

Projet Njörd
Topographie d'une zone
par communication avec une équipe de drones

AIGREAUULT Clément - HENRIO Jordan - PHAM Chitin

22 mars 2015

Introduction

Nous vivons dans un monde où la technologie a atteint un point permettant de “donner vie” à des objets. Si bien qu’ils peuvent prendre des décisions, apprendre et communiquer. Une telle avancée permet des milliers d’applications aussi bien pour le divertissement, la domotique, l’industrie, ou encore l’assistance.

Parfois l’Homme peut être amené à devoir exécuter certaines missions sur des terrains dont il ne possède pas une connaissance exacte (comme par exemple une ville ayant subi une catastrophe naturelle). Ainsi un des problèmes majeurs des agents de sécurité est de connaître exactement la situation afin de mettre en place une stratégie d’approche. Des pertes humaines ne sont pas un risque à prendre, alors un intermédiaire devient nécessaire.

Grâce à l’avancée de la robotique, de l’intelligence artificielle et de nos moyens de communication sans fil, la création d’une équipe de robots permettant l’analyse d’un lieu peut être d’une très grande utilité dans ce genre de situation. Des pertes matérielles ne sont pas aussi grave que des pertes humaines.

C’est pourquoi nous avons choisi, dans le cadre de notre projet de fin d’études, de créer une équipe de drones volants qui communiquent ensemble par l’implémentation d’un serveur central qui reçoit des informations de la part des drones et qui dessine la topographie de la zone analysée. Ce rapport a pour but de présenter le développement et les choix technologiques de ce projet. Il explique les calculs réalisés pour le choix des composants, les erreurs que nous avons faites et présente les résultats obtenus pendant les phases de tests.

Table des matières

1 Serveur	4
1.1 Principe de fonctionnement	4
1.1.1 Modèle du réseau	4
1.1.2 Fonctionnement interne du serveur	5
1.2 Implémentation	6
1.3 Résultat	7
1.4 Envoi d'ordres	8
2 Drone	9
2.1 Composants	9
2.1.1 Microcontrôleur	10
2.1.2 Equilibrage et localisation	10
2.1.3 Communication avec le serveur	11
2.1.4 Contrôle moteur	12
2.1.5 Moteurs	12
2.1.6 Mesure de la topographie	12
2.2 Assemblage	12
2.2.1 Circuit	13
2.2.2 Fixations moteur	13
2.2.3 Production des pièces manquantes	15
2.2.4 Fabrication et premiers essais	16
3 Analyse	18
3.1 Conception	18
3.1.1 Poids	18
3.1.2 Alimentation	18
3.2 Fournisseurs	19
3.2.1 Délais	19
3.2.2 Fiabilité	19
3.3 Assemblage	20
3.4 Expérience	20
4 Deuxième drone	21
4.1 Moteurs	21
4.2 Batterie	22
4.3 Coût total	22
5 Conclusion	24
A Suivi de projet	26
A.1 Gestionnaire de version	26
A.2 Communication	26
A.3 Calculateur	26

B Fonctionnement d'un gyroscope et utilisation du MPU6050	27
B.1 Historique	27
B.2 Principe de fonctionnement	27
B.2.1 Description de l'appareil	27
B.2.2 Principe	27
B.2.3 Le gyroscope dans notre montage	29
B.2.4 Implémentation	29
C Calculs mécaniques	31

Chapitre 1

Serveur

Le but de ce chapitre est de présenter le serveur mis en place. Dans un premier temps nous expliquons le modèle de réseau utilisé pour la communication entre les drones et le serveur, et le fonctionnement interne du serveur. Dans une deuxième partie nous abordons, la manière dont nous avons implémenté cela.

1.1 Principe de fonctionnement

1.1.1 Modèle du réseau

Pour réaliser notre application nous avons choisi de mettre en place un modèle de communication basé sur un réseau étoilé. Le serveur représente le noyau du modèle et les branches sont représentées par les drones (voir Figure 1.1). Ainsi l'objectif du serveur est de dessiner la topographie de la zone étudiée à l'aide des données récoltées par l'équipe de drones. Bien que les drones se doivent d'être indépendants, il est important de toujours en garder le contrôle. Ainsi, le serveur a aussi la possibilité d'envoyer des ordres aux drones suivant certaines situations.

