**PAGE DE GARDE EFREI**

Une image contenant texte, arts de la table, vaisselle, assiette

Description générée automatiquement **2022-2023**

**SYSTÈMES ROBOTIQUES & DRONES** Étudiant :PANNIER JULIEN

**Stage technique M1** Référent pédagogique :BEN HEDIA BELGACEM

**Fabrication de matériel pédagogique : Asservissement d’un bras à hélice avec un degré de liberté**

EFREI PARIS

INNOVATION LAB



VILLEJUIF

Tuteurs :CONTEVILLE LAURIE

GRIOT RÉMI

# **Remerciements**

# **Table des matières**

**Remerciements 2**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Résumé technique**

**Abstract**

**Présentation de l’environnement du stage**

L’EFREI

L’Innovation’Lab

**Stage**

1. Partie 1
2. Partie 2

**Conclusion**

**Bibliographie**

**Annexes**

# **Liste des figures**

# **Liste des tableaux**

# **Résumé technique**

…

Mots clés :

# **Abstract**

… English version

Key words:

# **Présentation de l’environnement du stage**

L’EFREI

L’*École française de radioélectricité, d’électronique et d’informatique* (EFREI) est une école privée d’ingénieurs généraliste et expert du numérique, en perpétuelle évolution depuis sa fondation en 1936, qui dispose de l’habilitation par la Commission des Titres Ingénieur à délivrer le titre d’ingénieur depuis 1957 et qui a rejoint l’université Paris-Panthéon-Assas en tant qu’établissement composante depuis l’année 2022.

L’EFREI dispose de plusieurs bâtiments dont deux campus dans les villes de Villejuif et de Bordeaux. Le campus principal à Villejuif, comportes-en son sein un bâtiment inauguré en 2021, dans lequel s’effectue le stage présenté dans ce document : l’Innovation’Lab.

L’Innovation’Lab

L’Innovation’Lab est un espace de travail dédié aux étudiants, enseignants et associations étudiantes disposant d’outils pour la conception et réalisation de projets. L’Innovation’Lab est aussi par extension, une entité d’EFREI PARIS, avec pour mission principale d’élargir le spectre innovatif de cette dernière en proposant par exemple des projets pédagogiques, tel que le sujet de ce stage, qui à terme permettront à l’école de s’assurer une certaine forme d’auto-suffisance matérielle.

Les acteurs du projet « Bras drone »

Le projet « Bras drone à un degré de liberté », proposé par l’Innovation’Lab (I’Lab) en partenariat avec la majeure Systèmes Robotiques & Drones (SRD), est encadré par Monsieur GRIOT Rémi, en sa qualité de manager de l’I’Lab et de Madame CONTEVILLE Laurie, enseignante-chercheuse et responsable de la majeure SRD.

Les bénéficiaires du projet sont l’EFREI Paris, les enseignants de la filière Systèmes Embarqués et de la majeure SRD, ainsi que les étudiants de ces mêmes filière et majeure.

# **Stage**

# **Introduction**

Ce stage fait suite au développement conceptuel et matériel d’un bras drone à un degré de liberté, à visée éducative, qui fut le sujet d’un stage technique réalisé l’an dernier (2021-2022) par mon prédécesseur Monsieur N’DO Yann Kader Axel Obou, également élève de la majeure Systèmes Robotiques & Drones de l’EFREI.

## **Présentation succincte du dispositif**

Le dispositif du bras drone est constitué de plusieurs éléments à caractère mécanique et électronique. Le squelette est composé de 2 profilés en aluminium montés en T via des équerres de fixation faisant office de socle. Un troisième profilé est utilisé comme bras, monté en liaison pivot par rapport au socle (1 degré de liberté : une rotation possible sur un seul axe, avec un champ de manœuvre limité par le socle), au bout duquel se trouve la « partie drone » soit un moteur et une hélice.

Le principe du dispositif est donc d’assurer le mouvement du bras par rapport au socle, afin d’effectuer une rotation sur un seul plan, dans une fourchette de 0 à 90° (0° étant la position de repos du bras à la verticale), grâce à la poussée du drone. Au-delà du fait de simplement déplacer le bras par rapport au socle, le but pédagogique du bras drone est de pouvoir assurer un asservissement de la vitesse de rotation du moteur afin que le bras puisse rester stable autour d’une consigne de position angulaire.

