser le moindre gramme, attention donc à utiliser l'impression 3D avec modération.	22
Pour la conception d'un avion, nous conseillons de trouver un plan déjà existant voire d'acheter un avion complet. Si toutefois un membre de votre équipe a les compétences nécessaires, c'est tout à fait envisageable et encouragé par le barème de Dassault.	23
N'envisagez pas d'utiliser un avion si aucun membre de votre groupe n'est aéromodéliste !.....	23
Il faut veiller à choisir des composants compatibles, notamment concernant les protocoles de communication mis en jeu.....	24
La question de l'alimentation d'une Raspberry est un point à ne pas négliger. Si est branchée à plusieurs modules USB, elle peut consommer jusqu'à 3 ampères.....	25
Nous conseillons donc de préparer au maximum les vols d'essais et de rédiger des check-lists afin de ne pas oublier de matériel.....	26
Attention à ne pas sous-estimer le temps d'intégration des pièces imprimées 3D : il faut systématiquement plusieurs impressions pour obtenir une pièce bonne ; le nombre d'itérations augmentant avec le degré de complexité de la pièce.....	27
Si vous n'êtes vraiment pas à l'aise, des logiciels de simulation existent pour s'entraîner en vue du premier vol : RealFlight Trainer pour les voilures fixes et hélicoptères ou FPV Freerider pour les drones.	27
Nous conseillons de réaliser les premiers vols avec le minimum de système à bord pour éviter toutes casses inutiles en cas de crash.....	27
Nous conseillons de débiter par de petits sauts de puces afin d'estimer la manœuvrabilité du drone. Il faut ensuite rapidement s'éloigner du sol afin de pouvoir rattraper les situations hasardeuses. Etrangement, les collisions avec le sol surviennent lorsque l'on est proche du sol.....	27
Il ne faut pas hésiter à consulter les sites de secondes mains, on peut y trouver de belles surprises.....	28
Les inserts filetés permettent de visser facilement dans une pièce imprimée en 3D. Cela permet d'avoir un ensemble de pièces moins complexe et de n'en changer que certaines en cas de casse.....	28
La calibration de l'automate doit être réalisée rigoureusement selon la documentation et le plus complètement possible.	30
Ne pas hésiter à passer du temps en début de projet pour éplucher la documentation Ardupilot, c'est une étape importante pour le bon déroulement du projet.	30
MissionPlanner n'est malheureusement pas disponible sur Linux et il faudra privilégier QGroundControl ou MavProxy pour une utilisation va Ubuntu.	31
QGroundControl peut être utile en première approche mais dans le cadre de la programmation de missions complexes, nous conseillons l'emploi de MissionPlanner afin d'avoir plus la main sur les paramètres pilotant l'automate de vol.....	31
Nous vous conseillons d'employer des systèmes accessibles par toutes les personnes du groupe afin de ne pas faire reposer toute ou partie d'un pan du projet sur une même personne.	32
Il existe un package ROS2 permettant le partage des topics et autre interfaces ROS2 via MAVLink nativement : MAVRos. Cependant, ce dernier est très complexe et dur à prendre en main et son portage sur ROS2 est très peu documenté et encore en cours. De longues heures ont été dédiées à sa prise en main mais n'ont pas abouti à des résultats satisfaisants. C'est surtout le fait que ce package soit une boîte noire et que son implémentation sur Raspbian soit compliqué (build trop long) qui nous a forcé à l'abandonner au profit d'une solution custom utilisant PyMavLink.	33

Une autre possibilité aurait été d'utiliser MAVSKD mais son implémentation n'est pas vraiment compatible avec Ardupilot et ROS2 ce qui aurait posé une double barrière technique qui aurait été dure à franchir dans les temps.	33
Sauf nouveautés, nous conseillons de ne pas utiliser MAVRos avec ROS2 du au manque de documentation et à la simplicité de construction d'une bibliothèque custom en utilisant PyMavLink.	33
Nous conseillons d'utiliser le SITL d'ArduPilot pour limiter les risques, celui-ci est simple à prendre en main.	33
Attention de flasher une version Linux compatible avec le modèle et les capacités de la Raspberry – Ubuntu server 22.04 a été notre choix.	34
Attention à choisir des canaux de communication compatibles avec l'information à transmettre mais surtout permettant une portée suffisante.	34
Nous insistons sur la problématique de la puissance disponible à bord : les meilleurs algorithmes du monde sont bien impuissants sans énergie.	37
Une étape de calibration est obligatoire pour de la reconnaissance d'image, particulièrement avec un FOV important.	38

I. Introduction

Pour cette 11ème édition, nous sommes 5 étudiants des Arts et Métiers à nous être lancés dans l'aventure du Dassault UAV Challenge. Novices dans cette compétition, nous n'avons pas eu la chance de bénéficier de l'expérience et du travail de personnes ayant déjà participé. Nous sommes également partis sans aucun matériel ayant pu servir à une précédente édition. Cependant nous sommes tous très motivés (élément déterminant !) et avons des connaissances dans plusieurs domaines : aéronautique, automatisme, robotique, gestion de projet, etc...

En dernière année et dans des parcours différents, il nous a fallu composer avec le lieu d'étude de chacun : campus de Paris et Bordeaux et université de Sheffield (Angleterre). A partir de février, nous avons ensuite été en stage de fin d'étude ce qui a encore compliqué notre travail. Cette distance géographique a représenté le véritable défi de notre groupe. Toutefois, nous avons su mettre en place les méthodes de travail adaptées. Aussi nous sommes fiers d'être la première équipe œuvrant à distance à accéder à la finale ! Ce document retrace notre engagement dans la compétition, les choix que nous avons fait ainsi que les points que nous aurions aimés davantage développer. Ainsi nous espérons que ce retour d'expérience pourra bénéficier aux futurs compétiteurs, bonne lecture !

Nous présenterons tout d'abord la mission que nous avons choisie. Puis nous approfondirons la gestion du projet et l'organisation à distance, la démarche de conception de nos aéronefs, l'électronique de vol, la détection et naturellement la réalisation. Le budget détaillé sera également présenté. S'en suivra une discussion autour de nos points forts et de ce qui aurait pu être fait différemment.

II. Contexte et objectifs

Afin de pouvoir valoriser académiquement la participation à la compétition pour l'équipe de Bordeaux, nous avons adopté une démarche de conception complète. Ainsi, nous avons choisi de concevoir un produit qui répond à un problème existant et qui pourrait par la suite être employé dans un cas réel d'utilisation. Conscients des problématiques induites par le changement climatique et marqués par l'avènement de nombreux incendies en forêt comme l'incendie de Gironde en 2022, nous avons choisi de concevoir un drone capable de détecter et localiser un départ d'incendie en milieu forestier afin d'informer les pompiers au plus vite.



Figure 1: L'incendie "du siècle" en 2022, Gironde

Le but est donc d'accompagner les pompiers dans la surveillance des forêts. Afin de déterminer les problématiques auxquelles nous serons confrontés, nous avons pris contact avec un sapeur forestier responsable de l'aménagement des forêts en hiver et de la surveillance de celle-ci en période estivale. Selon lui, l'enjeu se concentre sur la durée entre le départ du feu et le lancement de l'alerte. En période de forts risques, les secours déploient un dispositif important (moyens terrestres prépositionnés et guet aérien armé) permettant d'intervenir sur n'importe quelle zone en moins de 5min. La détection précoce est donc un enjeu majeur pour préserver nos forêts. (1)

Aujourd'hui, les tours de guet armées par des personnels sont progressivement remplacées par des tours automatiques gérées à distance sur lesquelles sont installées des caméras de surveillance. (2) Cette solution a toutefois un inconvénient majeur : elle se limite aux champs de vision des caméras peu voire pas mobiles. La zone de surveillance est donc restreinte. Enfin, ce dispositif nécessite en permanence des personnes pour monitorer l'ensemble des caméras et assurer la détection des fumées. Il s'agit donc d'un système de surveillance coûteux, peu adaptable et nécessitant une intervention humaine constante (3).

Pour répondre à cette problématique, l'équipe de Gadz'aéro propose le SDAFF : Système de Détection Autonome des Feux de Forêts. L'idée est de développer un duo de drones

- Olive : avion capable de patrouiller sur une longue durée dans une zone prédéfinie par l'utilisateur pour observer, identifier et localiser les départs d'incendie,
- Popeye : hexacoptère décollant après une primo détection d'Olive pour confirmer le feu via une caméra visible puis éventuellement intervenir avec un moyen léger d'extinction.

Dans ce document, Olive pourra être nommés « avion » et Popeye « drone ».

Conscients des limites du challenge et de la complexité pour aboutir à un dispositif opérationnel pour les secours, nous sommes restés vigilants à replacer le projet dans le cadre d'une compétition étudiante avec des moyens limités.

III. Organisation et gestion de projet

Au vu de l'envergure du projet et de la répartition géographique de notre groupe (trois membres au campus de Bordeaux, un à Paris et un en Angleterre), nous avons apporté un soin particulier à la répartition des tâches et à la communication entre les différents membres.

1. Présentation de l'équipe

L'équipe Gadz'Aéro est composée de cinq élèves ingénieurs en troisième année du Parcours Grandes Ecoles. En plus de l'enseignement commun durant les deux premières années à l'ENSAM, voici un tableau indiquant les cursus de chacun :

Membres	Cursus	Lieux
Stépane	Master recherche : Systèmes Avancés et Robotique (SAR)	ENSAM Paris
Matthieu	Expertise ENSAM : aéronautique et aérospatiale	ENSAM Bordeaux
Adeline	Expertise ENSAM : aéronautique et aérospatiale	ENSAM Bordeaux
Ombeline	Expertise ENSAM : aéronautique et aérospatiale	ENSAM Bordeaux
Félix	MSc Aerospace Engineering	University of Sheffield

Tableau 1 : Cursus académiques des membres

Au-delà d'uniquement les connaissances académiques, voici un tableau donnant à voir les compétences annexes particulières du groupe au début du projet :

Membres	Aéronautique	Robotique	Modélisme
Stépane		Coupe de France de robotique 2024	
Matthieu	Pilote planeur et ULM		
Félix	Pilote planeur		Fabrication, pilote déclaré DGAC

Tableau 2 : Champs de compétences annexes du groupe

La répartition des tâches a été réalisée en fonction des compétences et préférences de chacun. La charge de travail et le besoin de proximité géographique pour certaines tâches (construction de l'aéronef par exemple) ont également été déterminants. L'idée étant d'avoir une charge homogène pour chaque membre et d'augmenter le nombre de membres sur des tâches complexes. Voici ladite répartition des responsabilités au sein de l'équipe :

Membres	Gestion de projet	Administratif dans l'association	Avion	Hexacoptère	Détection et traitement signal	Pilotage autonome	Base sol	Atterrissage autonome
Stépane	Gestion du OneDrive	Trésorier		X	X	X	X	
Matthieu			X					X
Adeline			X					
Ombeline	Gantt		X					
Félix	Chairperson, secrétaire	Président		X	X	X		X

Tableau 3 : Répartition des rôles dans l'équipe

Il est ici crucial de correctement délimiter les frontières des tâches de chacun et les interactions entre ces tâches afin d'ensuite pouvoir intégrer au système global.

2. Gestion de la distance

Le travail à distance est un enjeu de notre groupe dont nous avons particulièrement conscience. Aussi, nous veillons à communiquer le plus régulièrement possible et à employer des moyens adaptés (voir ci-dessous). Aussi, l'ensemble des discussions prennent place via une application commune. Des réunions en visioconférence pour l'ensemble des membres se tiennent dès que possible, au minimum une fois par semaine. Sinon, les équipes s'organisent librement selon les disponibilités et les besoins.

a) Les moyens employés

Voici les différents moyens déployés par l'équipe afin d'organiser le travail à distance :

- Tout d'abord notre moyen de communication le plus utilisé : une communauté WhatsApp. En plus d'un canal général, elle est répartie selon plusieurs canaux, chacun pour un pôle de travail. Elle permet d'échanger nos idées, de nous tenir au courant des avancées de chacun et à convenir de réunions visioconférences.



Figure 2 : Communauté WhatsApp de l'équipe (anonymisée)

- Afin d'échanger de manière plus formelle entre nous lors des réunions et pour nous entretenir avec des professionnels, professeurs ou chercheurs, nous utilisons Teams.
- Calendrier partagé : celui-ci permet d'afficher les contraintes et disponibilités de chacun afin de prévoir des réunions et pour voir la capacité de travail des membres sur la semaine. Au-delà de simples réunions, ce calendrier est particulièrement intéressant pour fixer les week-ends de travail chez Stéphane une fois tous en stage.
- Afin d'être les plus efficaces possibles, nos réunions sont systématiquement cadencées et organisées par un ordre du jour glissant. Lors des jours précédant la réunion, les membres évoquent les points à inscrire sur l'ordre du jour (par exemple « faire X »). A la réunion, les points sont abordés et la marche à suivre est donnée. Pour la réunion suivante, l'ordre du jour est repris avec cette fois-ci la mention « Avancement de X ». Durant les réunions, Félix rédige un compte rendu (CR) sur la base de l'ordre du jour afin de garder une trace et pour structurer nos échanges.

Compte rendu de réunion

Informations générales : /

Date & heure : 18/11/2024 à 20h

Durée : 1h

Lieu de la réunion : Visio

Personnes présentes : Stéphane, Adeline, Ombeline, Matthieu, Félix

Ordre du jour :

- V Récapitulatif avancement chacun
- V Consulter Gantt pour suite immédiate à donner en vue du rendu Dassault
- V Point hebdo
- V Suite à donnée

Sujets abordés	Résumé de la discussion	Décision/Action à prendre
Sujet 1 : Tour de table	Stéphane : Occupé ++ dernièrement → Sera focus interface <u>detection</u> /commande BDX : -Finaliser drone -Désosser le corsair	Félix : demain infos <u>camera</u> thermique, poids et dimensions. Avancer sur la <u>detection</u> + interface <u>ardupilot</u> avec <u>stéphane</u> → Réunion mardi matin ardupilot vendu

Figure 4 : Extrait CR du 18/11

- Pour organiser et partager les différents documents, un OneDrive a été mis en place selon la structure générale classique d'un drive de projet. Chaque document est nommé de façon claire et explicite en veillant à respecter la version dont il est question. Afin d'éviter tout malentendus et pour ne pas faire d'erreurs, les versions antérieures sont stockées systématiquement dans un fichier « Archives » ; servant par la même occasion de sauvegardes. Ainsi, il a dans le dossier uniquement la version en cours. Les documents sont réalisés sous la suite office.

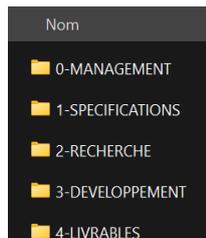


Figure 6 : Architecture du OneDrive

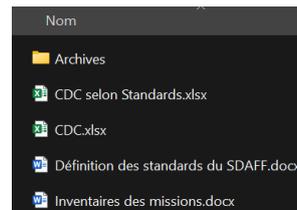


Figure 6 : Exemple de dossier \1-SPECIFICATIONS\1- Analyse fonctionnelle

Un soin particulier doit être porté à la tenue du drive. Architecture explicite (éventuellement détaillée dans un fichier « read me » à la racine du drive), nommage des répertoires et documents puis archivage sont des bonnes pratiques à adopter dès le début mais surtout à maintenir tout du long.

b) Périodes de travail

Le travail à distance par pôles est bien adapté au début de projet mais moins dès lors qu'il faut intégrer des systèmes, adapter des connectiques ou réparer. Ainsi, jusque décembre nous pouvions avancer nominalement avec l'équipe de Bordeaux s'occupant de l'avion, Félix s'occupant de l'administratif et des moyens de détection puis Stéphane se documentant sur les contrôleurs de vol.

Toutefois, à partir de janvier, nous avons besoin de travailler sur les systèmes complets et réaliser les premiers essais en vols. A cet égard, durant l'interruption de cours de l'inter-semester (mi-janvier), Stéphane s'est rendu à Bordeaux. Nous avons alors pu prendre en main l'hexacoptère et partager concrètement nos avancées.

Ensuite, comme évoqué plus haut, à partir de février tous les membres de l'équipe ont débuté leur stage de fin d'études : Stéphane à Saclay, Ombeline à Paris, Adeline à Reims et Matthieu au Luxembourg ; Félix continuant lui sa scolarité en Angleterre. C'est naturellement un facteur extrêmement déterminant pour l'équipe. D'un coup, notre calendrier s'est trouvé beaucoup plus chargé, disposant de moins de temps à allouer au projet. Nous étions alors contraints de travailler jusque tard après nos journées de travail.

Par chance, Stéphane dispose d'une maison suffisamment grande pour accueillir notre matériel et à mi-chemin pour tous (région parisienne). Nous nous sommes alors retrouvés chez lui entre deux à trois weekends par mois afin de travailler concrètement sur nos drones. Nous avons donc de courtes fenêtres afin d'avancer le plus possible, devant conjuguer avec les météo par forcément clémente pour les essais. Ce fut pour nous un véritable défi, devant dédier la majorité de nos weekends au projet.

Naturellement, cela génère une certaine fatigue : beaucoup de trajets et des nuits bien courtes le weekend. De plus, entreposer le matériel chez un membre peut induire un déséquilibre dans l'équipe. En effet, cette personne peut vouloir prendre à sa charge une grande partie du travail, les autres membres ne pouvant physiquement pas le réaliser. Ainsi, Stéphane a travaillé d'arrache pieds de nombreuses nuits en semaine, pour compenser le déséquilibre lié au fait que nous n'ayons pas accès au matériel.

En cas de travail à distance, il faut absolument avoir un lieu de travail commun où se retrouver.

Éventuellement disperser le matériel chez différentes personnes afin de toujours pouvoir avancer en parallèle.

3. L'association Gadz'Aéro

Afin de faciliter le soutien financier obtenu auprès de CamEx-IA ([voir partie IX.1](#)), une association loi 1901 a été déposée. Cette association a également pour but d'être transmise aux prochaines équipes Arts et Métiers du Dassault UAV Challenge. Elle assure que le matériel et les connaissances acquises lors de cette saison soient transmis pour les saisons suivantes. L'association est présidée par Félix, Stéphane en est le trésorier.