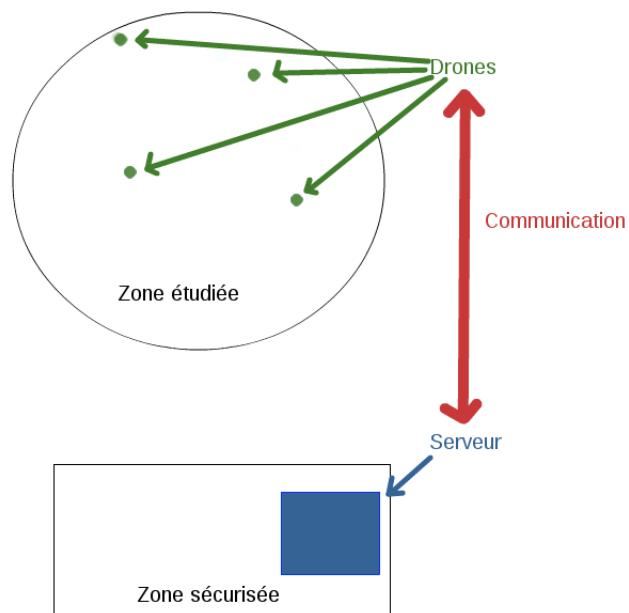


FIGURE 1.1 – Schéma du réseau

Nous avons choisi ce modèle car il répond à nos besoins et qu'il est plus simple à mettre en place qu'un réseau maillé par exemple. Chaque drone peut communiquer avec le serveur mais pas les autres drones. Et le serveur connaît l'ensemble des drones utilisés dans l'application et peut donc communiquer avec eux. Aussi, si l'un des drones venait à tomber en panne durant une analyse, cela n'empêcherait pas le bon déroulement de l'application puisque le serveur pourrait continuer de communiquer avec le reste des drones, contrairement à une topologie en anneau par exemple (qui au passage augmenterait la latence de réception des données).

1.1.2 Fonctionnement interne du serveur

En ce qui concerne le fonctionnement interne du serveur nous avons pensé qu'il serait plus judicieux de le découper en plusieurs entités, où chacune d'elles serait associée à une tâche particulière. Ainsi, nous avons effectué le découpage suivant :

- Communication
- Sauvegarde/Chargement des données
- Topographie/Décision d'ordre

Le serveur est donc constitué de trois tâches qui tournent en concurrence à "l'infini". En effet, si nous avions fait une seule et unique tâche nous risquerions de perdre des données. En effet, le temps que le serveur traite les informations qu'il a reçues, les drones continueraient de lui envoyer des données. Mais si le serveur n'écoute pas à ce moment là, alors ces données seraient perdues.

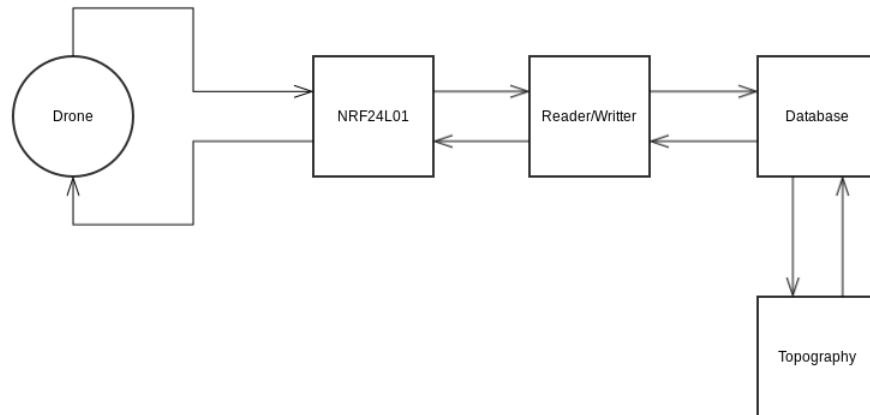


FIGURE 1.2 – Transitions des données

La première tâche, *Communication* (nommée *NRF24L01* sur la Figure 1.2, en référence au composant utilisé pour la communication), se charge de lire les messages envoyés par les différents drones et de les réécrire sur le port série du serveur. En effet, une partie du serveur est constitué d'un montage à base d'*Arduino* et c'est notre seul moyen de faire passer les données du microcontrôleur (voir section 2.1.1) vers le serveur. Cette même tâche se charge dans un deuxième temps de lire le port série, afin de vérifier s'il y a des ordres à envoyer aux drones. Si c'est le cas elle se charge de les communiquer aux drones concernés.

La deuxième tâche, *Sauvegarde/Chargement des données* (nommée *Reader/Writer* sur la Figure 1.2), lit le port série du serveur et enregistre chaque message dans une base de données. Dans un deuxième temps elle accède au contenu de la base de données, afin de vérifier si des ordres doivent être envoyés. Si c'est le cas elle les écrit sur le port série afin de les transmettre à la première tâche.

La troisième et dernière tâche, *Topographie/Décision d'ordre* (nommée *Topography* sur la Figure 1.2), récupère les entrées de la base de données (qui se comporte comme une pile) et les insère dans une matrice. Cette matrice représente la zone étudiée en vue de dessus, avec chacune de ses composantes représentant l'altitude aux coordonnées correspondantes aux indices de la composante. Ainsi, si $M_{1,1} = 150$ (avec M la matrice représentant la zone) cela signifie qu'au point (1, 1) de la zone un drone a mesuré une altitude

de 150 centimètres. À chaque fois qu'une donnée est insérée dans la matrice, cette tâche se charge de dessiner le nouveau contenu à l'écran. Ce qui permet à l'utilisateur de suivre en direct l'évolution de l'analyse, et ce de manière graphique. Dans un deuxième temps cette tâche analyse si un ordre doit être envoyé. Cela dépend de plusieurs paramètres. Par exemple, si une zone de la carte n'a pas encore été dévoilée le serveur peut demander à un drone de s'y rendre pour y récolter des informations. Ou si un drone n'a plus beaucoup de batterie, le serveur peut lui demander de revenir dans la zone sécurisée afin que l'utilisateur le recharge. Si cette troisième tâche détermine qu'un ordre doit être envoyé, alors elle l'écrit dans la base de données afin de le faire remonter à la seconde tâche.