Ainsi, le dispositif comprend également une carte de développement NUCLEO-L476RG de STMicroelectronics dont le microcontrôleur ARM Cortex M4 STM32L476RGT6 permet la gestion des différents capteurs et éléments électroniques : un moteur brushless et un contrôleur de vitesse électronique (ESC *Electronic Speed Controller* ) issus du commerce de drones ; un potentiomètre ; une centrale inertielle (MPU-6050 de chez InvenSense / protocole de communication I2C) nécessaire pour déterminer la position angulaire du bras et un générateur de laboratoire pour alimenter le système.

La carte STM32 dispose d’un environnement de développement STM32 Cube IDE permettant d’accéder aux fonctionnalités de cette dernière, à ses registres et de développer en langage C, le firmware implémenté dans la carte. La communication avec la carte se fait en série via le protocole UART RS232 avec un Baud Rate de 115200 Bits/s et un Word Length de 8 Bits. L’utilisation d’un terminal UART permet de rentrer des commandes sur ordinateur.

[NOUVELLE PHOTO DU DISPOSITIF A PRENDRE / PHOTOS DETAILLEES ?]

[Schéma fonctionnel pc carte dispositif]

## **Missions et objectifs du stage**

En début de stage, le dispositif est dans un état fonctionnel : il est possible de communiquer avec la STM32 en suivant les conditions de passages d’un état à un autre de la machine d’état développée dans le fichier source « main.c » via l’instruction « switch » et ses instances « case » (Fig.1).



Figure : Machine d'état initiale

La machine d’état se déroule de la manière suivante : l’état de départ « Init\_UC » est un état de transition dans lequel il est possible d’accéder à l’état « Info » (qui propose un récapitulatif des différents modes et autres informations relatives à la simulation) ou bien à l’état « Init Motor » par sélection du caractère spécifique associé (un chiffre). L’état « Init Motor » vérifie s’il y a bien une acquisition de signal en provenance du moteur, auquel cas la transition à l’état suivant « Motor Ready » est possible. C’est dans « Motor Ready » qu’il est alors possible de choisir (par sélection d’un caractère également) entre plusieurs modes d’interaction avec le moteur : « Manual Mode Pot », pour une interaction manuelle avec le moteur via le potentiomètre ; « Manual Mode Term », dans lequel l’utilisateur est amené à renseigner une consigne de pourcentage de gaz du moteur ou bien une incrémentation de plus ou moins 1% de cette même variable ; « Auto Mode », le mode asservi pour une consigne fixe de 45°, prenant en compte des coefficients du régulateur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) fixes renseignés dans le fichier source. L’état « Init Pot » est un état transitoire, dans lequel on vérifie si le potentiomètre est bien connecté et initialisé. A savoir qu’il est tout à fait possible de revenir à « Motor Ready » si l’on désire changer de mode de fonctionnement.

Les premières missions qui m’ont été attribuées, à partir de cette étape d’avancement du projet, sont :

* L’optimisation de la communication entre la STM32 et le PC ;
* L’amélioration des performances de la boucle d’asservissement ;
* L’amélioration de l’affichage des données.

Pour se faire, il m’a été conseillé de suivre les étapes suivantes :

* Prendre en main l’outil de gestion de version Git et de la plateforme GitHub, afin de pouvoir établir un environnement de travail rigoureux ;
* Prendre en main STM32 Cube IDE, dans le but de pouvoir développer le firmware de la STM32, soit optimiser la machine d’état, donner plus d’ampleur au mode asservi (sélection d’une consigne autre que 45° et pouvoir modifier les coefficients PID), établir un mode atterrissage car le bras doit être rattrapé manuellement lors de l’arrêt du moteur ou bien encore établir un mode « séquence de vol » ;
* Prospecter les librairies d’affichage de graphiques en temps réel et de développement d’IHM (Interface Homme Machine) en langage Python, dans l’optique de développer une IHM et de faciliter la communication STM32/PC.

# **Étapes charnières du stage**

Dans un premier temps, les étapes citées ci-avant ont été suivies afin de remplir les missions principales du stage.