Prendre un plan disponible sur internet représente un gain de temps énorme et une assurance d'avoir une architecture éprouvée en plus de potentiellement avoir le soutien d'une communauté d'utilisateurs en cas de problèmes. Divers tutoriels, notamment sur Youtube, présentent des avions extrêmement simples amplement suffisant pour le Dassault UAV Challenge.

De façon synthétique, nous avons choisi un profil d'aile couramment utilisé pour la fabrication de planeur (NACA 2412) afin de maximiser la finesse. Nous avons opté pour des ailes hautes afin de pouvoir se poser sans encombre sans trains d'atterrissage (gain de masse). Un moteur tracteur à l'avant avec hélice repliable (pour l'atterrissage sur le ventre justement) a été choisi par soucis de simplicité. Enfin, nous avons dimensionné le tout de sorte à pouvoir respecter les critères de manœuvrabilité imposé par Dassault et de vitesse en lien avec la fréquence d'acquisition de notre caméra. Par soucis de simplicité à la fabrication, nous avons opté pour un empennage cruciforme classique.

Nous conseillons l'empennage en T. Même si plus complexe à réaliser, il permet de protéger le stabilisateur et la gouverne de profondeur des chocs à l'atterrissage.

Dès lors, il est possible d'estimer la masse de l'avion et fonction de l'autonomie recherchée ainsi que la capacité d'emport voulue de sorte à trouver le groupe motopropulseur adapté.

Attention à bien choisir un moteur, une batterie et une hélice compatibles et notamment une hélice optimum pour la plage de vitesses de rotation du moteur considérée !

Cette réflexion est tout à fait applicable pour choisir un aéronef sur étagère ; ou du moins un plan.

3. Conception de l'hexacoptère

Nous avons eu la chance récupérer l'hexacoptère entier et gratuitement auprès d'une autre association étudiante des Arts et Métiers. Cela a permis de gagner énormément de temps en plus d'une évidente économie de budget.

Il s'agit d'un drone de grande taille, robuste et avec des moteurs puissants. Cela a l'avantage de nous permettre en forte charge d'emport (jusqu'à 2 kilogrammes) mais ces moteurs consomment énormément d'énergie ce qui impose d'avoir une batterie imposante (6S 8000 mAh) : ce drone est donc surdimensionné pour l'utilisation que nous en avons. Il est aussi plus compliqué à prendre en main ce qui a freiné le développement : Stéphane ne pouvait pas réaliser les vols tests pour l'intégration seul à Paris.

Il faut rester sobre dans la conception d'un drone multi-rotors. Par essence c'est un aéronef qui a besoin de beaucoup de puissance pour voler à l'instar d'un avion dont les ailes font l'essentiel du travail de sustentation. Un drone léger subira également moins de dégâts lors des crashes qui arriveront inévitablement.

V. Réalisation de l'avion

Dans cette partie, nous allons aborder les différentes méthodes de production employées par les membres de l'équipe de Bordeaux ainsi que les matériaux employés.

L'avion sera réalisé en Depron (4). Il s'agit de plaque de polystyrène initialement conçue comme isolant. Ce matériau est largement détourné par les passionnés de modélisme au regard de sa légèreté, sa facilité d'emploi et son coût très bas. Les plaques de 50cm*100cm sont disponibles en deux épaisseurs (3mm et 6mm) que nous utiliserons selon le besoin de rigidité. Les longerons et rigidificateurs de gouvernes seront eux en tiges de carbone (initialement destinés au cerf-volant).

Les assemblages Depron/Depron sont réalisés avec une colle spécifique à ce matériau (détail en annexe). Cette colle nécessite une nuit de séchage pour prendre. Cela permet de pouvoir prendre son temps lors du collage (plus l'aile est longue et plus il faut étaler de colle !). Cependant, il faut ensuite assurer un serrage parfait avec un maintien en position épousant parfaitement les formes de l'aile (entre deux matelas avec des poids sur le matelas du haut par exemple). Sinon quoi certaines parties ne seront pas collées. Cette colle a également l'inconvénient d'être particulièrement lourde.

Nous recommandons d'avoir deux types de colles : une à prise rapide pour le prototypage et le collage de petits éléments (électroniques notamment) et une deuxième à prise lente afin d'avoir le temps pour assembler les grandes pièces (ailes surtout).

Par ailleurs, il ne faut pas hésiter à user et abuser de scotch fort : peu couteux, léger et résistant !

Adeline, Ombeline et Matthieu étant complètement novices en aéromodélisme, les méthodes présentées ci-après ne sont peut-être pas optimums mais ont quand mêmes permises de fabriquer un avion qui vole.

1. Electronique de vol

La majeure partie de l'électronique de vol d'Olive a été récupérée sur un avion d'aéromodélisme réalisé par l'un des membres du groupe. Cela nous a permis de résoudre la problématique des délais de livraison et de budget. Nous avons ainsi récupéré : moteur, batterie, servomoteurs, contrôleur moteur, récepteur VHF, télécommande et chargeur batterie.

2. Ailes

Beaucoup de tutoriels existent sur internet expliquant comment construire des ailes. Certains par de simples languettes de Depron et d'autres avec une architecture plus complète. Voici les étapes suivies dans notre cas.

Tout d'abord une définition des éléments structuraux d'une aile :

- **Les nervures** : supportent la peau pour lui donner la forme voulue et reprennent les efforts de traction/compression,
- **Les longerons** : évitent la flexion de l'aile,
- **Les renforts de nervures** : empêchent la flexion des nervures et donc un écrasement de l'aile.

En plus des éléments de structures, il faut y implémenter les ailerons et les commandes associés. Voyons la réalisation des différents éléments ainsi que l'assemblage du tout.

a) Nervures

Pour la réalisation des nervures de l'aile (profil NACA 2412), une découpeuse à jet d'eau présente dans les ateliers a été utilisée. Une découpe au cutter de chaque pièce de manière répétée aurait pu être possible. Néanmoins la découpe au jet d'eau augmente grandement la précision de la forme spécifique du profil, ce qui est critique pour une aile aux propriétés attendues. Ce procédé garantit également un grand nombre de nervures toutes identiques en un minimum de temps. Au préalable, il aura fallu générer un fichier dxf du profil pour la découpeuse. Cela a pu être possible en exportant un fichier CAO depuis le site <http://airfoiltools.com/>.

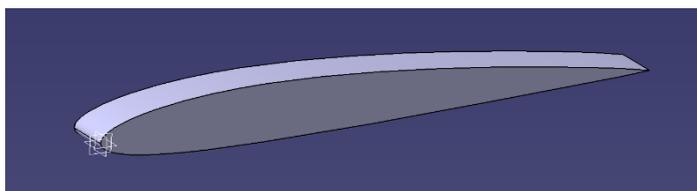


Figure 10 : CAO sous CatiaV5 du NACA 2412



Figure 9 : Découpe des nervures au jet d'eau

Le Dépron étant souple, il était nécessaire de correctement l'immobiliser dans le repère de la machine. Notre plaque a alors été clouée dans un martyr en bois, le tout étant maintenu par des poids sur la grille de la machine.

b) Essais d'architectures

Premièrement, il a été nécessaire de prendre en main le Depron. Des premiers essais de pliages petits formats ont été réalisés avec la méthode dites « des languettes ».

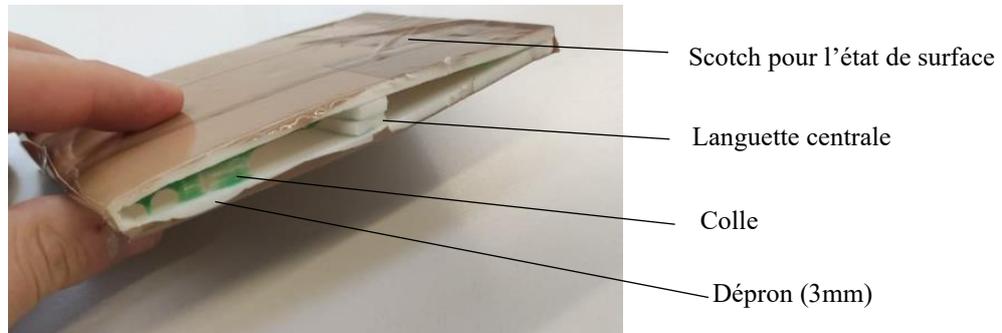


Figure 11 : Premier prototype

Cette méthode est tout à fait viable pour un avion simple, léger et peu coûteux. Le nombre de languette et leur(s) position(s) permettent de choisir le profil de l'aile. Il est alors possible de se rapprocher d'un profil connu (NACA par exemple).

Attention toutefois à la résistance en flexion avec la méthode des languettes : trop de facteur de charge (ressource trop brutale ou un virage trop serré) et c'est la rupture !

A noter que le scotch brun n'est pas utile.

c) Aile finale

Dans un deuxième temps, nous avons repris nos travaux pour mettre au point les ailes définitives. Leur structure interne est composée des nervures citées précédemment (Depron de 3mm vers le saumon, doublées vers l'emplanture), renforcées de longerons (deux tubes de carbone) et de renforts de nervure (Depron de 6mm). La peau de l'aile est réalisée en Depron de 3mm. Les ailes étant hautes, par soucis de rigidité et de simplicité de fabrication, les ailes sont d'un seul tenant. Elles seront alors posées sur le fuselage, maintenues en place par des élastiques comme c'est couramment le cas en modélisme. Les longerons assurent alors une continuité entre les deux ailes. Dans ces ailes, nous avons intégré les deux servomoteurs commandant les ailerons.

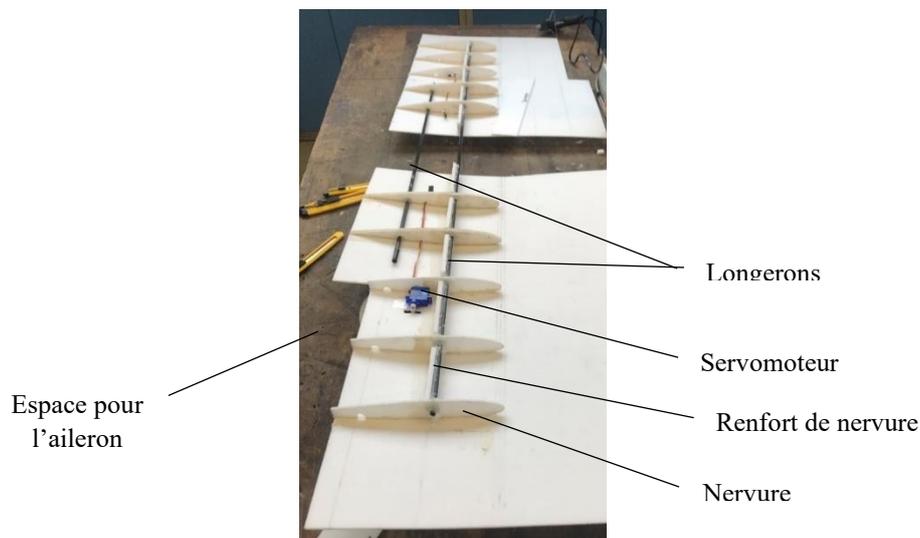


Figure 12 : Structure interne des ailes finales

L'aileron est fixé au bord de fuite par deux charnières un simple morceau de scotch aurait également pu faire l'affaire. Sa mobilité est assurée par une corde à piano reliée au servomoteur, sa rigidité par un tube en carbone.

Attention à faire les gouvernes suffisamment grandes : trop peu de surface et le contrôle en roulis sera mauvais voire inefficace ! Mieux vaut prévoir plus grand et coupé par ensuite...

Le pliage a été réalisé grâce à un décapeur thermique en chauffant le bord d'attaque. La chaleur fait fondre légèrement la surface du matériau, ce qui facilite sa déformation, sans conduire à sa rupture. Attention à ne pas faire fondre le Depron et à bien chauffer plusieurs centimètres en arrière du bord d'attaque, surtout au saumon, afin de libérer les contraintes. Un sèche-cheveux peut aussi fonctionner à condition d'être patient.

3. Fuselage

a) Structure extérieure

Nous avons réalisé le patron du fuselage dans une seule plaque de Depron afin d'assurer une meilleure mise en position des éléments et rigidifier notre structure. Une épaisseur de 6mm a été choisie afin de supporter le poids des éléments embarqués et palier à un éventuel posé difficile.



Figure 13: Forme du fuselage avant (gauche) et après(droite) découpe

Pour les découpes longues dans le Dépron : utiliser un cutter bien affûté au risque de faire des bavures.

Une fois le pourtour extérieur découpé, l'étape suivante est de plier le fuselage pour lui donner sa forme dans l'espace. Le Depron de 6mm étant particulièrement cassant, pour permettre le pliage nous avons d'abord envisagé de faire des biseaux à 45° aux pliures. Cela restait difficile à réaliser de manière régulière sur la longueur.

Nous avons alors opté pour un pliage à l'aide d'un décapeur thermique comme pour les ailes. Hélas, avec cette méthode il est plus difficile de maîtriser le pli et de la torsion est apparue.

Pour du pliage par source chaude, nous conseillons de prévoir des surfaces d'appuis afin de parfaitement donner la forme voulue.

b) Structure intérieure :

Il faut ici obtenir un compromis entre légèreté et rigidité. Nous avons envisagé en premier lieu de créer des languettes de Depron que nous pourrions coller au niveau des pliures. Cette solution a l'avantage d'être particulièrement légère mais beaucoup trop souple pour un avion de notre taille.



Figure 14: Prototype de fuselage, rigidifié par des languettes de Depron aux quatre coins

Nous avons donc opté pour une impression en 3D d'éléments rigidifiant.

Pour le corps principal du fuselage (partie centrale, parallélépipédique), nous avons choisi de renforcer la structure en Depron à l'aide de deux cadres d'épaisseur 5mm. Ils sont placés aux deux extrémités de cette partie centrale du fuselage. Il s'agit de la partie d'appui des ailes, il est donc particulièrement important qu'elle soit en mesure de résister aux efforts s'y exerçant (détails en annexe).

De la même manière, nous souhaitons rigidifier la partie arrière du fuselage. Celle-ci n'étant pas d'une section constante (affinement vers l'arrière) et portant moins d'efforts, nous avons imprimé de simples équerres. Cela comporte l'avantage d'imprimer en 16 exemplaires un seul type de pièce. Les imprimantes utilisées sont de type BambuLab. Les cadres et équerres ont été imprimés ensemble afin de gagner du temps.

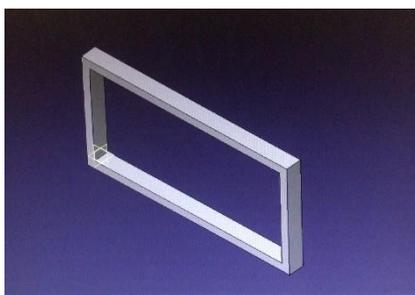


Figure 16 : Réalisation en CAO du cadre de soutien sur CatiaV5



Figure 15 : Impression du cadre et de l'équerre test sur l'imprimante Bambu Lab

Les pièces ainsi imprimées ont été directement collées à l'intérieur du fuselage à la colle chaude universelle (pistolet à colle), tous les 15cm pour les équerres et une à chaque extrémité du milieu du fuselage pour les cadres.

Les cadres sont essentiels pour éviter toutes déformations d'un fuselage aux parois souples, les équerres elles ne sont pas révélées aussi efficaces que prévues.

4. Empennage

L'empennage comporte deux parties : horizontale et verticale. Toutes deux s'emboîtent dans le fuselage. Les parties fixes sont réalisées en Depron d'épaisseur 6mm, les parties mobiles 3mm. Celles-ci sont ensuite rigidifiées par un tube carbone. Les différentes parties ont ensuite été assemblées entre elles et dans le fuselage par imbrication.



Figure 17 : Empennage fixé au fuselage

5. Fixation du moteur

Concernant le moteur, il est fixé au fuselage par une plaque de Depron de 6mm, collé à une plaquette de bois léger dans lequel il est boulonné. Cela permet de le fixer fermement, sans transmettre trop de vibrations. Également, en serrant plus ou moins les quatre vis de chaque coin, il est possible de corriger les effets moteurs. Par son couple et l'effet de son souffle sur les surfaces de contrôle, celui-ci induit un mouvement à cabrer vers la gauche. Il devient alors intéressant de faire légèrement piquer vers la gauche l'axe moteur. Le perçage des trous pour les vis a été réalisé dans les ateliers, à l'aide d'une perceuse à colonne. Une fois le moteur sur son support, il a pu être collé sur le cadre avant du fuselage. Le tout a ensuite été fermé, collé puis scotché avec du scotch renforcé :

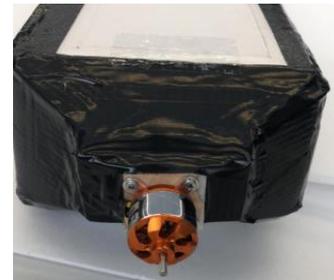


Figure 19 : Première version du nez de l'aéronef

Figure 19 : Mise en position du moteur avant collage

6. Assemblage final

Pour finir, nous avons assemblé les différentes parties de notre aéronef. La mise en position des ailes est faite par des incisions dans le corps du fuselage, le maintien en position par des élastiques. Du scotch renforcé a largement été employé, c'est une valeur sûre.