Maintenant que nous en savons un peu plus sur le principe de fonctionnement, nous pouvons présenter la manière dont nous avons implémenté cela.

1.2 Implémentation

La première tâche est constituée d'une partie matérielle et logicielle. La partie matérielle est un simple montage formé par une carte Arduino et un transmetteur/récepteur radio (voir Figure 1.3).

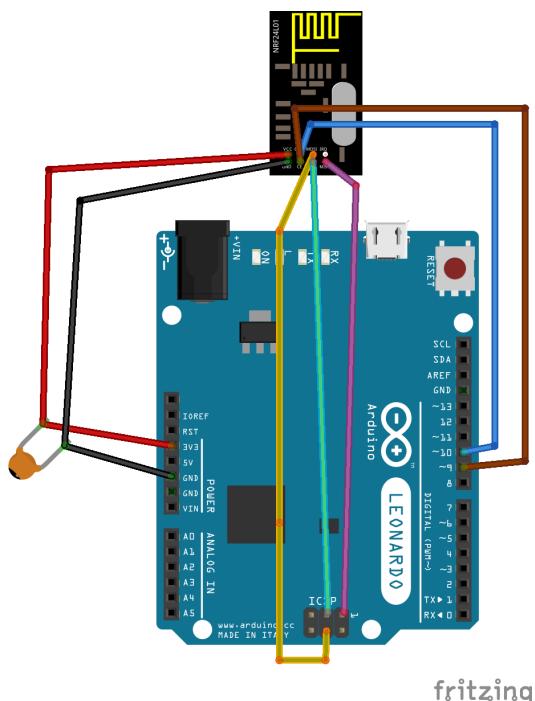


FIGURE 1.3 – Montage matériel du serveur

Puisque cette tâche utilise un montage à base d'Arduino, la partie logicielle de cette tâche est codée dans le langage d'Arduino. Ce programme se contente de parcourir l'ensemble des adresses des drones connus et de lire les messages reçus. Un message est représenté par un tableau de la forme indiquée par la Figure 1.4.

Avec :

- d : identifiant du drone
 - x : position en abscisse
 - y : position en ordonnée
 - z : altitude du drone

d	x	y	z	$s1$	$s2$	$s3$	$s4$	$s5$	$s6$	e
-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	-----

FIGURE 1.4 – Représentation d'un message de drone

<i>d</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>e</i>
----------	----------	----------	----------	----------

FIGURE 1.5 – Représentation d'un ordre

- s_1 à s_6 : valeurs des capteurs
- e : code d'état

La tâche se charge alors de recopier le contenu des tableaux, sur le port série afin de les communiquer à la deuxième tâche. Une fois l'ensemble des messages recopiés, elle lit le port série afin de voir si des ordres doivent être envoyés. Si c'est le cas, elle forme un tableau (représenté par la Figure 1.5) et le transmet au drone concerné.

Avec :

- d : identifiant du drone destinataire
- x : position cible en abscisse
- y : position cible en ordonnée
- z : altitude cible du drone
- e : code supplémentaire

Que ce soit pour les messages ou pour les ordres, on peut remarquer qu'une valeur e est présente dans la dernière case du tableau. Cette valeur additionnelle permet de communiquer une information supplémentaire dans un message. Par exemple, on peut imaginer qu'un drone envoie $e = 5$ ce qui pourrait signifier "Je n'ai plus de batterie". Dans ce cas le serveur sait interpréter le cas où $e = 5$ et construirait un ordre en conséquence.

La deuxième tâche, quant à elle, est implémentée en *Python*[1]. Nous avons choisi ce langage car nous n'avons pas besoin d'un langage puissant comme le *C/C++* et il est moins gourmand que *Java*. De plus, il possède une communauté énorme. Ainsi, il existe des bibliothèques pour tout et n'importe quoi. Le langage étant très simple de base, avec toutes ces bibliothèques il devient sûrement le langage le plus simple pour déployer de petites applications. Par exemple, il existe une bibliothèque pour accéder au port série de la machine, avec des fonctions très simples d'utilisation.

Quand la deuxième tâche récupère un message elle doit l'insérer dans une base de données. Notre application ne nécessite pas la puissance du *SQL*. En effet, tout ce que nous voulons faire ces récupérer tout le contenu, entrée par entrée. Ainsi, nous n'avons pas besoin de faire des requêtes avec des entrées classée dans un certain ordre, ou alors des requêtes avec des conditions, etc. C'est pour cette raison que nous avons choisi d'utiliser une base de données *Redis*[2]. C'est une base de données basée sur des ensembles "clé-valeur". Ainsi, dans notre application la zone étudiée (la clé) sera associée à une pile de message (la valeur). Un autre point fort de notre choix d'implémentation est qu'il existe une bibliothèque pour la manipulation de *Redis* avec *Python*.