## **Prise en main de l’outil de gestion de versions**

Afin de pouvoir débuter mon stage dans un cadre de travail rigoureux et efficace, j’ai tout d’abord suivi une courte formation sur l’utilisation de l’outil de gestion de versions Git. Cet outil est à utilisation quotidienne lors de ce stage, car il me permet de mettre à jour les fichiers sur lesquels je travaille, de pouvoir récupérer d’éventuelles nouvelles versions de fichiers sur lesquels mon tuteur serait amené à travailler et également de lui mettre à disposition mon avancement.

L’I’Lab possède son propre dépôt sur GitHub, dans lequel se trouve un sous dépôt dédié au projet du bras drone (Annexe 1).

Une fois l’outil de gestion de versions maîtrisé, j’ai alors pu commencer à utiliser STM32 Cube IDE et regarder en détails les différents fichiers sources et la machine d’état.

## **Prise en main de STM32 Cube IDE**

[PHOTOS DE L IDE STM32 ET IHM]

A partir de la machine d’état présenté dans l’introduction (Fig. 1), l’objectif premier a été d’optimiser le fonctionnement de l’automate. Le passage d’un état à un autre se fait par « polling » c’est-à-dire qu’à partir d’une certaine ligne du code, au sein d’un état, une boucle « do while » est utilisée afin de vérifier constamment si un caractère spécifique est saisi et si tel est le cas alors il sera possible de sortir de cette condition et d’attribuer à ce caractère, la commande pour atteindre prochainement l’état qui lui est associé.

J’ai, en premier lieu, voulu faire une refonte de la machine d’états, d’une part en y ajoutant plus de messages informatifs pour faciliter l’interaction via le terminal, mais aussi afin de simplifier le développement de cette dernière. Le premier point marquant fut de fusionner l’état « Init Pot » avec l’état « Manual Mode Pot » afin de diminuer le nombre d’états transitoires et de faciliter la compréhension de l’automate.

Ensuite, il m’avait été demandé de permettre un accès à l’état informatif « Info Mode » depuis n’importe quel autre état et également dans un but de simplification, j’y ai attribué le caractère « ? » qui me semblait plus intuitif qu’un chiffre, que j’ai alors préféré réserver aux modes de fonctionnement : ‘1’ pour « Manual Mode Pot » / ‘2’ pour « Manual Mode Term » / ‘3’ pour « Auto Mode ». Le mode « Info » fonctionne désormais tel qu’une fois avoir demandé l’accès à ces informations, qui sont par la suite affichées sur le terminal (par « printf »), on retourne directement à l’état dans lequel on se trouvait précédemment, ce qui permet entre autres d’accéder aux informations, sans pour autant compromettre l’action en cours (le moteur va pouvoir continuer à fonctionner et le bras va pouvoir rester à une certaine position, par exemple).

L’état « Motor Ready » quant à lui est toujours accessible depuis l’un de ces 3 modes, à ceci près qu’il est maintenant possible de sortir d’un mode de fonctionnement à n’importe quel moment où il est demandé d’interagir avec la console.

A cette étape du développement, il m’est paru sensé de créer un état transitoire d’atterrissage « Landing », ainsi qu’une fonction associée, car l’arrêt des moteurs devenait assez récurrent lors des tests à la suite du développement de la machine d’état. Cette fonction reprend le principe de décrémentation successive de la valeur consigne assignée au moteur, jusqu’à atteindre la coupure du moteur, ce qui permet au bras de retrouver sa position de départ, en douceur.

Afin d’éviter d’autres potentiels « dangers » ou dommages sur le dispositif, j’ai décidé alors d’ajouter des garde-fous accompagnés de messages d’erreurs sur les 2 modes de fonctionnement « Manual Mode Term » et « Auto Mode » présentant une partie interactive (demande de consigne). Par exemple, le mode 2 « Manual Mode Term » requiert une valeur consigne de pourcentage de gaz à attribuer au moteur et par expérimentation, j’ai constaté qu’une valeur supérieur à 10%, appliquée directement au moteur (et non attribuée par incrémentation successive) donnait beaucoup trop d’élan au bras, qui partait alors au-delà de sa position angulaire limite (90°).

Ensuite, il a été convenu que le mode « Init UC » ne devrait plus être accessible depuis « Motor Ready » car une initialisation de la carte prenait plus de sens par son caractère unique. Un état d’entrée a alors également été suggéré afin de ne pas manquer certains messages de l’état « Init UC» lors de la lecture des « printf », mais aussi dans un but de clarté.