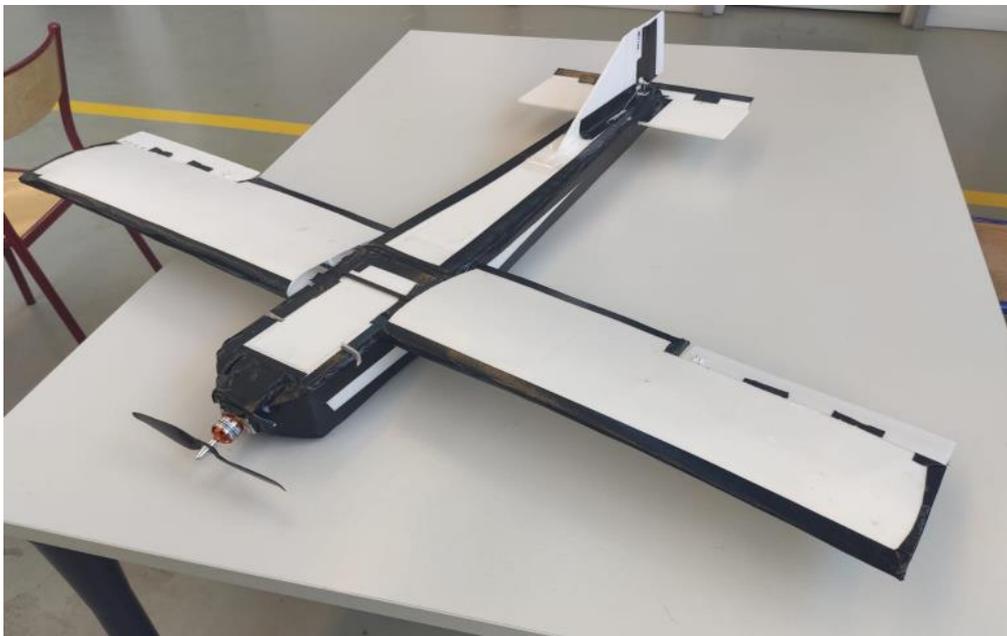


Figure 20 : Olive I terminée

7. Prise en main de l'avion

a) Premiers points fixes

Voici les différentes étapes à absolument respecter avant tout vol, particulièrement le premier :

- Prise en main de la radiocommande, vérification des trims, des canaux et des commandes de vol.
- La validation du centrage de l'appareil.
- Branchement de l'électronique et vérification du contrôle des servomoteurs et moteur.
- Vérification du débattement des commandes : suffisant et sans effort.

b) Premiers vols

En ayant commencés à travailler concrètement sur l'avion mi-octobre, nous avons pu commencer les vols fin novembre. Avant de tenter un vol motorisé, des vols planés ont été réalisés. Cela permet de voir le comportement de l'avion en lui-même sans les effets moteurs. Inutile de mettre plein gaz sur un avion par construction incontrôlable... Accessoirement, en cas de crash l'avion tombe de moins haut.



Figure 21 : Premier vol d'Olive

En cas de conception personnelle, nous conseillons fortement de commencer les essais par des vols planés.

Ce premier vol nous a permis de remarquer plusieurs problèmes à traiter :

- Ailes légèrement dissymétriques : décrochage systématique de l'aile gauche.
- Ailerons et profondeurs trop petits : trop faible contrôlabilité en roulis et tangage.
- Fixation du moteur sensible aux chocs : risque de rupture.

En revanche, ce test nous a permis de cerner les points forts de notre aéronef :

- Le centrage a nécessité de nombreuses masselottes dans le nez afin d'équilibrer l'appareil (environ 1kg). Cela laisse donc une marge confortable pour équiper l'appareil.
- Les procédés de fabrication sont maîtrisés.
- La structure a prouvé sa solidité : rien n'a cassé après 3 atterrissages durs.

c) *Amélioration et résultats*

Les éléments suivants ont été refaits :

- **Les ailes** : puisque les ailerons étaient légèrement dissymétriques et que l'aile gauche était écrasée au saumon, nous avons fait le choix de les refaire. Les techniques employées sont les mêmes que la première fois en rajoutant une nervure au saumon afin de garantir la courbure de l'aile sur toute sa longueur.

Par ailleurs, nous avons ajouté une pièce de Depron découpée aux dimensions des servomoteur, afin de stabiliser leur fixation dans les ailes :

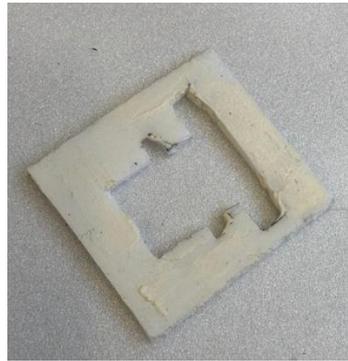


Figure 22: logement sur-mesure en Depron pour servomoteur

- **L'empennage** : il a également été refait en suivant les mêmes méthodes mais en augmentant les surfaces de contrôle et en s'assurant de leur calage par rapport à l'axe de l'avion.
- **Le nez** : nous nous sommes rendu compte que l'hélice était trop proche du fuselage, qui occupait une grande partie du disque d'hélice, réduisant grandement la capacité propulsive. Il a alors fallu démonter le support moteur, imprimer un nouveau cadre à placer plus en avant du nez et y visser le moteur. Cette pièce devait être suffisamment résistante aux chocs et subir les efforts de traction du moteur d'où le choix de l'impression 3D avec un taux de remplissage important. Ce choix permet également de réaliser les trous de passage des 4 vis du support moteur directement sur mesure via perceuse à colonne.



Figure 23: Nez en impression 3D



Figure 24: Fixation du moteur sur le nez

- **Fuselage avant** : afin de rigidifier et renforcer le fuselage avant face aux contraintes qui s’y appliquent (en provenance des ailes et en cas de choc) et pour garantir une fixation optimale avec le nez qui a désormais une masse plus importante, nous avons également conçu en CAO et imprimé une pièce destinée à être glissée dans la partie avant du fuselage. Ce boîtier permettra également d’accueillir l’électronique embarquée et de la protéger le cas échéant.

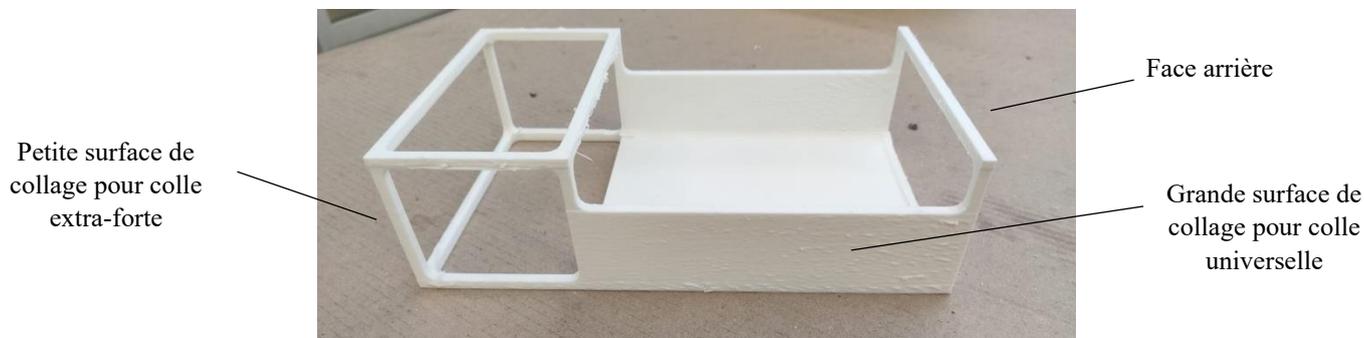


Figure 25: Pièce de renfort du fuselage avant en impression 3D

La géométrie de cette pièce est conçue pour permettre d’y fixer le nez avec une colle puissante (interface PLA/PLA) et pour la fixation dans du fuselage. Les surfaces planes du bas et des côtés permettant une grande surface de collage (interface PLA/Depron).



Figure 26: Collage du nez au renfort de fuselage (à gauche) et colle utilisée (à droite)

Une fois ces modifications effectuées, il a été possible de mener à nouveau des essais en vol plané.

d) Deuxième phase de tests et résultats

Lors des vols planés, certes courts, l’avion a montré des caractéristiques de vols saines. D’après le pilote, il est aisé à maintenir en ligne de vol grâce aux surfaces de contrôles redimensionnées bien plus efficaces. Quelques virages ont également pu être initiés. Les modifications sur les ailes sont donc pleinement satisfaisantes. Par ailleurs, le nouveau nez répond aux attentes en rigidifiant le fuselage. Cette partie est tout à fait encourageante.

Les tests ont malheureusement été trop courts : après 5 vols le servomoteur contrôlant la profondeur a cassé. Fin janvier l’équipe de Bordeaux avait ses partiels et devait ensuite quitter le campus pour rejoindre leurs lieux de stage. Ce faisant, les vols motorisés n’ont pu être entrepris qu’en mars.

Ces vols motorisés ont révélé un avion très cabreur, constamment à la limite du décrochage et instable. A posteriori, sa charge allaire était beaucoup trop mauvaise : les éléments imprimés en 3D étant bien trop lourds.

La masse d’un avion détermine en grande partie ses caractéristiques de vol. Il faut absolument chasser le moindre gramme, attention donc à utiliser l’impression 3D avec modération.

Il a fallu plusieurs phases de tests pour le trimer correctement. Il a ensuite été possible d’installer toute l’électronique de bord puis de commencer la phase de calibration du contrôleur de vol.



Figure 27: Olive I en vol

Malheureusement, Olive a subi un crash suffisamment violent pour endommager irrémédiablement sa structure. Il nous a alors fallu reconstruire un avion à 1 mois de la compétition. Cette fois, nous avons utilisé des plans trouvés sur le net pour gagner du temps et s'assurer d'avoir un aéronef éprouvé.



Figure 28 : Olive II en construction

Le fait de concevoir et construire l'avion était extrêmement intéressant. Nous avons énormément appris mais de toute évidence, se lancer un tel défi sans expérience aucune en modélisme ne garantit pas le résultat.

Pour la conception d'un avion, nous conseillons de trouver un plan déjà existant voire d'acheter un avion complet. Si toutefois un membre de votre équipe a les compétences nécessaires, c'est tout à fait envisageable et encouragé par le barème de Dassault.

Par ailleurs, même sans expérience, il est aisé de prendre en main un hexacoptère ou un quadricoptère. Il en est bien autrement pour un avion qui nécessite des compétences particulières. En club de modélisme, il y a une longue phase d'instruction en doubles commandes avec un instructeur.

N'envisagez pas d'utiliser un avion si aucun membre de votre groupe n'est aéromodéliste !

8. Instrumentation

Une fois la plateforme maîtrisée et fiabilisée, il a été possible d'y installer les instruments nécessaires à la réalisation de sa mission. Olive ayant la charge de détecter puis de retourner la position GPS d'un point chaud, voici les éléments nécessaires.

Il faut veiller à choisir des composants compatibles, notamment concernant les protocoles de communication mis en jeu.

a) *Caméra thermique*

Dans l'optique de rester proche de notre problématique initiale et voulant se démarquer par une méthode de détection innovante, nous avons fait le choix d'une caméra thermique. Les contraintes d'encombrement, de masse et de prix nous ont conduit au modèle MLX 9064X.



Figure 29 : Caméra thermique MLX 9064X

Cette caméra est disponible avec deux objectifs : un grand angle (110°) faible profondeur de champ et un petit angle (55°) avec une grande profondeur de champ. Nous avons opté pour la deuxième solution car la faible profondeur de champ obligerait à voler trop proche du sol.

L'angle de vision ainsi que la fréquence d'acquisition de la caméra sont déterminants pour la vitesse de l'avion et la taille du quadrillage de la zone à surveiller. Afin de s'assurer que chaque point au sol soit vu au moins deux fois par la caméra (deux images), selon la hauteur il faut adapter la vitesse. Par des rapports trigonométriques, à une altitude de 10m et une fréquence d'acquisition de 4 images par seconde, Olive ne devra pas dépasser 20m/s en vitesse sol en espaçant ses passages de 3m ([voir annexe VII](#)).

b) *Tube Pitot*

Afin de piloter de manière précise notre vitesse, nous avons équipé Olive d'un tube Pitot. Dispositif classique en aviation, il permet de mesurer précisément la vitesse air d'un aéronef. Connaissant la vitesse sol par la trace GPS, il est alors possible d'asservir la vitesse air d'Olive selon le vent relatif pour toujours être dans des paramètres de détection optimaux.

La sonde Pitot est scotchée sur l'intrados de l'aile et pointe naturellement vers le nez de l'avion.

c) *Caméra visible*

Une caméra visible USB a été ajoutée afin d'avoir un retour vidéo et permettant de faciliter la calibration de la caméra thermique.

d) *Raspberry Pi4*

Une Raspberry PI 4 permet de faire tourner les différents algorithmes nécessaires à la réalisation de la mission en plus de réaliser la connexion wifi ([voir chapitre VII.3](#)). Il faut compter trois algorithmes principaux :

- Les différentes étapes de la mission,
- La communication avec la station sol,
- La détection.

Lors du dimensionnement des batteries, il ne faut pas sous-estimer la consommation énergétique d'une Raspberry. A noter également que si la Raspberry est branchée à la même batterie que celle alimentant le(s) moteur(s), en cas de remise des gaz brutale induisant un pic de courant, la Raspberry peut être sous-alimentée voire s'éteindre brutalement. Pire : en cas de plantage d'un algorithme et d'une forte consommation de la Raspberry, c'est le

contrôleur de vol qui risque de s'éteindre brutalement. Dans ce cas, ce serait un crash immédiat sans aucune possibilité de rattraper l'aéronef.

La meilleure solution reste la redondance des batteries à bord. Or dans un avion où le poids est si important, ce n'est pas forcément possible. Ainsi, l'alimentation d'une Raspberry doit être étudiée dès le début du projet pour ne pas se retrouver bloqué au moment des essais en vols avec l'ensemble des systèmes à bords.

Ce fût le cas pour nous. Nous avons en effet initié les tests sans la Raspberry et les caméras. Olive volait remarquablement bien. Puis nous avons installé tous les systèmes et une deuxième batterie en veillant bien au centrage. Cette masse additionnelle (environ 400g) a radicalement changé le comportement de l'avion : bien moins agile et nécessitant bien plus de vitesse pour voler ; il n'était plus viable ainsi. Nous avons alors fabriqué une double alimentation à partir d'une unique batterie. Branché ainsi, même au sol, le contrôleur de vol demande trop d'énergie et la Raspberry est sous-alimentée et ne peut donc pas démarrer. Nous travaillons actuellement sur une solution, éventuellement en utilisant un abaisseur de tension.

La question de l'alimentation d'une Raspberry est un point à ne pas négliger. Si est branchée à plusieurs modules USB, elle peut consommer jusqu'à 3 ampères.

Voici une photo d'Olive II complètement équipée et décapotée, le bord d'attaque pointe vers le ciel :

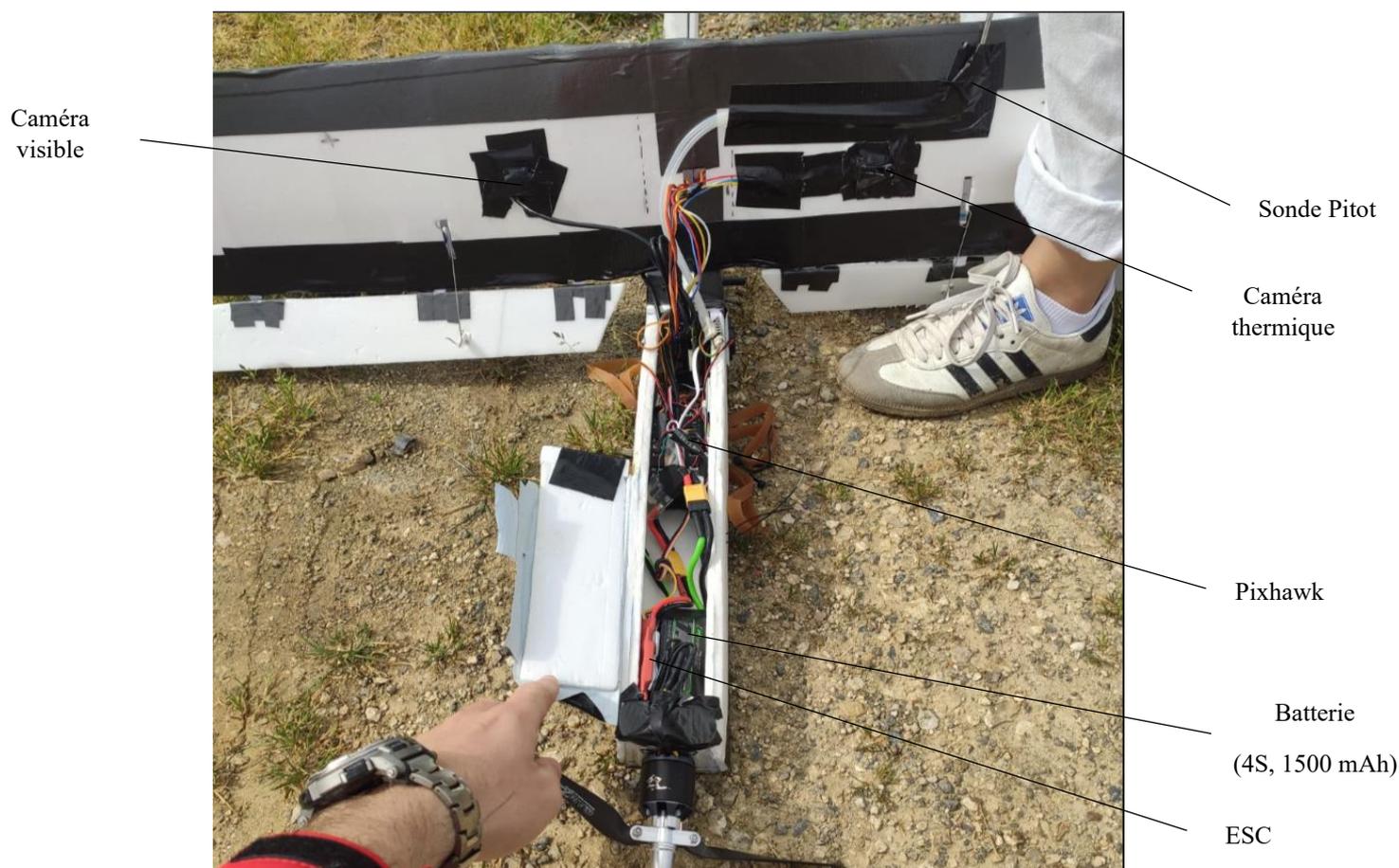


Figure 30 : Olive II complètement équipée



Figure 31 : Olive II prêt au vol

e) Réglementation DGAC

Olive pesant plus de 800g, il est obligatoire d'y installer une balise transmettant en temps réel sa position aux organismes de contrôle aérien. Cela impose également d'avoir un pilote déclaré ayant réalisé l'examen alphanango. (5)

9. Gestions des Essais

Que ce soit pour l'avion ou le drone, il faut tester, tester et encore tester sans craindre de se lancer. La préparation de ces tests reste primordiale : ainsi, lorsque comme dans notre cas il y a peu de sessions de tests et que le terrain de vol est loin : il faut rentabiliser chaque vol. Il faut donc absolument planifier la campagne d'essais, décrire avec le plus de précisions possibles chaque vol, la chronologie et les éléments à tester, les attendus et que faire en cas de problème. Malheureusement, nous n'avons pas pris le temps de correctement le faire ce qui a causé des pertes de temps facilement évitables.