La troisième tâche est elle aussi implémentée en *Python*. Dans la section 1.1.2 nous avons expliqué que nous représentons la zone étudiée par une matrice. Nous partons du principe que nous ne connaissons pas la taille de la zone. Ainsi, notre matrice doit être constamment redimensionnée. Il existe encore une bibliothèque très utile en *Python*, nommée *Numpy*[3]. C'est une bibliothèque scientifique qui propose divers fonctions implémentant des algorithmes connus pour le calcul scientifique, mais dans notre cas ce qui nous intéresse c'est les structures de données qu'elle propose. En effet, les matrices *Numpy* sont très puissantes car elles disposent de divers méthodes pour leur manipulation et notamment des méthodes de redimensionnement dynamique. Aussi, cette tâche doit représenter graphiquement le contenu de la matrice. *Numpy* est très souvent couplé à une seconde bibliothèque nommée *MatPlotLib*[4]. Celle-ci permet de dessiner des graphiques à l'écran. Elle fonctionne très bien avec *Numpy* puisque ses méthodes s'attendent déjà à recevoir des objets venant de cette dernière.

Maintenant que nous avons présenté le fonctionnement du serveur nous allons pouvoir vous présenter un exemple de résultat.

1.3 Résultat

La Figure1.6 est une capture d'écran d'une topographie que nous avons obtenue par le biais du serveur.

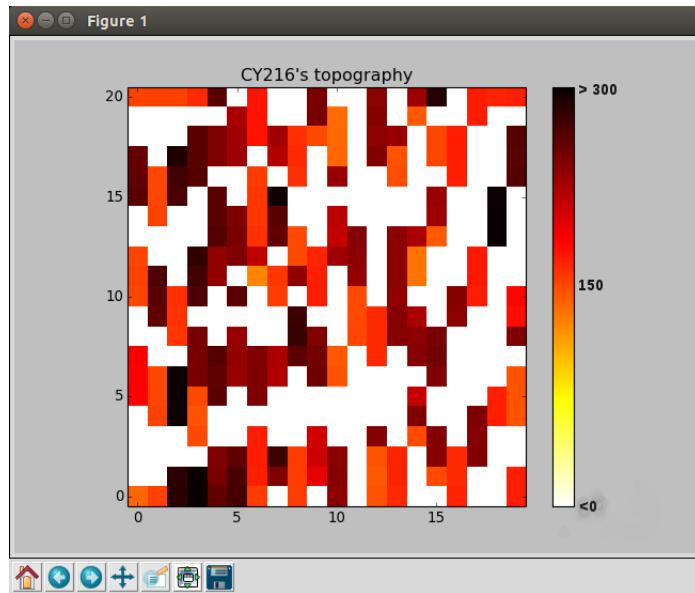


FIGURE 1.6 – Exemple de topographie

On peut y voir un certain nombre d'éléments. Le plus visible est le graphique lui-même. Il représente la zone étudiée en vue de dessus. Ainsi à chaque coordonnée de la zone est associée une certaine hauteur. Le degré de cette hauteur est représenté par une couleur plus ou moins foncé. Plus cette couleur est foncée plus le point est élevé. Sur la droite du graphique se trouve sa légende. Elle indique la valeur en centimètres du degré de hauteur. On remarque donc que pour des points blancs cela représente le sol, et que pour des points noirs cela représente une hauteur de trois mètres. Cela est dû au fait que les capteurs ultrasons que nous utilisons pour les mesures ont une distance de mesure maximum. Mais le serveur lui peut fonctionner avec n'importe quelle valeur.

Il faut noter que nous ne possédions pas de drone fonctionnel pour faire les essais du serveur. Ainsi l'exemple de topographie montré par la Figure 1.6 ne représente rien de spécial. Nous avons fourni des coordonnées aléatoires pour chaque point et nous avons fait varier les mesures du capteur en plaçant notre main devant et en jouant avec la distance.

Dans tous les cas, lors de cet essais la réception et la représentation des messages se sont avérées fonctionnelles. Ainsi, si le serveur était utilisé avec un drone qui fournit sa véritable position et les valeurs renvoyées par ses capteurs, le serveur fournirait toujours les résultats attendus.

1.4 Envoi d'ordres

Toutefois, le serveur n'est pas encore totalement fonctionnel. Il reste l'envoi d'ordre à implémenter. La troisième tâche peut déterminer si une partie de la carte contient une zone encore non découverte. Ainsi, elle parcourt l'ensemble des drones et vérifie s'il existe un drone pour lequel un ordre n'a pas été donné (c'est-à-dire s'il existe un drone qui n'est pas en cours de déplacement vers une position cible). Si c'est le cas elle insère un ordre dans une deuxième pile Redis. La deuxième tâche lit le contenu de cette seconde pile. Si elle n'est pas vide elle réécrit l'ordre sur le port série du serveur. Cependant, nous n'arrivons pas encore à lire et écrire simultanément sur le port série, du côté Arduino. Donc nous ne sommes pas encore capable d'envoyer les ordres aux drones.