Ainsi, la nouvelle machine d’état se caractérise par l’état « Entrance », durant lequel on attend que l’utilisateur presse la touche « Entrée », afin de pouvoir accéder à l’état « Init UC ». Dans cet état, les messages nous proposent d’entrer le caractère ‘ ?’ pour obtenir des informations sur la simulation ou bien d’entrer soit la touche « Espace », spécifique à l’accès à « Motor Ready », mais aussi parallèlement utilisé pour l’atterrissage. Une fois « Motor Ready » atteint, il nous est alors demandé de saisir ‘1’, ‘2’ ou ‘3’ (ou encore ‘ ?’) et donc d’exprimer notre choix de mode (« Motor Ready » est donc similaire à un menu).

Enfin, le mode 3 « Auto Mode » nécessitait d’offrir plus de possibilités d’interaction, car pour rappel, la valeur de position angulaire et les coefficients PID étaient préalablement choisis dans le fichier source et il serait alors plus intéressant de pouvoir saisir ces valeurs via le terminal.

J’ai donc rajouté la possibilité de saisir une valeur consigne de position angulaire via l’accès à un état transitoire « Instruct Angle », qui une fois rentrée nous amène à l’état « Auto Mode » ou bien nous ramène à ce même état, si l’on a demandé à accéder à « Instruct Angle » pour changer de position angulaire (c’est-à-dire qu’il est maintenant possible d’effectuer un changement de position en plein vol, ce qui aura une utilité certaine pour le développement d’un mode séquence de vol).

La saisie des coefficients PID se fait également via des états transitoires, mais par modification. Entre autres, des valeurs par défaut sont déjà présentes dans le code, car l’on suppose qu’il ne sera pas toujours nécessaire de vouloir saisir des coefficients PID (il est également possible de saisir une commande de retour aux valeurs par défaut si besoin).

Une fois toutes ces étape franchies, il m’a été alors conseillé de débuter le développement d’une IHM en Python, où il serait alors possible de rajouter un mode séquence de vol et un mode calibration, qui permettrait à l’utilisateur d’acquérir des couples de données consigne (en % de gaz moteur)/position angulaire mesurée par la centrale inertielle, afin de pouvoir tracer une courbe et de pouvoir étudier les comportements statique et dynamique du dispositif.

## **Début du développement de l’IHM**

J’ai en premier temps cherché les bibliothèques qui me permettraient de créer une IHM en Python. J’ai préféré débuter une IHM avec Tkinter, plutôt que PyQt et PySide, qui est référencée comme la bibliothèque la plus simple pour commencer à créer des IHM et dont la documentation et exemples étaient suffisamment riches pour pouvoir atteindre mes objectifs dans un court délai.

J’ai alors suivi plusieurs tutoriels afin de pouvoir me lancer dans le développement de cette IHM. L’un des tutoriel se présentait de la manière suivante : une unique fenêtre principale, qui s’agrandirait à mesure que l’on cliquerait sur certains boutons. La personne en question présentait le développement d’une IHM en Python pour pouvoir communiquer en série avec une STM32. Ainsi, une certaine partie des explications concernaient également la communication en série UART, ce qui m’est avéré bien utile.

Je me suis donc fortement inspiré de l’aspect de l’IHM de ce tutoriel, notamment de la racine de cette fenêtre principale, similaire au menu de connexion du terminal série que nous utilisons (Fig.2).



Figure : Fenêtre de communication série de l'IHM

L’interface offre donc la possibilité de sélectionner le port de communication détecté, ainsi que le « Baud rate ». Une fois qu’ils sont sélectionnés, le bouton « Connect » n’est plus grisé (« disabled ») et il est alors possible d’accéder à une première extension de fenêtre si la connexion est bien ouverte et fonctionnelle. Un message de validation s’affiche dans une nouvelle fenêtre « pop-up » dans le cas où le port COM est bien accessible et si la connexion est aboutie ; dans le cas contraire, un autre message s’affichera, annonçant que la connexion n’a pas pu se faire (Fig.3).