Également, il est important de réaliser une check-list des éléments à emmener pour les essais (télécommandes, batteries de rechange, nécessaire de réparation, câbles et antennes, etc...). Cela évite des allers-retours inutiles, à nouveau particulièrement si le terrain de vol est loin. A noter que les items d'une check-list doivent être effectivement vérifiés et non pas simplement énoncés à haute voix.

Nous conseillons donc de préparer au maximum les vols d'essais et de rédiger des check-lists afin de ne pas oublier de matériel.

VI. Développement de l'hexacoptère

Concernant Popeye, comme indiqué nous l'avons récupéré gracieusement d'une autre association étudiante de l'école. Nous avons alors pu nous concentrer sur sa prise en main et l'intégration des systèmes.

1. Prise en main

Il a dans un premier temps fallu se renseigner sur les différents éléments constituant le drone afin de connaître leurs caractéristiques. Il s'agit alors de lire de la documentation et se renseigner sur les points forts mais particulièrement les fragilités du modèle en question. Les retours d'expériences de la communauté d'utilisateurs sont tout particulièrement intéressants.

Dans notre cas, il s'agit d'un drone Tarot 680 Pro. La plupart de ses composants sont disponibles en pièces détachées ou sinon toutes remplaçables par de l'impression 3D. Seul le cadre est n'est pas remplaçable, il s'agit donc d'une pièce critique à ne pas endommager. [Si plusieurs drones sont disponibles bradés sur Leboncoin avec une même pièce endommagée, ça donne une bonne idée de sa criticité....](#)

Attention à ne pas sous-estimer le temps d'intégration des pièces imprimées 3D : il faut systématiquement plusieurs impressions pour obtenir une pièce bonne ; le nombre d'itérations augmentant avec le degré de complexité de la pièce.

Lorsque nous connaissions suffisamment le drone, nous avons pu entreprendre de débiter les vols. En comparaison avec un avion, un drone est aisé de pilotage. Cela permet à des novices complets de pouvoir se faire la main de façon autonome.



Figure 32: Popeye en stationnaire automatique

Si vous n'êtes vraiment pas à l'aise, des logiciels de simulation existent pour s'entraîner en vue du premier vol : RealFlight Trainer pour les voilures fixes et hélicoptères ou FPV Freerider pour les drones.

Nous conseillons de réaliser les premiers vols avec le minimum de système à bord pour éviter toutes casses inutiles en cas de crash.

Nous conseillons de débiter par de petits sauts de puces afin d'estimer la manœuvrabilité du drone. Il faut ensuite rapidement s'éloigner du sol afin de pouvoir rattraper les situations hasardeuses. Etrangement, les collisions avec le sol surviennent lorsque l'on est proche du sol...

2. Instrumentation

La mission de Popeye est de décoller sur ordre d'Olive afin de confirmer la présence d'un feu puis de larguer une charge (représentant un moyen d'extinction) de façon autonome. Il s'agit donc de rallier un point GPS, de réaliser une nouvelle détection par un moyen différent qu'Olive (afin de croiser les détections pour éviter tout faux positif), effectuer un ciblage, le largage de la charge puis revenir se poser en sécurité.

Il a été décidé d'employer le machine learning afin de réaliser cette deuxième détection ([voir partie VIII.3](#)). Le ciblage autonome est détaillé en [partie VII.4](#).

Dès lors, en plus du nécessaire pour permettre le vol autonome (voir prochaine partie), voici en détails les éléments installés à bord de Popeye.

a) Caméra de ciblage

Il s'agit d'une caméra de type FHD06H-SFV filmant le spectre visible. De bonne qualité, elle a été trouvée sur Leboncoin à 9€. Elle est montée sur Popeye à l'aide d'un support dédié imprimé en 3D.



Figure 33: Caméra visible dotée d'un zoom USBFHD06H-SFV

Il ne faut pas hésiter à consulter les sites de secondes mains, on peut y trouver de belles surprises.

b) Raspberry PI4

L'enjeu de la Raspberry de Popeye est de faire également tourner les algorithmes de gestion de mission et de communication mais surtout celui de ciblage.

A la vue de la capacité d'emport de Popeye, nous avons opté pour une batterie imposante permettant d'alimenter la Raspberry et le contrôleur de vol en parallèle. Le câble USB-C alimentant la Raspberry est soudé à la sortie du bec d'alimentation, lui-même branché sur la batterie. Cette batterie est soutenue par un boîtier imprimé en 3D et fixé sur le châssis par des rilsans.

c) Système de largage

Il a été adapté à partir d'une CAO trouvée sur le net. Il est construit autour d'un servomoteur et d'un jeu de pivots permettant de convertir le mouvement de rotation en mouvement linéaire permettant de libérer la charge. La sécurité est garantie par le blocage du servomoteur qui empêche tout mouvement dès qu'il est alimenté. La charge est positionnée au niveau du centre de gravité de Popeye.

Le système de largage est vissé sur le support de la batterie grâce à des inserts. Il s'agit de filetages que l'on vient insérer à chaud avec un fer à souder dans le PLA. Celui-ci fond autour de l'insert, le piégeant en refroidissant.

Les inserts filetés permettent de visser facilement dans une pièce imprimée en 3D. Cela permet d'avoir un ensemble de pièces moins complexe et de n'en changer que certaines en cas de casse.

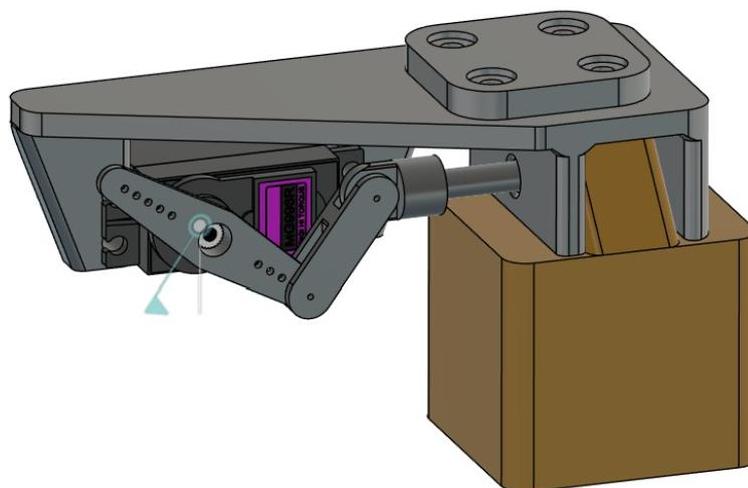


Figure 34 : CAO du système de largage

La charge en elle-même est un cube d'acier emboîté dans un support imprimé en 3D. Le maintien se fait par des rilsans. L'ensemble pèse 500g, la masse donnant le maximum de points selon le barème de Dassault.



Figure 35: Masse largable et système de largage complet

d) Réglementation DGAC

Tout comme l'avion, le drone pèse plus de 800g et nécessite donc une balise DGAC et un pilote ayant passé l'examen Alpha Tango.

VII. Vol autonome

Dans cette partie, nous allons lister les moyens et dispositifs permettant l'automatisation de Popeye et Olive. Nous considérerons comme autonome un vol où l'aéronef suit une trajectoire prédéfinie sans aucune « input » du pilote.

1. Automate de vol

Afin de permettre le vol autonome, il est nécessaire que chaque aéronef dispose d'un contrôleur de vol. Celui-ci pilote les surfaces de contrôles et/ou le(s) moteur(s) selon l'attitude de l'aéronef et la consigne. Ce contrôleur requiert un algorithme adapté et si possible une interface pratique d'utilisation.

a) Le contrôleur de vol Pixhawk

Dans le domaine du vol autonome, le contrôleur Pixhawk est souvent utilisé. Il s'agit d'un ordinateur de bord temps réel comportant accéléromètre, baromètre et gyroscope. Il est le plus souvent vendu en kit comportant : GPS, bouton de sécurité, buzzer sonore et câblage. Il faut compter une centaine d'euros et il se trouve relativement facilement en seconde main pour moitié prix.



Figure 36 : Exemple d'un kit Pixhawk

b) L'autopilote Ardupilot

ArduPilot est une plateforme open source de pilotage automatique utilisée pour contrôler une large gamme de véhicules autonomes : drones (multirotors, avions, hélicoptères), véhicules terrestres, bateaux et même sous-

marins. Développé en C++, il est hautement configurable et supporte une grande variété de capteurs, GPS, contrôleurs de vol et systèmes embarqués. Grâce à sa communauté active, ArduPilot est constamment mis à jour et reste l'une des solutions les plus fiables et puissantes pour la robotique mobile autonome.

Une fois l'architecture de l'aéronef choisie, il faut suivre rigoureusement les phases de calibration décrite dans la documentation Arducopter/Arduplane. Toutes les étapes y sont décrites dans le détail. Cela peut prendre du temps mais est déterminant afin d'avoir un vol stable et un système robuste. Il s'agit par exemple de choisir basiquement le type d'aéronef (avion, hélicoptère, multi-rotors) mais également la puissance nécessaire pour le vol stationnaire ; paramètre crucial pour l'ensemble des modes automatiques.

La calibration de l'automate doit être réalisée rigoureusement selon la documentation et le plus complètement possible.

Ardupilot comporte de nombreux modes de vols qui couvrent une très grande partie des types de vols nécessaires dans le cadre du Dassault UAV Challenge. La totalité des workshops mandatory peuvent être réalisés uniquement en usant de modes natifs d'Ardupilot. A titre d'illustration, les modes de vols les plus utiles pour un drone sont :

- Stabilize : correspond au pilotage manuel, obligatoire pour les multi-rotors,
- RTL (Return To Launch) : retour autonome au point de décollage,
- PosHold : pilotage en position GPS,
- AltHold : maintien de l'altitude,
- Auto : appelle la mission en mémoire.
- Land : atterrissage à la position GPS actuelle.

Il est également possible de paramétrer des sécurités : les failsafe. Ils permettent de préprogrammer le comportement que l'aéronef doit adopter en cas de batterie faible ou de perte du signal par exemple.

Une documentation très complète (en anglais), des tutoriels et de multiples forums rendent son utilisation facile.

Ne pas hésiter à passer du temps en début de projet pour éplucher la documentation Ardupilot, c'est une étape importante pour le bon déroulement du projet.

c) *Le logiciel MissionPlanner*

Il s'agit d'une interface graphique permettant d'envoyer des ordres MAVLink mais aussi de les recevoir et de les afficher de manière compréhensible pour un humain : elle permet le monitoring au sol du drone tout comme sa configuration et la planification des missions.



Figure 37 : Interface de MissionPlanner, avant connexion au drone

MissionPlanner dispose également d'un éditeur de mission permettant d'indiquer les différents waypoints (WP) et les paramètres associés (vitesse et altitude notamment). Un outil permet notamment de réaliser le cadrillage d'une

zone délimitée en contrôlant le maillage. La mission doit ensuite être enregistrée sur la carte SD, via MAVLink, de la Pixhawk et sera lue dès l'enclenchement du mode Auto.



Figure 38 : Exemple d'emploi de l'outil de cadrillage natif de MissionPlanner

L'autre fonctionnalité primordiale de ce logiciel est de permettre le flash d'une Pixhawk sous Ardupilot. Il faudra donc nécessairement passer par **MissionPlanner** si vous ne voulez pas utiliser PX4, le concurrent actuel d'Ardupilot.

MissionPlanner n'est malheureusement pas disponible sur Linux et il faudra privilégier QGroundControl ou MavProxy pour une utilisation va Ubuntu.

QGroundControl peut être utile en première approche mais dans le cadre de la programmation de missions complexes, nous conseillons l'emploi de MissionPlanner afin d'avoir plus la main sur les paramètres pilotant l'automate de vol.

Il existe une version Android et IOS de MissionPlanner mais nous n'avons pas pu la tester.

Dès lors, ce triptyque Pixhawk – Ardupilot – MissionPlanner, fiable, reconnu et versatile, est idéal dans le cadre du Dassault UAV Challenge. C'est une valeur sûre et sa communauté active est d'un grand secours. Il faut peut-être passer un peu de temps au début afin de le prendre en main mais c'est du temps bien investi qui évitera de réinventer la roue par après.

2. ROS2 et machine à états

MissionPlanner permet de programmer des missions complètes mais cela ne couvre pas l'entièreté du spectre des possibles. Voulant faire voler deux drones simultanément et voulant qu'ils puissent communiquer ensemble, nous avons besoin d'un système permettant de manipuler les modes Ardupilot et de coordonner les drones.

Un des membres du groupe étant spécialisé en robotique (Stépane), il a pu apporter son expertise dans le contrôle d'automate et la programmation de machine à état. Nous avons alors fait le choix d'employer ROS 2 (Robot Operating System 2). Il s'agit d'un framework open-source conçu pour le développement de logiciels robotiques. Concrètement, nous nous en servons afin de manipuler les différents scripts python permettant la réalisation de nos missions tout en permettant l'échange d'informations entre les drones et la station sol par un environnement numérique commun (partage de variables) à l'aide de la WiFi.

Cette communication est assurée par le protocole MAVLink et l'utilisation de la bibliothèque PyMavLink pour le contrôle des drones, une machine à états finis (FSM) pour la gestion des missions et le traitement des données de la caméra pour la perception de l'environnement.

Plus précisément, le node `MAV_manager__node` gère la communication avec l'UAV via le protocole MAVLink, permettant l'exécution de commandes telles que le changement de mode de vol, l'armement et le désarmement, le

Il existe un package ROS2 permettant le partage des topics et autre interfaces ROS2 via MAVLink nativement : MAVRos. Cependant, ce dernier est très complexe et dur à prendre en main et son portage sur ROS2 est très peu documenté et encore en cours. De longues heures ont été dédiées à sa prise en main mais n'ont pas abouti à des résultats satisfaisants. C'est surtout le fait que ce package soit une boîte noire et que son implémentation sur Rasp3 soit compliqué (build trop long) qui nous a forcé à l'abandonner au profit d'une solution custom utilisant PyMavLink.

Une autre possibilité aurait été d'utiliser MAVSKD mais son implémentation n'est pas vraiment compatible avec Ardupilot et ROS2 ce qui aurait posé une double barrière technique qui aurait été dure à franchir dans les temps.

Sauf nouveautés, nous conseillons de ne pas utiliser MAVRos avec ROS2 dut au manque de documentation et à la simplicité de construction d'une bibliothèque custom en utilisant PyMavLink.

Cependant, ROS2, contrairement à Ardupilot, est difficile d'accès. Il faut avoir un très bon bagage en robotique et en informatique afin de pouvoir l'utiliser. De plus, certaines fonctionnalités manquent de documentation claire ou à jour. C'est pourquoi, malgré les efforts des membres du groupe, personne d'autre que Stéphane n'est parvenu à prendre en main ROS2. De plus, les scripts python ont besoin d'être rédigés et adaptés en connaissance de ROS2. Stéphane était alors seul à pouvoir avancer sur la partie programmation.

3. Simulation SITL : System In The Loop

Afin de pouvoir tester nos programmes, nous avons aussi utilisé de manière importante le SITL **natif** d'ArduPilot. **Facile de prise en main, il a permis d'avancer à distance, sans test et risque pour** le matériel physique.

Nous conseillons d'utiliser le SITL d'ArduPilot pour limiter les risques, celui-ci est simple à prendre en main.

Enfin, nous aurions aussi aimé utiliser Gazebo et Rviz pour renforcer les capacités de mouvement autonome du drone mais cela a été impossible dans les délais. L'utilisation du SITL de PX4 a aussi permis de démontrer un certain nombre de capacités de ce **contrôleur** mais nous avons préféré la simplicité de celui d'Ardupilot qui est beaucoup plus léger et donc plus simple à utiliser avec WSL où l'on ne peut pas utiliser le GPU.



Figure 41: SITL de PX4 et simulation physique utilisant Gazebo.

A plus long terme, Stéphane envisage de développer une interface entre Ardupilot et Gazebo simple et intuitive afin de pouvoir ajouter des capacités d'évitement au drone en le dotant d'un lidar 1 nappe (2D). Cela reflète l'avantage de ROS2 qui permet d'augmenter facilement le potentiel d'un projet en contrepartie d'une prise en main et mise en œuvre bien plus longue. Cependant de nombreuses barrières techniques restent à franchir, notamment le manque de puissance de calcul d'une Raspberry Pi 4 que nous n'avions pas prévu et qui nous limitent beaucoup actuellement.

4. Architecture de communication

Nos drones disposent de 3 moyens de communication :

- Radio 433MHz : pilotage manuel et communication par le protocole Mavlink avec la pixhawk. Il s'agit de la plage de fréquences usuellement utilisées en aéromodélisme.
- Radio 2,4GHz : balise DGAC.
- Wifi : permis par les Raspberry contrôlés en SSH.

Dès lors, il faut attentivement étudier les portées de chaque canal de communication. En télécommunication, la portée est le fruit du module en lui-même, du protocole de communication employé, et bien sûr du couple émetteur-récepteur : sa nature et sa position.