De plus notre serveur ne détermine le besoin d'envoyer un ordre seulement dans le cas d'une partie encore non dévoilée de la carte. Mais il devrait être capable de déterminer des ordres en fonction des différents états du drone. Par exemple dans le cas où le drone n'a plus de batterie, pour lui demander de revenir à la "base". Pour établir une liste exhaustive de tous les états nécessitant un ordre, il nous faudrait faire des essais à l'aide d'un drone fonctionnel, ce que nous n'avons pas réussi à obtenir. Mais nous aborderons ce problème dans la suite de ce rapport.

Chapitre 2

Drone

Étant donné notre cursus, nous ne savions pas réellement comment procéder pour monter un drone. Nous avons commencé par nous renseigner sur ce qui se fait en matière de drones. Il faut savoir qu'il en existe de plusieurs types, des petits, des grands, des appareils avec un vol "agressif" (rapide et agile), d'autres avec un vol optimisé pour la prise de vues, certains avec un vol dit "hybride", etc.

Pour l'application que nous voulons faire nous avons plutôt besoin d'un drone avec un vol hybride. Le but est de dessiner la topographie d'une zone, pour cela nous utilisons un capteur ultrason qui mesure la distance entre le drone et ce qu'il y a en dessous. Nous n'avons donc pas besoin d'un vol assez lent pour faire des prises de vues, mais il ne faut pas que le drone soit trop rapide afin de prendre le plus d'informations possible. De plus, pour des questions pratiques, il faut que le drone ait assez d'autonomie pour ne pas demander que sa batterie soit rechargeée pendant une session d'analyse.

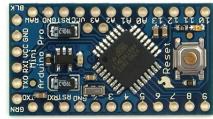
Parmi les drones déjà existants, le drone *Crazyflie* de chez *Bitcraze*[5] nous a intéressés par sa petite taille (voir Figure 2.1), par le fait qu'il soit libre et qu'on puisse facilement acheter tous les composants séparément. Nous avons donc décidé de baser notre modèle sur ce petit drone. Plus concrètement, le nôtre a une taille similaire au Crazyflie et dispose de la même batterie, des mêmes moteurs et des mêmes pales mais le reste des composants sont différents. Nous ne voulions pas passer directement par un Crazyflie, car un de nos objectifs est de construire le robot de A à Z. De plus ce modèle n'est pas tout à fait adapté à ce que nous voulons faire, car il est trop léger et est alors trop véloce. Aussi il ne possède pas de capteur pour récolter des informations sur la zone survolée. Donc dans tous les cas nous aurions été obligés de le modifier.



FIGURE 2.1 – Crazyflie

2.1 Composants

L'objectif de cette section est de présenter les différents composants que nous avons utilisés pour construire ce premier drone.



(a) Image de l'Arduino Pro Mini



(b) Photographie de notre Arduino Pro Mini

FIGURE 2.2 – Image et photographie de l'Arduino Pro Mini

2.1.1 Microcontrôleur

Un microcontrôleur est un *system on chip*, c'est-à-dire que c'est une petite carte électronique proposant un certain nombre de fonctionnalités et pouvant fonctionner seule. C'est souvent un micro-processeur monté sur une carte avec plusieurs broches sur lesquelles l'utilisateur peut y connecter d'autres composants. Ainsi il peut réaliser un montage complexe qu'il pourra utiliser en programmant le microprocesseur. Au début de notre année scolaire, nous avons eu un séminaire de cours pour nous apprendre le langage *Arduino*. Nous avons pu découvrir un langage vraiment simple à prendre en main lorsque l'on a déjà quelques bases en programmation avec des langages comme le *C*, ou le *C++*. Nous nous sommes donc tournés vers les technologies proposées par *Arduino* pour le choix du microcontrôleur. Finalement, nous avons opté pour une *Arduino Pro Mini*. Le principal intérêt de cette carte se trouve dans sa petite taille et sa légèreté, 18 sur 33 millimètres pour seulement deux grammes. De plus elle propose un nombre suffisant de broches pour l'ensemble de notre montage.

Une fois le microcontrôleur en main, il nous faut ajouter d'autres composants nécessaires à la mise en place d'un drone. En branchant ces composants dans les trous sur l'extérieur de la carte nous pourrons les contrôler de manière logicielle, en codant le microprocesseur grâce au langage *Arduino*. Le microprocesseur, lui, se chargera de les faire fonctionner physiquement.

2.1.2 Equilibrage et localisation

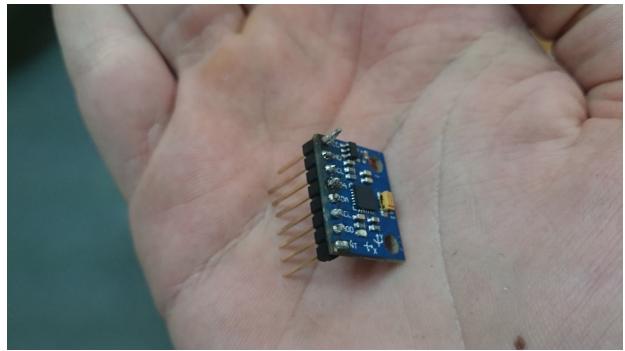
Il est important de disposer d'une technologie pour assister le drone à se stabiliser. Pour cela, ce dernier doit connaître "en permanence" son angle d'inclinaison. Nous avons donc besoin d'un gyroscope. Le large catalogue de modules *Arduino* propose une pièce qui fournit un gyroscope et un accéléromètre, le *MPU-6050* (voir Figure 2.3). Ce module a une taille et un poids similaires à ceux du microcontrôleur, 25.5 sur 15.2 millimètres pour 1.5 grammes. Un autre point fort de ce circuit est qu'il est très utilisé au sein de la communauté *Arduino*. Il est donc facile de trouver des exemples d'utilisation.