Une image contenant texte

Description générée automatiquementUne image contenant texte

Description générée automatiquement

Figure : Messages de connexion (bouton Connect)

Une connexion non aboutie peut être due notamment à une communication déjà existante via le terminal série UART par exemple.

Le code Python de cette IHM est développé sur plusieurs fichiers « .py » dont un fichier principal nommé « Master.py », lequel est exécuté lorsque l’on veut utiliser l’IHM et qui fait appel à plusieurs autres fichiers « .py » regroupant les différentes classes et fonctions utilisées.

L’un de ces fichiers est appelé « GUI\_Master.py », GUI pour Graphical User Interface (l’interface graphique), et regroupe la majeure partie du code, dont des classes propres à chacune des extensions de fenêtres et leurs fonctions associées qui traitent des widgets.

Dans ce fichier, on retrouve donc la classe propre à la fenêtre principale, « ComGui » (pour la communication série / TAG\_IHM\_002) , et cette même classe contient des fonctions qui sont appelées lors des interactions avec les widgets, soit par exemple la fonction « ComOptionMenu » qui s’occupe de gérer l’obtention et l’affichage de la liste des ports COM dans le widget « drop\_com » (en face du label « Available Port(s) », Fig.2).

Cette classe fait également appel au module « pyserial » de Python, utilisé pour pouvoir communiquer en série. Les fonctions de « serial » sont essentielles à la réalisation de l’IHM, car elles établissent l’envoi et la réception des données dont nous avons besoin.

Les fonctions « write » et « readline » de « pyserial » représentent à elles deux, la clé de voûte de notre système de communication : entre autres, elles nous permettent d’envoyer les entrées « char » que nous entrions manuellement via le terminal série, mais aussi de lire les « printf » du firmware qui comportent les données que nous cherchons à acquérir.

Un fichier réservé à la communication série « Serial\_COM\_ctrl.py » décline les différentes fonctions nécessaires à l’ouverture et à la fermeture du port COM, mais aussi à l’écriture et à la lecture de données (TAG\_IHM\_008).

La première extension de fenêtre (Fig.4), nous donne accès à un menu de modes via plusieurs boutons.



Figure : Extension de fenêtre propre au menu de modes

Deux premiers boutons correspondent aux 2 modes interactifs de l’automate : « Manual Mode Term » et « Auto Mode ». Chacun de ces boutons sont définis dans la classe « MotorReadyGUI » (TAG\_IHM\_003) et renvoient à des fonctions bien précises, qui elles-mêmes sont destinées à étendre encore une fois la fenêtre, à envoyer les bons caractères propres aux états correspondants et à nous renvoyer à une nouvelle classe du même fichier, regroupant les fonctions du mode.

Deux autres nouveaux modes proposent à partir des deux modes originaux, d’automatiser une séquence de vol « Trip Mode » et une simulation de calibration « Calibration Mode ».

On notera aussi que le bouton « Connect » est maintenant désigné comme « Disconnect » et permet alors de fermer la communication série à tout moment.

## **Poursuite du développement de l’IHM**

La seconde extension de fenêtre se produit donc lorsque l’utilisateur interagit avec l’un des 4 boutons du frame « Motor Ready » (Fig.4) et l’on voit alors apparaître à droite une nouvelle section propre à chacun des modes.

En premier temps, j’ai réalisé le contenu de l’extension du mode « Manual Mode Term » afin de pouvoir mettre en place, un peu plus tard, le mode calibration.

Une image contenant texte

Description générée automatiquement

Figure : Extension de fenêtre propre au mode « Manual Mode Term », avant envoi d’une première consigne

Cette section de fenêtre (Fig.5) est définie dans la classe « ModeTermGUI » du fichier « GUI Master » (TAG\_IHM\_004) et se caractérise via les widgets suivants:

* un premier label comportant l’intitulé de la consigne, qui pour ce mode correspond à la valeur de pourcentage des gaz du moteur ;
* un second label utilisé en tant qu’écran factice, qui se trouve être relié à la prise en compte de l’entrée, qui pour cette dernière peut être renseignée textuellement via une « entry box » ou bien via les boutons « + » et « - » ;
* un bouton « GO ! » qui permet de vérifier si la valeur consigne textuelle est correcte (si elle répond aux critères d’être un entier positif et inférieure à une valeur maximale que l’on aurait fixé au préalable pour des raisons de sécurité par exemple) et ensuite d’envoyer cette valeur, soit démarrer les moteurs (pour une 1ère valeur) ou bien sélectionner une nouvelle consigne en plein vol ;
* un bouton « STOP ! » qui s’active une fois que la simulation a débuté et qui permet d’amorcer l’atterrissage (et de revenir au début du mode « Manual Mode Term », car cela nous permet d’enclencher directement une autre simulation sans avoir à revenir au menu de modes puis cliquer une fois encore sur le bouton « Manual Mode Term ») ;
* un bouton « Change Mode » qui répond donc à un besoin de changer de mode sans avoir à redémarrer l’IHM.

Ainsi, on peut débuter une simulation soit en renseignant une valeur correcte dans l’ « entry box » puis en cliquant sur le bouton « Go ! » ou bien en cliquant sur le bouton « + » ce qui fera alors varier la valeur du label écran de « 0 » à « 1 ». Ce label a une importance particulière, car il m’a permis de résoudre certains soucis liés à la prise en compte de la consigne, lorsqu’il n’y avait alors que l’« entry box » pour garder en mémoire et afficher la consigne. Les boutons « + » et « - » étaient alors reliés à la valeur textuelle et de par son caractère modifiable, il y avait alors des erreurs de cohérence entre valeur affichée et valeur prise en compte par l’automate. J’ai donc résolu ce petit problème grâce à cette idée d’écran factice qui vient s’actualiser selon les 2 options de renseignement de la consigne (Fig.6).

Une image contenant texte

Description générée automatiquement

Figure : Extension de fenêtre propre au mode « Manual Mode Term », après envoi de la consigne

Lorsque la valeur consigne prise en compte n’est plus à « 0 », le bouton « - » et le bouton « STOP ! » s’activent et il est alors possible de renseigner une nouvelle valeur ou bien d’arrêter la simulation via un atterrissage qui peut s’effectuer conventionnellement via le bouton « STOP ! » ou bien via le bouton « Change Mode » ou encore si l’on ferme la fenêtre principale.

Par la suite, j’ai défini une nouvelle classe « AutoModeGUI » (TAG\_IHM\_005) qui reprend le même principe que celle attitrée au mode « Manual Mode Term ».

Son apparence est assez similaire, car il faut pouvoir renseigner une consigne textuellement, mais il faut aussi prendre en compte les valeurs des coefficient PID, en rajoutant de nouveaux widgets !



Figure : Extension de fenêtre propre au mode « Auto Mode », avant envoi d’une première consigne

La section (Fig.7) se compose donc des mêmes éléments que « Manual Mode Term » (Fig.5), à ceci près qu’il n’y a plus de boutons « + » et « - » mais 3 nouvelles lignes de labels et « entry box », ainsi qu’un bouton « Default » permettant de revenir aux valeurs des coefficients PID par défaut.

Les entry boxes des coefficients sont accessibles lorsque le moteur est éteint, c’est-à-dire lors de l’attente d’une première consigne (Fig.7) ou bien après avoir actionné le bouton « STOP ! ».

Lorsque la simulation est lancée, les entry boxes des coefficients, ainsi que le bouton « Default », sont grisés et il est alors encore possible de modifier la valeur consigne et d’appuyer sur le bouton « GO ! » (Fig.8).



Figure : Extension de fenêtre propre au mode « Auto Mode », après envoi de la consigne

# **Approfondissement du sujet**

A cette étape du stage, les objectifs de départ ont été atteints et vient alors le moment d’approfondir les missions du stage : continuer le développement de l’IHM en mettant en place les modes calibration et séquence de vol ; améliorer ces mêmes modes afin d’avoir un plus grand champ de manœuvre et aussi dans le but d’améliorer les conditions d’asservissement du dispositif.

## **Mise en œuvre des modes « Calibration » et « Séquence de vol »**

# **Conclusion**

**Bilan :**

**Apport personnel :**

# **Bibliographie**

**Nom1, Nom2, & Nom3** (Année).Titre. *Sous titre*. URL

# **Annexes**

**Annexe 1 : Dépôt GitHub du projet Bras Drone**

<https://github.com/InnovationLab-EFREIParis/Stage_1DOF_DroneBench>