La balise DGAC n'est pas un souci, avec une antenne appropriée il est possible d'atteindre plusieurs kilomètres de portées. Elle n'a de plus qu'un rôle passif d'émission de sa propre position et de son identifiant unique afin de permettre aux autorités d'identifier le drone le cas échéant. Elle ne joue donc pas de rôle dans le contrôle de l'avion.

Les antennes employées pour la Pixhawk permettent une portée constructeur de 1,5 km. Dès lors c'est la télécommande qui devient le facteur limitant : le drone perdant la connexion avec le pilote avant de perdre MissionPlanner ce qui déclenche le failsafe associé et provoque un RTL. Même si sécuritaire, cela empêche de s'éloigner de la télécommande dans le cadre d'une mission contrôlée. Nous cherchons actuellement un moyen de contourner ce problème tout en pouvant reprendre le contrôle manuellement à tout moment (exigence de la compétition).

Le wifi permet d'interagir avec les Raspberry par SSH (« Secure Shell »), cela impliquant de les avoir configurées sous Linux.

Attention de flasher une version Linux compatible avec le modèle et les capacités de la Raspberry – Ubuntu server 22.04 a été notre choix.

C'est par wifi que les informations sont partagées dans l'architecture ROS2 et que les flux vidéo transitent. Il est alors nécessaire de prévoir un réseau suffisamment puissant pour gérer toutes ces informations mais surtout ayant une portée suffisante. Au début du projet, nous avons sous-estimé ce problème ce qui a conduit à l'achat en urgence d'un répéteur wifi puissants.

Attention à choisir des canaux de communication compatibles avec l'information à transmettre mais surtout permettant une portée suffisante.

5. Langage autonome

Nous avons voulu donner à Popeye une capacité de langage autonome. L'idée étant que lorsqu'il arrive sur la position indiquée par Olive, il allume sa caméra puis cherche à se positionner seul sur sa cible avant de réaliser de façon autonome de langage. S'en suivra alors un RTL standard.

Pour se faire, nous avons donc développé un système de langage adéquat mais également un algorithme de ciblage. Cet algorithme sous python tourne sur la Raspberry embaquée et prend en entrée un flux vidéo, opère une reconnaissance d'image par machine learning puis déduit la position du drone par rapport à la cible. Il détermine alors les corrections en x,y à apporter pour se positionner vertical à la cible. Ces corrections sont transmises à la Pixhawk qui les applique puis un cycle peut recommencer. Des corrections en deçà d'un certain seuil et après un certain nombre de cycles traduisent que Popeye est au-dessus de la cible. Il peut alors descendre à l'attitude de langage puis se séparer de la charge.

Le facteur limitant est ici l'algorithme de Machine Learning qui sur la Raspberry n'est capable de traiter une image que toutes les deux secondes. Popeye procède alors par incréments en faisant attention de prendre la nouvelle image uniquement lorsqu'il arrive à la position indiquée à l'itération n-1.

6. Atterrissage autonome par Machine Learning

Au début du projet, lorsque nous n'avions pas encore récupéré Popeye, nous voulions donner à l'avion la capacité d'atterrissage autonome par computer vision, celui-ci étant déjà doté d'une caméra. Notre idée était de déployer une piste d'atterrissage matérialisable par des objets caractéristiques à l'image (plots, bandes blanches, autre), qu'un algorithme de Machine Learning aurait été capable de reconnaître. Nous avons également envisagé de réaliser un guidage par des balises radio (type ILS) mais avons abandonné à cause du prix.

Nous avons opté pour la solution de Machine Learning qui a donné des résultats très encourageants. Nous avons utilisé l'algorithme de reconnaissance d'objets en Open Source YOLO v5. Entraîné sur un data set d'un milliers d'images issues du simulateur de vol FlightSimulator2020 et préalablement labellées pour permettre l'apprentissage, notre algorithme a donné des résultats encourageants pour l'identification des bordures de la piste ainsi que son axe central.

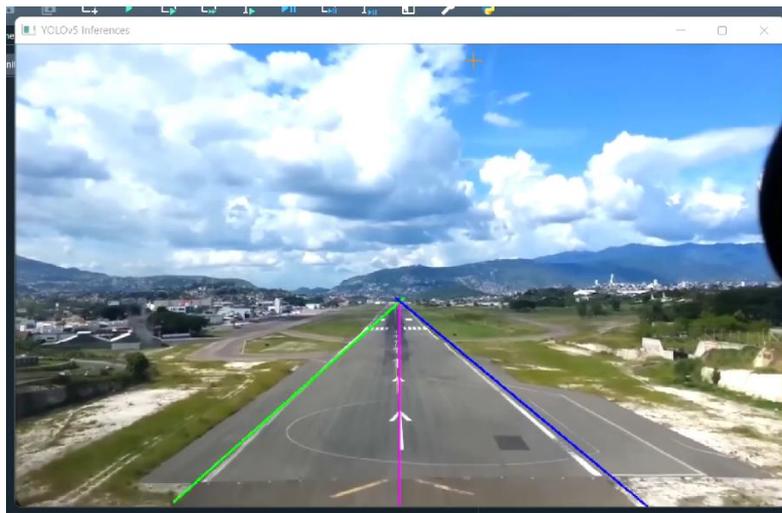


Figure 42: Inférence du modèle prédictif sur les bordures gauches, droites et la ligne centrale de la piste d'atterrissage.

La détection de ces trois paramètres est particulièrement utile pour le positionnement latéral par rapport à la piste, mais aussi pour déterminer la position par rapport à la pente d'approche : plus l'avion est bas, plus l'angle entre le bord droit et le bord gauche paraîtra à l'image comme ouvert. Il aurait donc été facile de créer un algorithme permettant, à partir de ces inférences, de déterminer la position latérale et verticale de l'appareil par rapport à la piste et d'appliquer les actions correctives si besoin.

Il aurait également fallu équiper Olive d'une sonde permettant d'estimer précisément sa hauteur (idéalement un LIDAR) afin de déclencher l'arrondi au bon moment. Également, il aurait été intéressant de réfléchir à automatiser au plus possible le circuit de piste avec une prise en compte du vent pour le sens d'atterrissage.

Cependant, par soucis de temps, la récupération de l'hexacoptère Popeye a modifié nos priorités et nous avons laissé de côté cette solution qui aurait été chronophage à développer.

VIII. Procédures de détections

Après avoir vu les moyens employés pour la détection, il est maintenant temps de détailler comment fonctionnent ces moyens.

1. Détection de point chaud par seuil thermique

Il s'agit ici de la détection réalisée par Olive équipée d'une caméra thermique MLX9064X. Cette caméra retourne en vérité une grille de températures correspondant à la moyenne de température de chaque pixel. Il suffit alors de déterminer un seuil de détection minimal puis de retourner la position dans l'image des pixels concernés. Connaissant la position GPS de l'avion, son attitude, la position de la caméra par rapport au GPS et son angle de vue, il est possible de passer de la position du pixel dans l'image à une position GPS du point chaud.

Nous avons réalisé plusieurs essais afin de comprendre comment se faisait cette « moyenne de température » pour chaque pixel. En effet, plus la caméra est éloignée du sol, plus chaque pixel représente une grande surface au sol. C'est la température moyenne de cette surface que retourne le pixel. Dès lors, il faut trouver le compromis entre altitude, surface chauffée et température de sorte à ne pas « noyer » notre source de chaleur dans le bruit ambiant. Nous avons essayé avec une bouilloire offrant une température de 75°C pour une petite surface. La détection était possible à 8m.

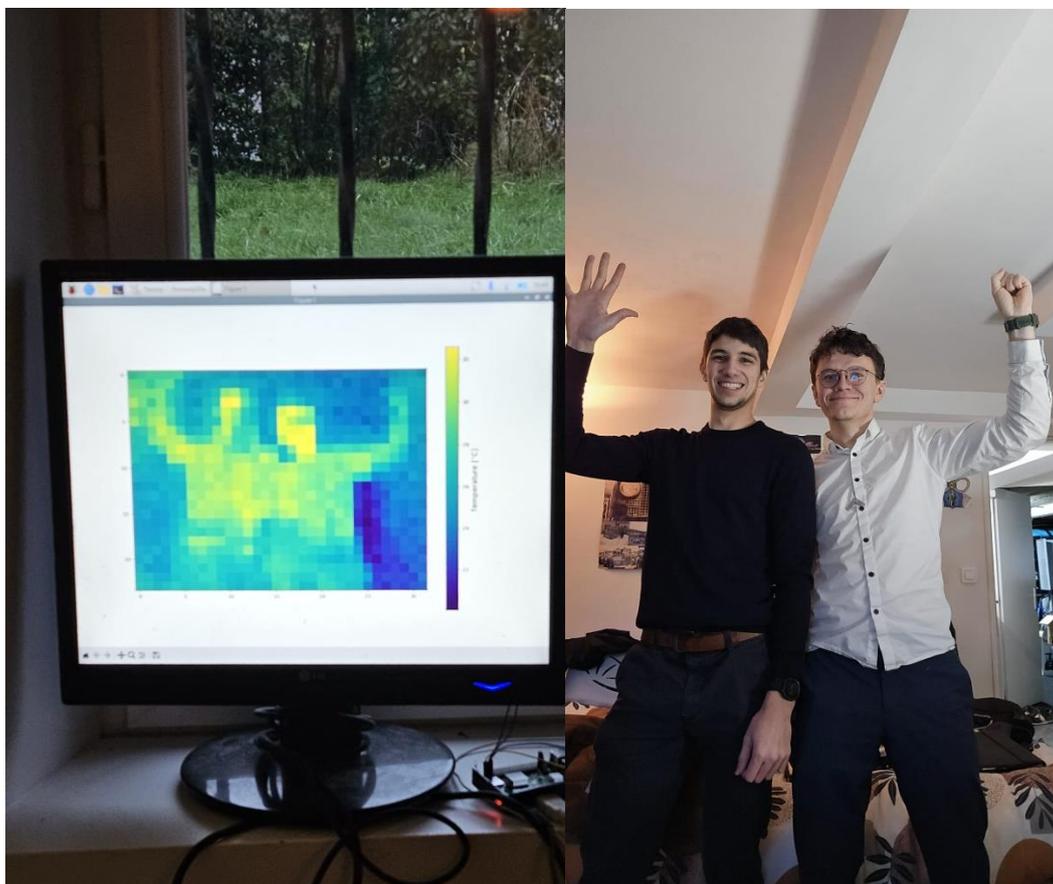


Figure 43: Détection thermique fonctionnelle

Nous avons pu faire fonctionner les caméras en vol, depuis Popeye dans un premier temps :

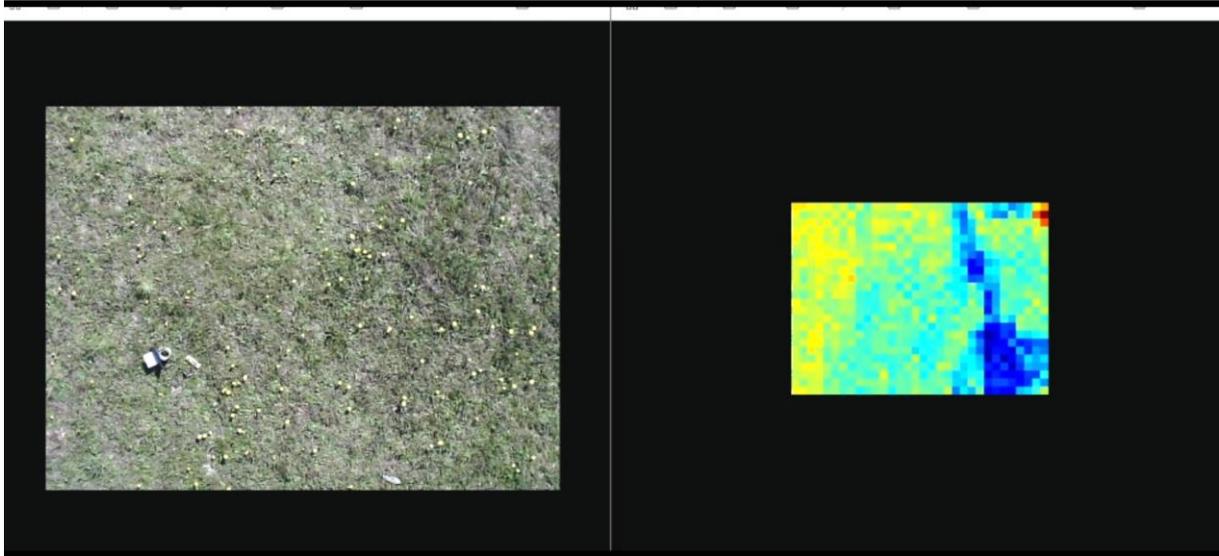


Figure 44: Stream vidéo des caméras thermiques et visible en vol depuis Popeye

La connectivité par Wifi s'est montrée très mauvaise, avec de gros problèmes de latence. Dans le cadre d'une mission autonome, cela ne pose pas de problème fondamental puisque le traitement des images est embarqué, mais cela complexifie la tâche de contrôle de la situation pour la station sol.

Malheureusement, nous n'avons pas eu le temps d'essayer la détection en vol depuis Olive à cause du problème d'alimentation de la Raspberry. Cette détection est actuellement sérieusement compromise. Nous travaillons sur une solution pour alimenter la Raspberry de façon sécurisée à bord d'Olive. Si nous ne parvenons pas à l'implémenter à temps, nous travaillons en parallèle sur une marche dégradée où Olive est dépourvu de Raspberry et donc n'opère pas du tout la détection.

Nous insistons sur la problématique de la puissance disponible à bord : les meilleurs algorithmes du monde sont bien impuissants sans énergie.

2. Identification de patterns par la bibliothèque OpenCV

Afin d'aboutir à une reconnaissance d'image par machine learning, il a d'abord fallu calibrer la caméra. Nous avons pour cela testé la calibration proposée par OpenCV mais les résultats n'ont pas été très convaincants, cela semble venir du fait que la caméra a une FOV trop importante. Il existe de nouvelles techniques pour résoudre ce problème mais nous sommes partis sur une solution plus simple. Avec un peu de trigonométrie et quelques mesures avec une caméra scotchée au plafond, nous avons pu calibrer approximativement la caméra.

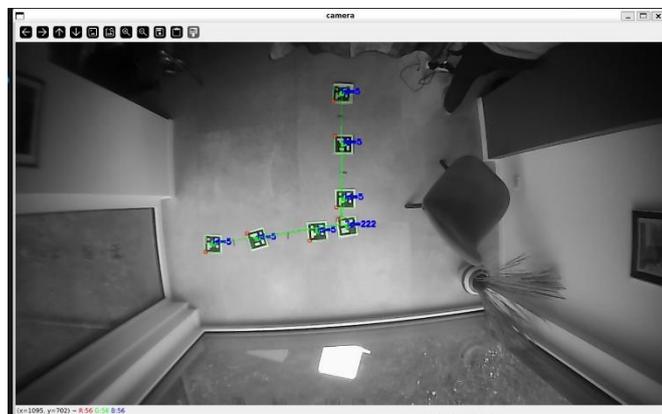


Figure 45: Calibration de la caméra.

Une étape de calibration est obligatoire pour de la reconnaissance d'image, particulièrement avec un FOV important.

3. Identification de patterns par Machine Learning

Initialement, cette volonté vient de l'état de l'art que nous avons réalisé au tout début du projet concernant les drones de surveillance d'incendie. D'après le sapeur forestier interrogé au début du projet, il s'est avéré que des tentatives avaient déjà été faites en conditions réelles mais sans être concluantes. La solution testée reposait en la détection de fumée par analyse des particules dans l'air. Il n'est pas forcément évident de développer une méthode parfaitement fiable capable d'identifier automatiquement un feu naissant. L'analyse thermique apporte une bonne solution mais risque de générer de nombreux faux positifs. De plus, le jour de la compétition, ne pouvant pas reproduire les conditions thermiques d'un feu de forêt, il nous a semblé pertinent d'avoir un drone doté d'un système de reconnaissance qui permet de confirmer la présence d'un objet prédéfini. Une fois le système implanté, il serait facile d'entraîner l'algorithme à reconnaître un autre type d'objet (comme un feu réel à partir d'un jeu d'images) et de le déployer en conditions réelles. Nous avons donc doublé la détection thermique par une deuxième détection. Félix ayant déjà travaillé sur l'algorithme d'atterrissage autonome, nous avons pu réorienter son travail afin de détecter une cible, en l'occurrence un logo représentant une flamme.

La détection repose sur un nouveau modèle prédictif en machine Learning, YOLOv8. Un jeu d'environ 200 photos, qui a pu être étendu à environ 500 images par des outils de modification d'images (rotations, distorsions...), a été créé et labellé.



Figure 46: Logo flamme qui a été utilisé pour l'entraînement du modèle YOLOv8

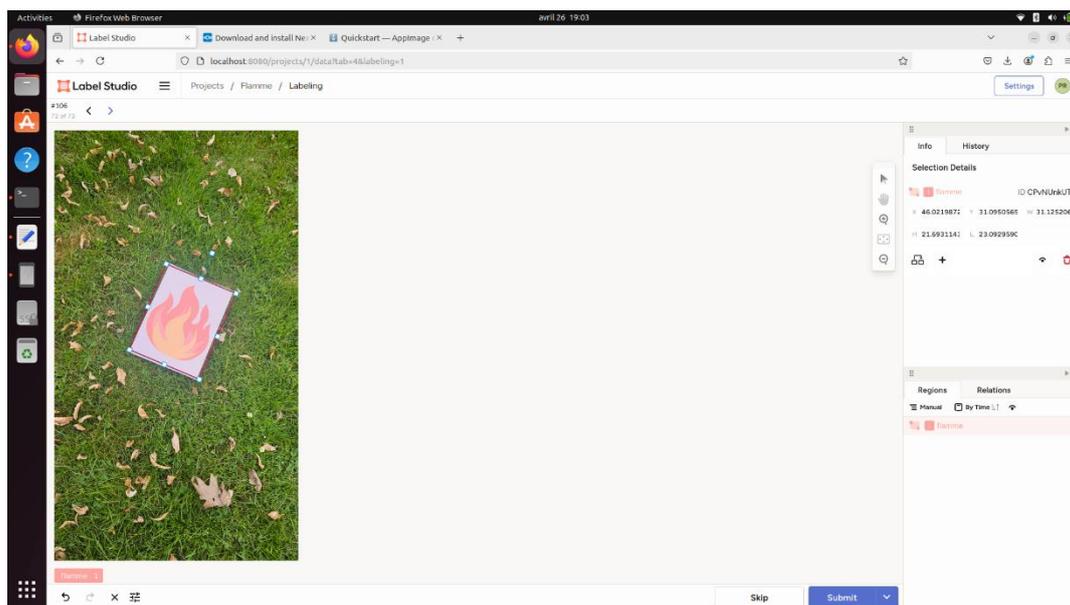


Figure 47: Etape de labelling avec le logiciel LabelStudio

Une fois l'entraînement effectué, les résultats étaient plus que prometteurs : nous avons peu de faux positifs et nous étions capables d'extraire les coordonnées de la « bounding box » bleue nous permettant de repositionner le drone.