Pendant un certain moment nous nous sommes demandé comment nous pourrions connaître la position de notre drone dans l'espace. Naturellement nous avons pensé au GPS, mais la précision de ces technologies (pour rester dans un budget abordable) n'est clairement pas assez précise. Bien entendu, dans le cadre où le drone devrait faire son analyse en extérieur sur une zone assez grande, les GPS sont intéressants. Mais notre drone devra simplement analyser une salle de classe, alors une précision "au mètre près" est beaucoup trop large. Nous aurions plutôt besoin d'une précision de l'ordre du décimètre. Une autre solution a été évoquée, créer notre propre système de localisation, en créant une triangulation[6] à l'aide d'un réseau d'antennes. Ce principe consiste à placer trois antennes autour d'une zone et qui émettent un signal. L'objet qu'on souhaite localiser réceptionne ces signaux et calcule sa position dans l'espace en fonction de sa position par rapport à l'ensemble des émetteurs. Toutefois, pour des raisons de coûts cette solution ne nous semble pas viable sur notre drone. Aussi, elle n'est pas conforme à la problématique de notre projet, puisque nous partons du principe que nous ne connaissons pas l'étendue de la zone. Ainsi, nous ne pourrions pas placer nos antennes.

Finalement une connaissance, nous a conseillé de travailler avec un accéléromètre. Un accéléromètre



(a) Image du MPU6050



(b) Photographie de notre MPU6050

FIGURE 2.3 – Image et photographie du MPU6050

est un module permettant de mesurer l'accélération linéaire d'un système. En connaissant l'accélération de notre drone, il sera alors possible de déterminer sa vitesse et donc, ses déplacements dans l'espace. Nous avons donc choisi de nous tourner vers cette solution. C'est aussi pour cette raison que nous avons choisi le MPU6050 car il embarque un accéléromètre.

Pour pouvoir utiliser ce composant nous avons utilisé la bibliothèque développée par Jeff Rowberg[7]. Ses travaux permettent de représenter logiciellement un gyroscope et de récupérer les valeurs calculées par le MPU6050. Ainsi, en récupérant ces mesures nous pouvons déterminer la puissance requise pour chaque moteur afin d'équilibrer le drone.

Vous pouvez retrouver nos recherches à propos du fonctionnement d'un gyroscope, dans l'Annexe B de ce rapport.

En cours de développement nous nous sommes rendu compte que déterminer la position du drone dans l'espace avec seulement un accéléromètre n'est pas une solution envisageable. En effet, afin de calculer cette position il faut intégrer deux fois les mesures renvoyées par le capteur. Or, à chaque intégration s'introduit une petite erreur. Mais la double intégration fait que nos calculs suivent une erreur quadratique. Ainsi, il nous serait peut-être possible de déterminer correctement une première position, mais au fil de l'exécution de l'application, nos calculs seraient complètement faussés. Il faut savoir que la problématique de déterminer la position dans l'espace d'un objet en mouvement dans un endroit fermé est encore au stade de la recherche. Cette problématique pourrait faire un sujet de projet de fin d'études à elle toute seule.

2.1.3 Communication avec le serveur

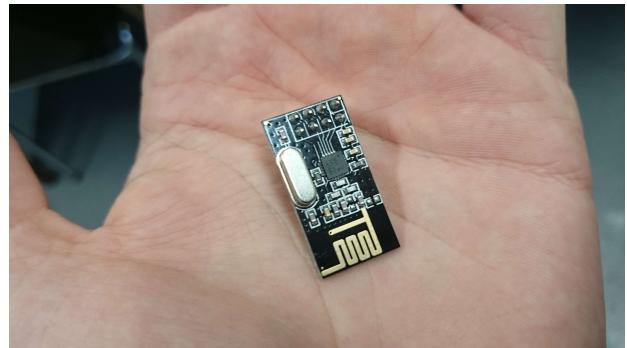
Afin que le drone puisse communiquer avec le serveur nous avons dans un premier temps pensé à utiliser des modules *XBee*, qui utilisent le protocole de communication sans fil, défini par le standard *IEEE 802.15.4* et qui sont très répandus au sein de la communauté Arduino. De plus il semblerait que ces composants soient très simples d'utilisation et que la qualité des signaux soit très fiable. Toutefois, les modules *XBee* sont relativement chers (23 €) dû au fait que le protocole utilisé soit breveté, nous nous sommes alors penchés vers une autre technologie. Nous avons finalement opté pour un module de transmission/réception radio à fréquence 2.4GHz (voir Figure 2.4). Ils sont eux aussi très répandus chez les utilisateurs d'Arduino. Comme pour les autres composants que nous avons choisis, il est bon marché (0.8 €) et d'une taille de 15 sur 29 millimètres pour deux grammes.