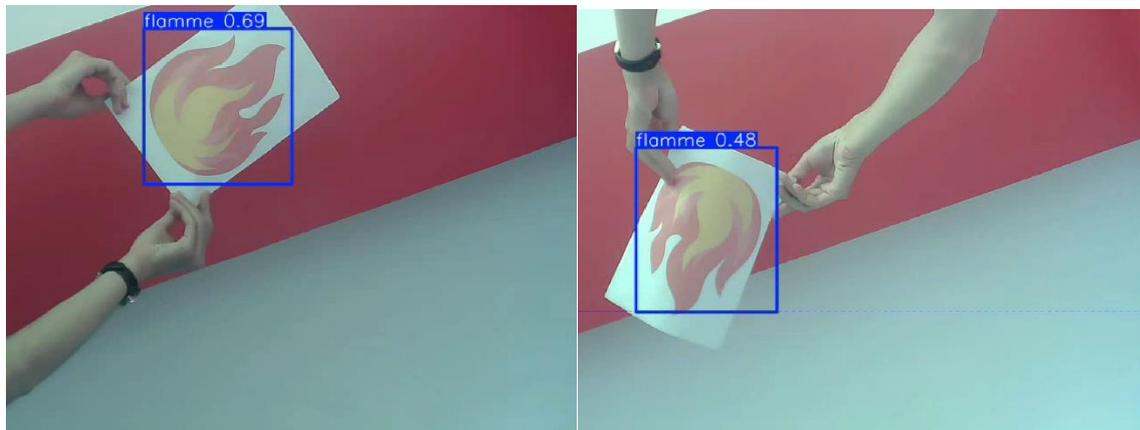


Figure 48: Inférence du modèle prédictif implémenté à bord de l'hexacoptère, utilisant la caméra visible embarquée et la Raspberry PI

Testé sur la Raspberry, cet algorithme de Machine Learning est capable de traiter une image toutes les deux secondes. Malheureusement, nous n'avons pas pu le tester en vol car un problème d'appairage des antennes 433MHz nous a fait perdre la dernière semaine de tests avant la compétition. Les CPU des Raspberry se sont aussi révélés totalement dépassés pour gérer la capture et le traitement des images en même temps que le programme principal de pilotage du drone sous ROS2.

Nous allons ainsi à la compétition avec quelques incertitudes mais cela fait partie d'un tel projet, particulièrement à distance où les phases de travail et de tests sont comptées. Conscients de ces incertitudes, nous mettrons tout en œuvre pour démontrer, avec fierté, les capacités des aéronefs que nous avons développés

IX. Budget détaillé

1. Budget alloué et financement

Dans le cadre du DUAVC, les équipes finalistes disposent de 500€ de subvention par Dassault Aviation, et le coût du projet total ne doit pas dépasser les 1000€ si un financement additionnel est disponible.

Avoir deux appareils implique le besoin de doubler tous les systèmes et donc des coûts élevés. Une gestion du budget rigoureuse doit être effectuée. Pour mener à bien notre mission, nous avons démarché l'incubateur de projets affilié à l'école des Arts et Métiers : CaMéx-IA. Celui-ci a généreusement accepté de financer la part restante de notre projet qui comprend l'implémentation de reconnaissance d'image par IA.



Figure 49 : Logo de l'incubateur de projets CaMéx-IA

Nous avons aussi bénéficié de l'expérience des membres de l'équipe en robotique et en aéromodélisme, ce qui nous a permis de rassembler beaucoup de matériel déjà en notre possession : radiocommandes, chargeurs, batteries, récepteurs, outils... Nous avons ainsi évité au maximum d'acheter du neuf et avons pu appliquer de nombreuses décotes pour du matériel d'occasion, sans quoi le budget aurait été dépassé.

2. Gestion de trésorerie

Deux tableaux Excel ont été mis en place pour une gestion efficace de la trésorerie : l'un fait l'inventaire des factures dont nous disposons, l'autre, intitulé Pilotage des coûts, recense les coûts par item acheté. Ce deuxième nous permet d'avoir une vision globale de l'état financier du projet à tout instant : part du budget consommé, surveillance des coûts de chaque sous-système et suivi des dépenses de chaque membre afin d'assurer les remboursements. Il nous permet également d'assurer le suivi des tarifications appliquées en fonction du cas d'un achat neuf, d'occasion ou d'un apport d'un membre, avec une application automatique des décotes. L'objectif du document était d'être intuitif et rapide à remplir, avec l'utilisation de champs préremplis et de menus déroulants afin que chaque membre soit en mesure d'entrer simplement ses dépenses et que les calculs soient faits automatiquement, afin que l'on ait toujours à disposition un état financier à jour. Il se veut ergonomique à lire, avec des indicateurs clairs comme des diagrammes circulaires, des mises en forme conditionnelles...

Pilotage des coûts		
	Budget général du projet	Valeur des objets appartenant aux membres (prêt)
Avion	354.94 €	81.87 €
Drone hexacoptère	548.71 €	530.86 €
Autres frais	71.76 €	- €
Total	903.65 €	612.73 €

Tableau 4: Table récapitulative des dépenses effectuées par l'association Gadz'Aéro

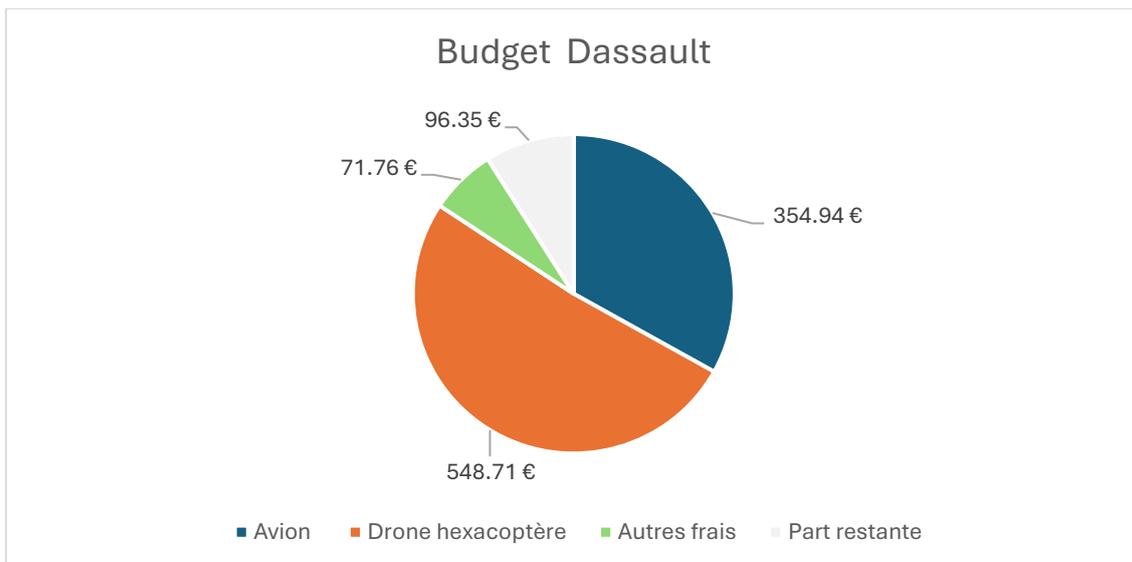


Figure 50: Diagramme circulaire des dépenses par secteur

Le détail des dépenses est disponible en [annexe XI.6](#).

X. Conclusion

Le Dassault UAV Challenge est une aventure extrêmement enrichissante, permettant de croiser les passions des membres du groupe avec un objectif concret. Nous avons tous beaucoup appris, chacun rencontrant le domaine d'expertise des autres.

Travailler à distance fut également très formateur tant cela apporte en rigueur au projet. Les méthodes employées se sont montrées efficaces et ont par ailleurs pu être employées par tous durant leur stage, le formalisme des comptes rendus notamment. Toutefois, lorsqu'il faut travailler physiquement sur les drones et réaliser des tests, c'est là un véritable frein. Être tous présent sur un même campus et pouvoir travailler tous les jours sur nos aéronefs nous aurait permis d'aller beaucoup plus loin. Nous sommes quelque peu frustrés mais c'est un point dont nous étions conscients dès le début.

Nous encourageons tous ceux qui voudront se lancer dans l'aventure à ne pas hésiter. Attention toutefois à recruter des membres ayant les compétences spécifiques requises à savoir : programmation, télécommunication, CAO, impression 3D, aéromodélisme et bricolage de tout genre. Les critères les plus importants étant l'improvisation, la débrouillardise et bien sûr la motivation !

Toute l'équipe Gadz'Aéro remercie l'équipe encadrante de Dassault Aviation pour ses conseils avisés et son suivi régulier.

Nous souhaitons bon courage aux suivants et espérons que ce rapport saura vous guider dans vos choix !

XI. Annexes

1. Drone hexacoptère de surveillance présentée dans la revue Sensors.



1. Conception des ailes

a) *Forme générale*

Pour dimensionner les ailes d'un aéronef, il faut considérer quatre facteurs aérodynamiques classiques (6) :

- **Portance** : définie par la projection de la résultante aérodynamique selon l'axe verticale, elle s'exprime en fonction de la vitesse V [m/s], la surface à l'air S [m²], la masse volumique de l'air ρ [kg/m³] et du coefficient de portance de l'aile C_z [Ø] telle que :

$$P = \frac{1}{2} V^2 S \rho C_z$$

Il apparaît que les facteurs de l'aile influençant la portance sont sa surface à l'air et son coefficient de portance. Le coefficient de portance dépendant principalement du profil (voir ci-dessous), afin de dimensionner nos ailes au regard de la portance il faut une la surface à l'air maximum, particulièrement pour de bases vitesses comme dans notre cas.

- **Traînée** : définie par la projection de la résultante aérodynamique selon l'axe horizontale, elle se définit comme la portance mais avec un coefficient de traînée C_x [Ø] telle que :

$$T = \frac{1}{2} V^2 S \rho C_x$$

Dès lors, la traînée est uniquement influencée par le profil (C_x), la surface étant maximisée pour la portance.

- **Moment de tangage** : moins l'aile est cambrée, plus le moment de tangage tend vers 0

- **Finesse** : ratio entre C_z et C_x .

Par ailleurs, le cahier des charges de la compétition impose aux voilures fixes d'être capable d'un virage d'un rayon de 20m en moins de 10s (FC3.4). Le rayon R [m] d'un aéronef en virage s'exprime selon sa vitesse V , l'accélération de pesanteur g [m²/s²] et l'inclinaison θ [°] tel que :

$$R = \frac{V^2}{g \tan \theta}$$

Ainsi, pour ne pas recourir aux fortes inclinaisons (augmentation du facteur de charge impliquant des contraintes structurelles fortes et l'augmentation de la vitesse de décrochage), il convient d'opter pour des ailes permettant les faibles vitesses.

Dès lors, il apparaît que les caractéristiques aérodynamiques d'une aile sont principalement influencées par son profil. Indépendamment de celui-ci, la contrainte de manœuvrabilité imposant de basses vitesses, avec nos techniques de production nous opterons pour des **ailes droites rectangulaires**.

b) *Profil*

Comme expliqué précédemment, le profil d'aile a une importance cruciale dans les caractéristiques aérodynamiques d'un aéronef à voilures fixes. Afin de choisir le plus adapté à notre usage, une étude comparative entre plusieurs profils a été réalisée. La base de données <http://airfoiltools.com/> permet d'étudier une grande variété de profils selon différentes configurations de vol. Les paramètres de comparaisons considérés sont :

- **Le nombre de Reynolds** : calculé à partir de la vitesse (choisie autour de 35 km/h), la corde (choisie à 20cm) et la viscosité cinétique (correspondant à l'atmosphère standard prise pour 1,5111E-5 m²/s). Nous obtenons un nombre de Reynolds de 132,354 dans notre situation.

Reynolds number calculator

Velocity	<input type="text" value="10"/>	m/s	22.369 mph	36 kph
Chord width	<input type="text" value="0.2"/>	m	0.65617 ft	7.874 in
Kinematic Viscosity	<input type="text" value="1.5111E-5"/>	m ² /s	1.627e-4 ft ² /s	
Reynolds Number	132,354			
<input type="button" value="Calculate"/>				

Kinematic Viscosity
Example kinematic viscosity values for air and water at 1 atm and various temperatures.

Air			
Kinematic Viscosity m ² /s	°C	°F	
1.2462E-5	-10	14	<input type="button" value="Use"/>
1.3324E-5	0	32	<input type="button" value="Use"/>
1.4207E-5	10	50	<input type="button" value="Use"/>
1.5111E-5	20	68	<input type="button" value="Use"/>

Water			
Kinematic Viscosity m ² /s	°C	°F	
1.6438E-6	1	33.8	<input type="button" value="Use"/>
1.267E-6	10	50	<input type="button" value="Use"/>
9.7937E-7	20	68	<input type="button" value="Use"/>

Reynolds number calculation

The Reynolds number is a dimensionless value that measures the ratio of inertial forces to viscous forces and describes the degree of laminar or turbulent flow. Systems that operate at the same Reynolds number will have the same flow characteristics even if the fluid, speed and characteristic lengths vary.

The Reynolds number is calculated from:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu}$$

Where:

- v = Velocity of the fluid
- l = The characteristics length, the chord width of an airfoil
- ρ = The density of the fluid
- μ = The dynamic viscosity of the fluid
- ν = The kinematic viscosity of the fluid

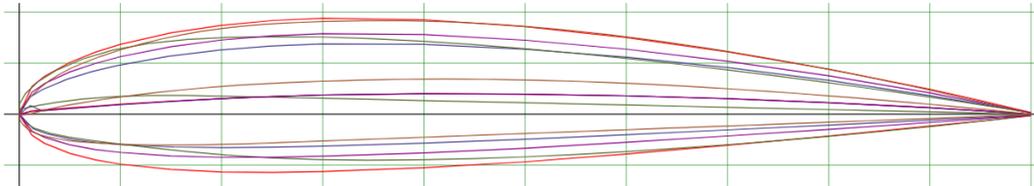
Figure 51 : Calcul du nombre de Reynolds

- **Le Ncrit** : il vaut ici 9, valeur standard afin que l'algorithme converge.

Ces paramètres posés, la comparaison a été menée sur des profils usuellement utilisés en modélisme. Ils sont très proches car les capacités de production de l'équipe sont limitées et requièrent un profil simple.

Airfoil Comparison

Select airfoils from the [airfoil database](#) or [add your own airfoils](#) and compare the airfoil shape and lift/drag polars.



[Open full size plan in new window](#)

[Download PDF file](#)

2032c-il - 20-32C

(naca2415-il) NACA 2415

(naca2410-il) NACA 2410

(naca23012-il) NACA 23012 12%

(naca2412-il) NACA 2412

(clarky-il) CLARK Y AIRFOIL

[Open paginated plan in new window](#)

[SVG image as text file](#)

[Clear all](#)

[Remove](#)
[Airfoil details](#)
[Airfoil plotter](#)

NACA 2415 airfoil
Max thickness 15% at 30% chord
Max camber 2% at 40% chord

NACA 2410 airfoil
Max thickness 10% at 29.9% chord
Max camber 2% at 40% chord

NACA 23012 airfoil
Max thickness 12% at 29.8% chord
Max camber 1.8% at 12.7% chord

NACA 2412 airfoil
Max thickness 12% at 30% chord
Max camber 2% at 40% chord

CLARK Y airfoil
Max thickness 11.7% at 28% chord
Max camber 3.4% at 42% chord

Figure 52 : Profils d'ailes choisis pour comparaison

Drawing Options

Chord (mm)	<input type="text" value="200"/>	Chord width in millimetres
Camber line	<input checked="" type="checkbox"/>	Draw the camber line
X grid (mm)	<input type="text" value="20"/>	X grid size in millimetres
Y grid (mm)	<input type="text" value="10"/>	Y grid size in millimetres
Paper width (mm)	<input type="text" value="280"/>	Used for printing plan. A4 landscape approx 280mm
Paper height (mm)	<input type="text" value="180"/>	Used for printing plan. A4 landscape approx 180mm
<input type="button" value="Update"/>		

Figure 53 : Option de dessin des profils

Le logiciel est également capable de comparer les coefficients de portance et de traînée (notés dans le logiciel C_l et C_d) selon l'angle d'incidence (α). Nous souhaitons un avion dont le profil d'aile produit suffisamment de portance à basse vitesse. En résulte le besoin d'un C_z grand aux grandes incidences.