Cependant ces composants sont un peu plus compliqués à prendre en main. Mais heureusement, il existe de nombreuses bibliothèque. Nous avons donc créé une surcouche de la bibliothèque *RadioHead*[8]. Cette bibliothèque permet de représenter logiciellement un transmetteur radio. À partir de cet objet il est possible d'envoyer et lire des messages en fournissant une adresse (qui représente un port entre le transmetteur et le récepteur qui une autre instance de ce composant, sur une autre plaquette Arduino). Notre surcouche nous permet de vérifier le bon envoi et la bonne réception des données en retournant un code d'erreur en cas d'échec.

Toute fois le très faible coût de ces composants se ressent directement sur la fiabilité de leur signaux. En effet, l'envoi et la réception des données est malheureusement un peu aléatoire. Il n'est pas rare de



(a) Image du NRF24L01



(b) Photographie de notre NRF24L01

FIGURE 2.4 – Image et photographie du NRF24L01

ne recevoir qu'un message sur deux.

2.1.4 Contrôle moteur

La plupart des drones embarquent un *Electronic Speed Controller (ESC)* pour chaque moteur. Ces composants servent à contrôler la vitesse du moteur ainsi que son sens de rotation. Il faut savoir qu'un ESC vaut environ 16 €. Ce qui fait 64 € pour un quadcopter. Outre le prix important de ces modules, leur poids (25 grammes/module) aussi nous oblige à nous orienter vers une autre solution. Nous avons donc pensé à créer nos propres ESC simplement en branchant un transistor entre chaque moteur et les broches de sortie de l'Arduino. Les transistor on pour propriété de fonctionner comme des interrupteur électrique. Ainsi en couplant les variations du signal électrique généré par l'Arduino et la propriété du transistor nous obtenons un ESC fait main.

2.1.5 Moteurs

Dans l'introduction nous avons expliqué que nous utilisons les mêmes moteurs que ceux du Crazyflie. Cependant, comme pour les autres composants il faut coder en Arduino leur contrôle. Ainsi nous avons implémenté une petite bibliothèque permettant de représenter logiciellement parlant, un moteur. Cet objet possède alors une méthode permettant de modifier sa vitesse. Vitesse qui sera alors modifiée logiciellement puis physiquement.

2.1.6 Mesure de la topographie

Pour mesurer une distance il existe plusieurs types de capteur différents, comme par exemple un laser. Cependant, nous ne possédons pas ce genre d'outil mais lors du séminaire d'Arduino du début d'année nous avons utilisé des capteurs ultrason (*HC-SR04*). Pour ce projet nous avons donc choisi de réutiliser ces capteurs (pour des raisons économiques). Toutefois, dû aux propriétés du déplacement d'une onde sonore dans l'espace, ce genre de capteur n'est pas ce qu'il y a de plus fiable. L'onde sonore se répandant sous une forme d'arc de cercle, on ne peut pas savoir avec certitude quel point précisément a été mesuré.

Mais dans le cadre de la présentation de notre application ce problème ne sera pas vraiment dérangeant.

Le HC-SR04 (voir Figure 2.6) est lui aussi un composant très répandu au sein de la communauté Arduino. Ainsi nous pouvons directement utiliser une bibliothèque déjà implantée, *NewPing*[9]. Elle permet de représenter logiciellement un capteur ultrason et de calculer la distance d'un point par rapport au montage en mesurant le temps de retour de l'onde sonore.

2.2 Assemblage

Une fois tous les composants reçus et une fois toutes les bibliothèques développées nous avons pu assembler le tout. Toutefois, il restait encore deux pièces manquantes au puzzle. En effet, il manquait