<input checked="" type="checkbox"/>	naca2415-il	100,000	9	46.7 at $\alpha=7.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil_prediction	Details
<input checked="" type="checkbox"/>	naca2410-il	100,000	9	51.8 at $\alpha=6^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil_prediction	Details
<input checked="" type="checkbox"/>	naca23012-il	100,000	9	36.4 at $\alpha=5.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil_prediction	Details
<input checked="" type="checkbox"/>	naca2412-il	100,000	9	50 at $\alpha=6.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil_prediction	Details
<input checked="" type="checkbox"/>	clarky-il	100,000	9	53 at $\alpha=6.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil_prediction	Details

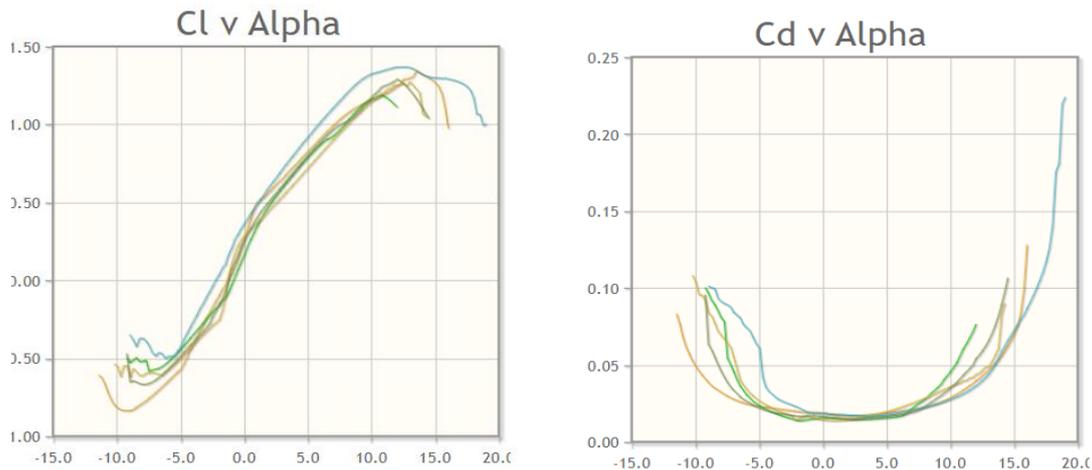


Figure 54 : Comparaison des C_z et C_x

Les différents profils génèrent sensiblement les mêmes coefficients de portance et de traînée, leur géométrie étant similaire. A l'exception du profil ClarkY-II qui a de bonnes caractéristiques en C_z mais trop mauvaise en C_x . C'est finalement le profil **NACA 2412** qui a été retenu car il est largement utilisé pour la fabrication de planeur.

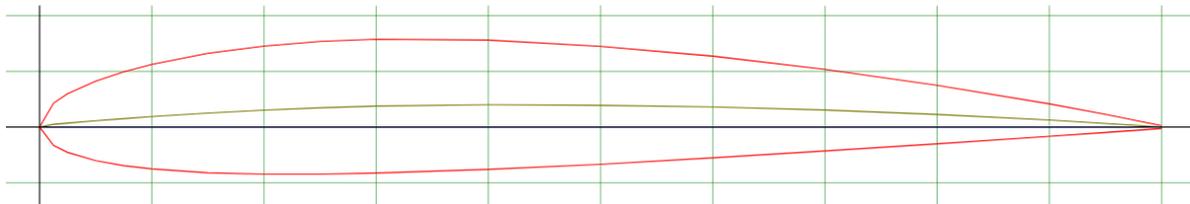


Figure 55 : Profil NACA 2412 sélectionné

2. Conception de l'architecture générale de l'avion

Alex a apporté son expérience du logiciel RC AEROLAB permettant de calculer la géométrie exacte de modèles à voilures fixes en fonction des exigences imposées. Il a également apporté son expertise concernant la géométrie optimale au regard des exigences de la compétition, de la mission à réaliser et de nos capacités de fabrication ; étant totalement novices en modélisme.

Ainsi, il a pu nous éclairer sur la façon d'utiliser son logiciel de dimensionnement afin d'être autonomes et que nous puissions obtenir la géométrie idéale finale.

a) Géométrie générale et dimensionnement

Il convient ici de déterminer le placement des ailes, la forme du fuselage ainsi que le type d'empennage.

- Positionnement des ailes : afin de répondre aux exigences de manœuvrabilités et de simplicité de mise en œuvre, nous avons choisi des **ailes hautes**. Celle-ci augmentent l'effet dièdre, ce qui rend l'aéronef d'autant plus maniable.

De plus, cela offre l'avantage de protéger les ailes lors de l'atterrissage, qui se fait alors directement sur le ventre (sans train d'atterrissage). Le mode de lancement peut alors se simplifier en un jeter avec une prise sur le ventre de l'appareil.

- Le fuselage : devant être capable d'emporter suffisamment de charge (électronique embarquée et charge utile éventuelle) il se doit d'offrir un volume suffisant. Par soucis de simplicité, la forme générale sera un **parallélépipède rectangle** conique sur le nez et la poutre de queue afin d'améliorer l'aérodynamisme.

-L'empennage : afin d'optimiser les écoulements de l'air sur la profondeur, de réduire les interactions avec la dérive et également d'éviter la casse lors de l'atterrissage, un **empennage cruciforme** (dit « classique ») a été choisi.

Avec cette architecture, en supposant que notre aéronef doit emporter une charge utile de 1,5kg (masse évaluer en comptant celles des composants et une marge d'erreur), voici les dimensions proposées par le logiciel :

(mm)	Trapèze 1
Corde emplant.	220
Corde saumon	220
Longueur	600
Flèche /BA	0
Vrillage (°)	0.0
Dièdre (°)	0

(mm)	Trapèze 1
Corde emplant.	200
Corde saumon	200
Longueur	200
Flèche /BA	0
Lévier stab	735
Ouverture (°)	--- / 180

Longueur (mm)	1140	Largeur (mm)	150
Lévier nez (mm)	295	Hauteur (mm)	85
Position aile	haute	Incidence liée	aile

Figure 56 : Dimensions des ailes, du stabilisateur et du fuselage selon RC AEROLAB

En découle l'architecture générale telle que :

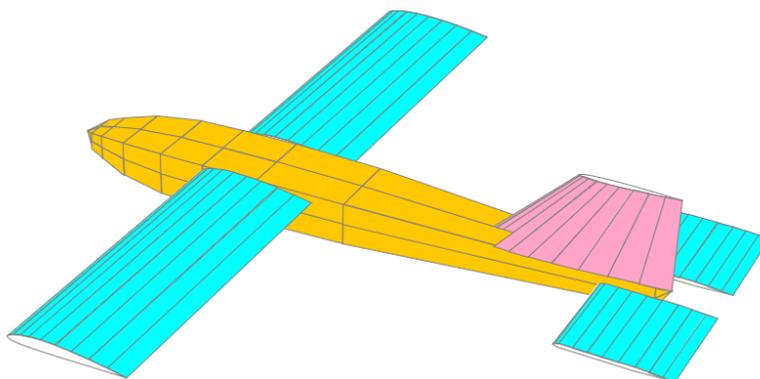


Figure 57 : Vue 3D de l'architecture choisie

Enfin, il convient de vérifier la position du foyer. Celle-ci doit obligatoirement être en avant du centre de gravité afin de garantir un centrage avant de l'aéronef. Un centrage arrière entrainerait un aéronef particulièrement instable. Le centrage pourra également être ajusté en plaçant judicieusement les éléments électroniques.

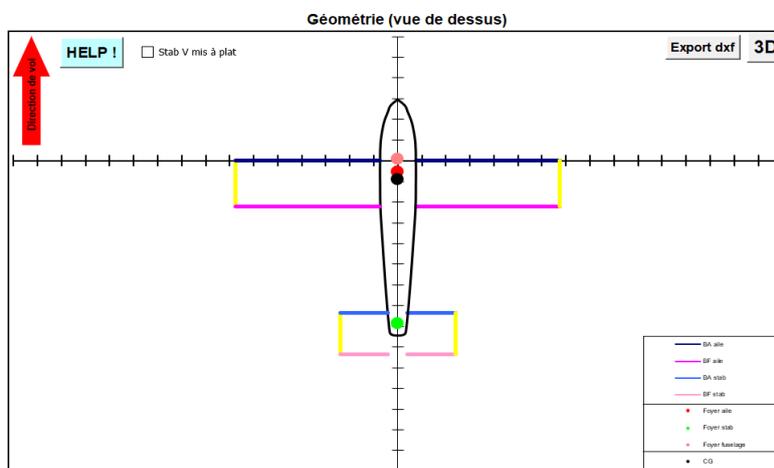


Figure 58 : Schéma de centrage de l'appareil

b) Surfaces de contrôle

D'après les géométries des ailes et du fuselage obtenues plus haut le logiciel RC AEROLAB, permet d'obtenir les dimensions de la profondeur, de la dérive et des ailerons. Ainsi, nous avons obtenu la géométrie de la totalité des surfaces de contrôle. Afin de simplifier la réalisation, ces surfaces seront réalisées purement planes. Cela afin de pouvoir modifier lesdites surface au besoin lors des premiers vols (manque d'autorité en roulis par exemple).

Profondeur		Dérive		Aileron	
Corde C_maxi (mm)	30	Corde C_maxi (mm)	50	Corde C_maxi (mm)	60
Corde C_mini (mm)	30	Corde C_mini (mm)	30	Corde C_mini (mm)	40
Longueur L (mm)	360	Longueur L (mm)	120	Longueur L (mm)	270
Angle gouverne A1(°)	10	Angle gouverne A1(°)	25	Angle gouverne A1(°)	15
--> mm	5.2	--> mm	21.1	--> mm	15.5
Angle servo A2(°)	30	Angle servo A2(°)	30	Angle servo A2(°)	30
R/R guignol / palonnier	2.9	R/R guignol / palonnier	1.2	R/R guignol / palonnier	1.9
Couple max (kg.cm)	0.06	Couple max (kg.cm)	0.24	Couple max (kg.cm)	0.30

Figure 59 : Dimensionnement des surfaces de contrôles

3. Dimensionnement et choix du groupe moto propulseur

Le moteur est conditionné par la puissance qu'il doit fournir à l'hélice, située à l'avant de l'aéronef, afin d'assurer la force de propulsion nécessaire.

Toujours à partir du logiciel RC AEROLAB, nous avons saisi les informations nécessaires afin de déterminer les caractéristiques du GMP (Groupe Moto-Propulseur). Il s'agit de déterminer les caractéristiques de l'ensemble moteur-hélice utilisé pour générer la force de poussée de notre aéronef. Les données entrées sont en bleu, celles calculées en conséquence en noir.

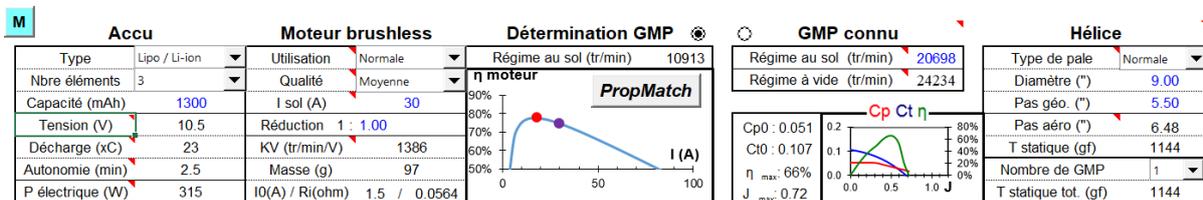


Figure 60 : Feuille de calcul RCaérolab

a) Détermination du GMP à partir des caractéristiques du Moteur

Dans une première partie, nous cherchons à déterminer le GMP à partir des caractéristiques du moteur, de type brushless D2826/10 que nous pouvons aisément obtenir par un membre de l'équipe.

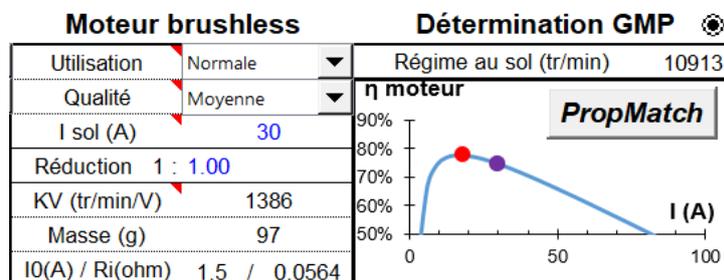


Figure 61: Détermination du GMP à partir des caractéristiques du moteur

Ainsi, pour une utilisation de type normale, une qualité moyenne, une intensité $I = 30A$ et un rapport de réduction de 1, la vitesse de rotation du moteur à vide par volt appliqué (appelée KV) doit être supérieure à 1831 tr/min/V. On choisira donc un **moteur de 1400 KV**.

Ce moteur est pour l'instant alimenté par notre batterie Lipo Turnigy nanotech 1.3 Ah, dont la tension d'alimentation est $U_{alim} = 11.1 V$.

Capacity: **1300mAh**
 Voltage: **3S1P / 3 Cell / 11.1V**
 Discharge: **45C Constant / 90C Burst**
 Weight: **147g (including wire, plug & case)**
 Dimensions: **72x35x27mm**
 Balance Plug: **JST-XH**
 Discharge Plug: **XT-60**

Figure 62 : Caractéristiques de la batterie

Or la tension de chute due à la résistance interne vaut $U_{chute} = I_{sol} \times R_i = 30 \times 0,0564 = 1,692 V$

Ainsi, la tension effective est : $U_{eff} = U_{alim} - U_{chute} = 9,408 V$

Par la suite, on en déduit le **régime au sol** :

$$Régime_{sol} = \frac{KV \times U_{eff}}{Réduction} = \frac{2200 \times 9,408}{1} = 20698 \text{ trs/min}$$

De manière analogue, pour calculer le **régime à vide**, on a :

$$U_{chute} = I_0 \times R_i = 1,5 \times 0,0564 = 0,0846 V$$

D'où $U_{eff} = U_{alim} - U_{chute} = 11,0154 V$

$$\text{Et finalement : } Régime_{vide} = \frac{KV \times U_{eff}}{Réduction} = \frac{2200 \times 11,0154}{1} = 24234 \text{ trs/min}$$

b) Caractéristiques du GMP

En rentrant ces données dans notre Excel, on obtient graphiquement les caractéristiques du GMP.

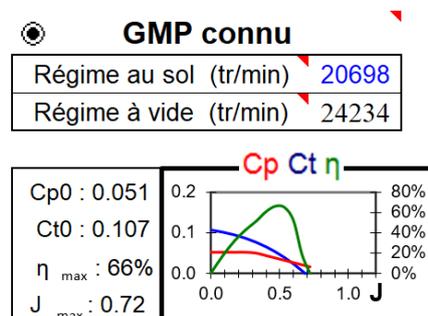


Figure 63 : Graphique des caractéristiques du GMP en fonction de l'avancement J

Le graphique montre les variations de C_p (coefficient de puissance), C_t (coefficient de poussée), et η (efficacité) en fonction de l'avancement (J).

On analyse ces résultats :

- **Coefficient de puissance à vide** $C_{p0} = 0,051$: cette valeur est relativement faible, ce qui indique que peu de puissance est nécessaire pour faire tourner l'hélice à vide.
- **Coefficient de portance à vide** $C_{t0} = 0,107$: valeur indiquant la poussée générée par l'hélice à vide.
- **Efficacité maximale** $\eta_{max} = 66\%$: cela nous indique 66% de la puissance fournie au moteur est convertie en poussée utile. C'est une valeur relativement élevée, indiquant que le GMP est bien optimisé pour l'application visée.
- **Avancement maximal** $J_{max} = 0,72$ (mesure adimensionnelle de la vitesse de l'air par rapport à la vitesse de l'hélice) : l'efficacité maximale est atteinte lorsque la vitesse d'avancement de l'air est 72% de la vitesse de l'hélice. Cela indique que le GMP est le plus efficace à une vitesse d'avancement relativement élevée,

ce qui est typique pour des applications nécessitant une bonne vitesse de croisière, comme les drones à voilure fixe.

Ainsi, le point de fonctionnement optimal du GMP se situe à un avancement de 0.72, où l'efficacité atteint 66%. Cela signifie que pour maximiser l'efficacité énergétique, le système doit être conçu pour fonctionner autour de cet avancement.

Ces valeurs nous permettent de caractériser la puissance nécessaire et la poussée générée par l'hélice lorsqu'elle tourne sans charge significative. Ces valeurs sont essentielles pour l'analyse et l'optimisation de notre système de propulsion.

Enfin, en ce qui concerne l'hélice, on renseigne dans notre feuille Excel ses dimensions.

Type de pale	Normale
Diamètre (")	9.00
Pas géo. (")	5.50
Pas aéro (")	6.48
T statique (gf)	1144
Nombre de GMP	1
T statique tot. (gf)	1144

Figure 64: calculs relatifs à l'hélice

- Le pas aérodynamique de l'hélice (distance réelle que l'hélice avance dans un tour en vol) est de 6.48 pouces
- A partir du diamètre de pale et du pas géométrique, on calcule la **poussée statique** $T_{statique}$ (force de poussée générée par l'hélice lorsque le système est au sol ou à l'arrêt), en fonction du régime du moteur. On obtient $T_{statique} = 1144 \text{ gf}$ (grammes-force). Elle permet de déterminer la capacité de l'hélice à soulever le poids du système.
- La **poussée statique totale** est la même, puisqu'on n'a ici qu'un seul GMP :

$$T_{statique\ totale} = T_{statique} \times \text{nombre de GMP} = 1144 \text{ gf}$$

4. Ressources et moyens à disposition

Etant en dernière année de cycle ingénieur, nous avons la connaissance de divers logiciels et procédés de fabrication. Voici ceux dont nous disposons grâce à l'école :

- GanttProject : logiciel de planification. Il est utile tout le long du projet fin de cadencer et d'ordonner les différentes tâches à réaliser. Il est également utile pour voir si la temporalité de chaque tâche est respectée et maintenir le calendrier.
- CatiaV5 : logiciel de conception mécanique. Il nous a permis de réaliser la mise en plan de différentes pièces.
- Ateliers de l'ENSAM Bordeaux : nous avons accès à l'outillage classique ainsi qu'à tous types de machines de fabrication : découpeuse jet d'eau, plieuses, perceuses colonne, centres d'usinage 3 et 5 axes, imprimantes 3D, scie à ruban, poste à souder, etc. Des espaces de travail collaboratifs sont également à disposition.
- Laboratoire de l'université de Sheffield : Félix dispose du laboratoire qui met à disposition du matériel afin de réaliser des essais. Le laboratoire est notamment équipé de tout le nécessaire permettant le vol autonome : ordinateur de vols, systèmes GPS embarqués, capteurs et caméras embarqués divers.
- Site internet <http://airfoiltools.com/> : base de données regroupant une grande variété de profils d'ailes (Naca et autres). Le site permet de comparer les profils entre eux selon les conditions de vol.
- Site internet youtube.com : hébergeur de vidéos variées, celui-ci comporte des vidéos tutoriels sur la conception et fabrication d'aéronef de modélisme. Couvrant toutes les techniques et difficultés, c'est en découvrant ces contenus que nous avons pris conscience qu'il était possible pour nous de réaliser notre aéronef.

- Leroy Merlin : magasin la construction. Nous y allons pour faire les approvisionnements de matériaux pour notre aéronef : Depron, colle, pistolet à colle, scotch, etc...

- Domicile de Stéphane : logeant en région parisienne, notre base de travail durant le deuxième semestre y sera établie. Cela afin de disposer d'un atelier et d'espace pour les essais tout en réduisant les trajets pour les membres alors en stage de fin d'étude. L'idée étant de nous réunir minima une fois par mois.

- RC AEROLAB : Logiciel de dimensionnement d'aéronef codé en VBA. Il a permis de fixer les dimensions de notre aéronef selon le besoin en charge utile, les contraintes de manœuvrabilité, le profil d'aile choisi et la géométrie générale souhaitée. Ce logiciel permet également de calculer différentes propriétés attendues de l'aéronef : vitesse de montée optimum, finesse, vitesse de taux de chute minimum, etc....

5. Réalisation de l'avion

a) *Liste détaillée de l'électronique :*

- Batterie Lipo nanotech 1.3, 1300 mA :



- Moteur Brushless D2826-10, 1400kV :



- Contrôleur moteur - ESC « YEP SBEC Brushless Speed Controller », 30A (2-4s) :



- Servomoteurs de commande de la gouverne de dérive et de profondeur, TGY-1601A :



- Servomoteurs de commande des ailerons TG9e :



- Récepteur (HV), FrSky V8FR-II, 2.4Ghz 8CH :



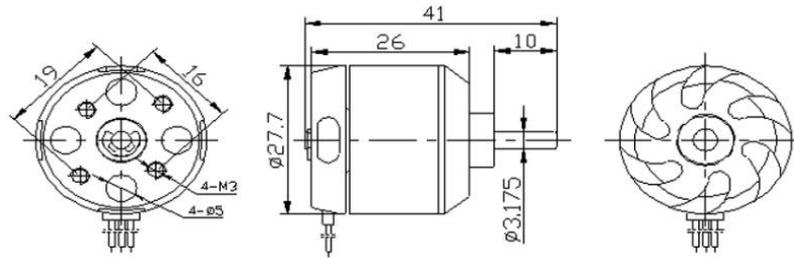
- Radio Taranis X9D, 2,4 Ghz :



- Chargeur de batterie Imax B6AC, 80W :



b) *Caractéristiques du moteur Brushless D2826/10- 1400 kv*



Model	KV	Motor Size	Shaft Size	Weight	Max. Pull	Max. Power	Battery	Prop	Ri(M Ω)	ESC
D2826-6	2200	Φ28*26mm	Φ3.175*37mm	50g	960g	342W	2-3S LiPo	7x3/7x4	0.033	40A
D2826-10	1400				780g	205W		9x4.7/7x4	0.078	
D2826-13	1000				660g	150W		11x7/10x5	0.127	
D2826-15	930				645g	130W		12x8/10x7	0.139	

c) *Référence de la colle à Depron*

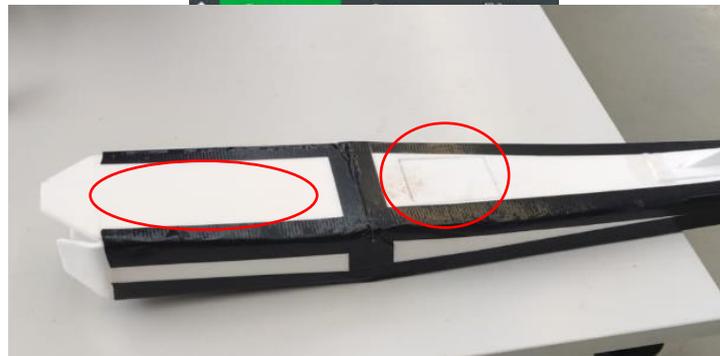
L'utilisation de cette colle à Depron nous assure d'avoir une bonne tenue dans le temps. Cette colle a cependant un désavantage majeur : elle nécessite d'attendre 48h avant d'être parfaitement sèche et de fermement coller les deux parties entre elles, en plus d'être relativement lourde. Cependant, cela permet de rectifier la position des éléments lors du collage de grandes surfaces. Il a alors fallu trouver un compromis : collage des ailes lors du pliage avec de la colle à Depron, collage des éléments internes à la colle universelle.



d) Paramétrage d'impression des cadres et équerres de renfort sur le logiciel Bambu Studio

e) Trappes d'accès

Afin de permettre l'accès aux composants électroniques internes situés à l'intérieur du fuselage, nous avons réalisé deux trappes dans le fuselage. La première, dans la partie centrale, permet d'accéder à la batterie et au contrôleur moteur. La suivante, dans la partie plus large du fuselage arrière, permet l'accès au récepteur.

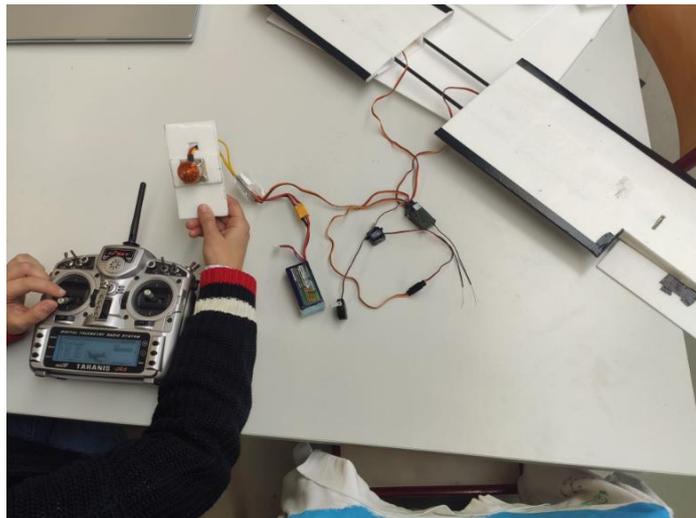


	0	mm/s	(10%, 25%)
	50	mm/s	[25%, 50%]
	30	mm/s	[50%, 75%]
	10	mm/s	[75%, 100%]
Vitesse de surplomb			
over 100% wall (not bridge)	50	mm/s	
Pont	50	mm/s	
Remplissage d'espace	250	mm/s	
Supports	150	mm/s	
Interface de support	80	mm/s	
<input checked="" type="checkbox"/> Vitesse de déplacement			
Déplacement	500	mm/s	
<input checked="" type="checkbox"/> Accélération			
Impression normale	10000	mm/s ²	

f) *Mise en place des renforts imprimées à l'intérieur du fuselage*



g) *Test de l'électronique*



6. Budget détaillé

a) Dépenses liées à l'avion

Type composant	Marque	Modèle	Capacité/Dimensions	Payé par/propriétaire si	Origine	Quantité	Prix unitaire du marché (car occasion)	Prix réel d'achat (si différent du prix du marché)	Déclote 40% (euros)	Compte pour le budget Dassault	Dépenses engagées par l'association	Valeur des apports membres (prêts)
TOTAL Budget Dassault 354.94 €												
Total de la valeur des apports membres - €												
Charnières			16x28,5	Félix	Récupératif	3	0,38€		0,23€	0,68€	- €	1,13€
Nylon & Epingle Charnière			16x28,5	Félix	Récupératif	3	0,38€		0,23€	0,68€	- €	1,13€
Servo moteurs dérive & profil	Turnigy	TOY-1601A	0,08sec/1,0 Kg/ 6g	Félix	Récupératif	2	5,44€		3,26€	6,53€	- €	10,88€
Servo moteurs ailerons	Turnigy	TC9e	0,10sec/9g	Félix	Récupératif	2	4,52€		2,71€	5,42€	- €	9,04€
Recepteur (HV)	F-Sky	F-SKY V8FR-II	2,4GHz 8CH	Félix	Récupératif	1	21,84€		13,10€	13,10€	- €	21,84€
Charnières	Amazon	Facture a Retrouve	24x412mm	Stépane	Neuf	1	0,37€		0,22€	0,37€	- €	- €
Extension de cable servomoteur	Amazon	Facture a Retrouve		Stépane	Neuf	2	3,20€		1,92€	6,39€	- €	- €
Deptron 3mm	LeroyMerlin		1 m ²	Adeline	Neuf	4	4,99€		2,99€	19,96€	- €	- €
Deptron 6mm	LeroyMerlin			Adeline	Neuf	1	6,99€		4,19€	6,99€	- €	- €
Deptron 6mm	LeroyMerlin		1 m ²	Mathieu	Neuf	1	6,99€		4,19€	6,99€	- €	- €
Tube en Fibre De Carbone	Decathlon		6x170mm	Ombeline	Neuf	2	11,00€		6,60€	22,00€	- €	- €
Cordes à piano			20cm	Asso	Récupératif	4	0,18€		0,11€	0,43€	- €	0,72€
Colle universelle	LeroyMerlin			Adeline	Neuf	1	11,90€		7,44€	11,90€	- €	- €
Colle universelle	LeroyMerlin			Adeline	Neuf	1	8,30€		4,98€	8,30€	- €	- €
Scotch renforcé	LeroyMerlin			Mathieu	Neuf	1	10,90€		6,54€	- €	- €	- €
Camera thermique	Amazon		Waveshare MLX90640 IR	Mathieu	Neuf	1	71,99€		43,19€	71,99€	- €	- €
Baïse DGAC	Hobbyro	Remote ID		Félix	Neuf	1	29,90€		17,94€	29,90€	- €	- €
Moteur 2	F-Sky	KAVAN Brushless motor C3542-1250		Félix	Neuf	1	33,99€		20,39€	33,99€	- €	- €
Paires rétractables 2	F-Sky	Paire pales Aerofly 1066 & 9.5x6		Félix	Neuf	2	8,50€		5,10€	17,00€	- €	- €
Comoteur 2	F-Sky	4741 - CONE 0,40mm (p.pales 40-taille 12x8)		Félix	Neuf	1	10,90€		6,54€	10,90€	- €	- €
ESC 2	F-Sky	Controler Brushless Robbe RO-Controll6 4-F		Adeline	Neuf	1	24,99€		14,99€	24,99€	- €	- €
Elastiques	LeroyMerlin			Adeline	Neuf	1	5,99€		3,59€	5,99€	- €	- €
Commande alexpress helic	Alexpress			Ombeline	Neuf	1	19,17€		11,50€	19,17€	- €	- €
Servo moteurs recharge	Amazon			Stépane	Neuf	2	4,50€		2,70€	8,99€	- €	- €
Matos lab Bordeaux	LeroyMerlin			Adeline	Neuf	1	29,50€		17,70€	29,50€	- €	- €
Outilage bambou	LeroyMerlin	DUAV3		Adeline	Neuf	1	1,69€		1,01€	- €	- €	- €
Outilage	LeroyMerlin	DUAV5		Adeline	Neuf	1	29,98€		17,99€	- €	- €	- €
Outilage	LeroyMerlin			Félix	Neuf	1	16,98€		10,19€	- €	- €	- €
Batterie	Hobbyking			Félix	Récupératif	2	18,56€		11,14€	22,27€	- €	37,12€

b) Dépenses liées à l'hexacoptère et autres dépenses

TOTAL Budget Dassault		548.71 €		530.86 €											
Total de la valeur des apports membres															
Type composant	Marque	Modèle	Payé par/propriétaire si récup	Dimensions	Origine	Quantité	Prix unitaire du marché	Décote 40% (euros)	Prix réel d'achat (si occasion)	Compte pour le budget Dassault	Dépenses engagées par l'association	Valeur des apports membres (prêts)			
Chassis	Tarot	680 pro	Stépane	X	Récupération	1	116.00 €	69.60 €		69.60 €	- €	116.00 €			
Moteur	RC Timer	5010-62	Stépane	X	Récupération	6	20.00 €	12.00 €		72.00 €	- €	120.00 €			
Helices	?	?	Stépane	33.5cm	Récupération	6	15.00 €	9.00 €		54.00 €	- €	90.00 €			
ESC	Readytosky	X	Stépane	40A 2-6s	Récupération	6	5.45 €	3.27 €		19.60 €	- €	32.67 €			
Pixhawk kit	Pixhawk	2.4.8	Stépane	X	Récupération	1	85.00 €	51.00 €		51.00 €	- €	85.00 €			
Servo support de largage et bombe					Récupération	1	2.19 €	1.31 €		1.31 €	- €	2.19 €			
Balise DGAC	Holybro	Remote	Félix		Neuf	1	29.90 €	17.94 €		29.90 €	29.90 €	- €			
Plaque bois et trisians	Leroymerlin		Stépane		Neuf	1	10.69 €	6.41 €		10.69 €	10.69 €	- €			
Camera visible avec zoom	Leboncoin		Stépane		Occasion	1	20.00 €	12.00 €	12.48 €	12.00 €	12.48 €	- €			
Pixhawk 2.4.8	Aliexpress		Stépane		Récupération	1	85.00 €	51.00 €		51.00 €	- €	85.00 €			
Batterie 6S	Hobbyking		Félix		Neuf	1	79.85 €	47.91 €		79.85 €	79.85 €	- €			
Batterie 6S n°2	Hobbyking		Félix		Neuf	1	76.77 €	46.06 €		76.77 €	76.77 €	- €			
Camera visible n2	Amazon		Félix		Neuf	1	20.98 €	12.59 €		20.98 €	20.98 €	- €			

TOTAL Budget Dassault		71.76 €													
Total de la valeur des apports membres															
Intitulé	Fournisseur	Type	Payé par/propriétaire si récup	Dimens ions	Origine	Quantité	Prix unitaire du marché	Décote 40% (euros)	Prix réel d'achat (si occasion)	Total apparaissant dans le budget Dassault	Dépenses engagées par l'asso	Valeur des apports membres (prêts)			
Rp4	Leboncoin	Autres	Stépane		Occasion	1	59.39 €	35.63 €	59.39 €	35.63 €	59.39 €	- €			
Radio telemetrie	Leboncoin	Autres	Stépane		Occasion	1	60.21 €	36.13 €	60.21 €	36.13 €	60.21 €	- €			

7. Caractéristique de vols pour une détection optimale

Altitude (m)	Vmax_drone (m/s)	Vmax_drone (km/h)	Espace_passes (m)	alpha(°)	beta(°)	Facqui (Hz)
1	2.1	7.5	0.3	55	35	4
2	4.2	15.0	0.6			
3	6.2	22.5	0.9			
4	8.3	30.0	1.3			
5	10.4	37.5	1.6			
6	12.5	45.0	1.9			
7	14.6	52.5	2.2			
8	16.7	60.0	2.5			
9	18.7	67.5	2.8			
10	20.8	75.0	3.2			
11	22.9	82.5	3.5			
12	25.0	90.0	3.8			
13	27.1	97.5	4.1			
14	29.2	104.9	4.4			
15	31.2	112.4	4.7			
16	33.3	119.9	5.0			
17	35.4	127.4	5.4			
18	37.5	134.9	5.7			

alpha :	angle de vision parallèle au sens d'avancement
beta :	angle de vision perpendiculaire au sens d'avancement
Facqui :	4FPS max, limitées par la puissance de la Raspberry
Vmax_drone :	Vitesse maximale assurant que chaque point au sol soit vu au moins deux fois
Espace_passes :	Espacement horizontal entre les traces GPS pour deux passages en sens inverses assurant que chaque point au sol soit vu sous deux angles différents

XII. Bibliographie

1. La stratégie de lutte contre les feux de forêt en France. *Ministère de l'intérieur*. [En ligne] <https://www.interieur.gouv.fr/actualites/grands-dossiers/strategie-lutte-feux-foret-france#:~:text=Le%20dispositif%20fran%C3%A7ais%20de%20lutte,et%20engager%20les%20moyens%20adapt%C3%A9s.&text=La%20strat%C3%A9gie%20nationale%20mise%20en,impose%20des%20tra>.
2. Détection automatique des incendies et feux de forêts. *Paratronic : Eau Environnement Risques naturels*. [En ligne] <https://www.paratronic.com/detection-automatique-des-incendies-et-feux-de-forets>.
3. SDIS 83 sapeurs-pompiers du var. Présentation des Tours de guet . *Youtube*. [En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=hr-eGml9IFY>.
4. Dépron. *a4 Technologie*. [En ligne] <https://www.a4.fr/composants-matieres-d-oeuvres/plaques-tubes-joncs-barres/mousses/mousses-polystyrene/depron-blanc.html>.
5. Ministère chargé des transports. *Guide: Usages de loisir et professionnels simplifiés des aéronefs sans équipage a bord*. s.l. : Ed.1, Version 1.5, 1er février 2023.
6. Mécanique du vol - vol en virage horizontal. *L'avionnaire*. [En ligne] <https://www.lavionnaire.fr/MecaVirages.php>.
7. La lutte contre les incendies: engagement des moyens matériels et humains . *foret.ign.fr*. [En ligne] <https://foret.ign.fr/themes/l'organisation-de-la-lutte>.
8. Zhaodan, Prabhash Ragbir Ajith Kaduwela David Passovoy Preet Amin Shuchen Ye Christopher Wallis Christopher Alaimo Thomas Young and. UAV-Based Wildland Fire Air Toxics Data Collection and Analysis. *Sensors*. 2023.