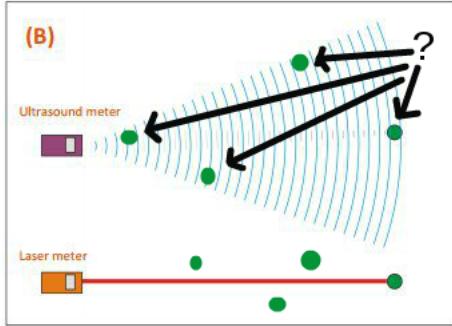


FIGURE 2.5 – Comparaison des fiabilités de mesure

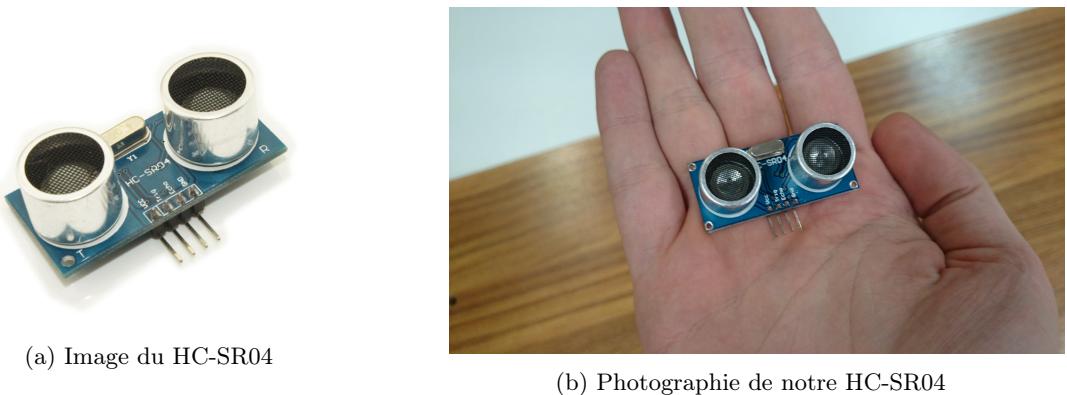


FIGURE 2.6 – Image et photographie du HC-SR04

encore le circuit qui relit tous les composants à l'Arduino et un moyen de fixer les moteurs au drone. Cependant ces deux éléments ne sont pas des articles que l'on peut acheter sur un site de vente. Nous allons expliquer dans cette section comment nous avons obtenu ces deux dernières pièces et présenter le résultat après assemblage.

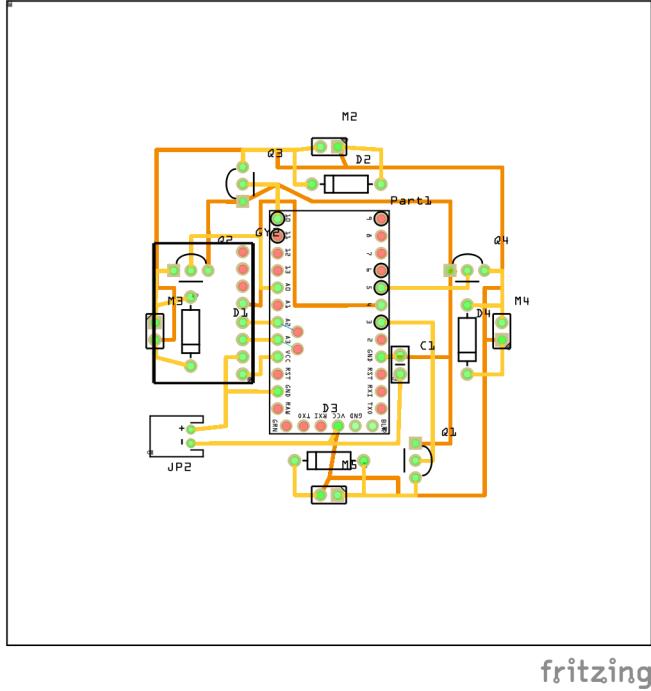
2.2.1 Circuit

Pour pouvoir assembler tous les composants ensemble il faut réaliser un circuit imprimé. Pour cela nous avons utilisé le logiciel *Fritzing*[10]. C'est un logiciel libre qui permet de réaliser des schémas électriques ainsi que le PCB associé (c'est à dire le dessin qui va servir à la production du circuit). Ce logiciel propose de base un large catalogue de composants mais il est aussi possible de créer les siens. Aussi, un grand nombre de personnes utilisent ce logiciel, ce qui permet dans la plupart des cas de ne pas avoir à créer de composants puisqu'il y a de grandes chances que des utilisateurs les aient déjà dessinés.

La Figure 2.7 représente le PCB de notre drone. C'est le type de dessin qui servent à la production de circuits imprimés. Le dessin d'un PCB est une étape obligatoire dans la production d'un montage électrique car un circuit dépend du résultat attendu. Le montage entre un drone et un ordinateur ne sera pas le même et même le montage entre un drone et un autre modèle de drone sera différent. C'est pour cette raison qu'on ne peut pas acheter un circuit déjà fait.

2.2.2 Fixations moteur

Comme nous nous sommes inspirés du Crazyflie, nous avons fait le choix de ne pas utiliser de châssis. Ces composants sont assez compliqués à choisir, car il faut choisir entre un matériau léger mais coûteux et un matériau "lourd" et bon marché. Donc nous avons pensé que le circuit pourrait lui-même faire office de châssis. Bien entendu, ce choix est risqué car le drone est plus fragile. Mais notre application n'est pas vraiment "à risque" dans le sens où notre drone n'est pas censé faire des acrobaties et que nous comptons mettre en place des sécurités pour qu'il évite les obstacles de son environnement.



fritzing

FIGURE 2.7 – PCB du drone

De plus les moteurs du Crazyflie ont une dimension assez particulière. Habituellement les moteurs de drone sont plus gros ainsi il serait difficile de trouver un châssis qui soit compatible avec nos moteurs. De plus, souvent les moteurs de drone se vissent sur le châssis, mais les moteurs du Crazyflie ne possèdent pas de pas de vis. Nous étions donc dépendant de la solution utilisé par le Crazyflie, c'est à dire utiliser des petites pièces en plastique qui se chargent de fixer les moteurs au circuit imprimé.

Ces fixations ne sont pas disponibles à la vente. Cependant, BitCraze a déposé le fichier de modélisation sur leur compte GitHub[11]. Ainsi, nous avons pu télécharger ce fichier afin de le fournir à une imprimante 3D pour produire les pièces qu'il nous fallait.

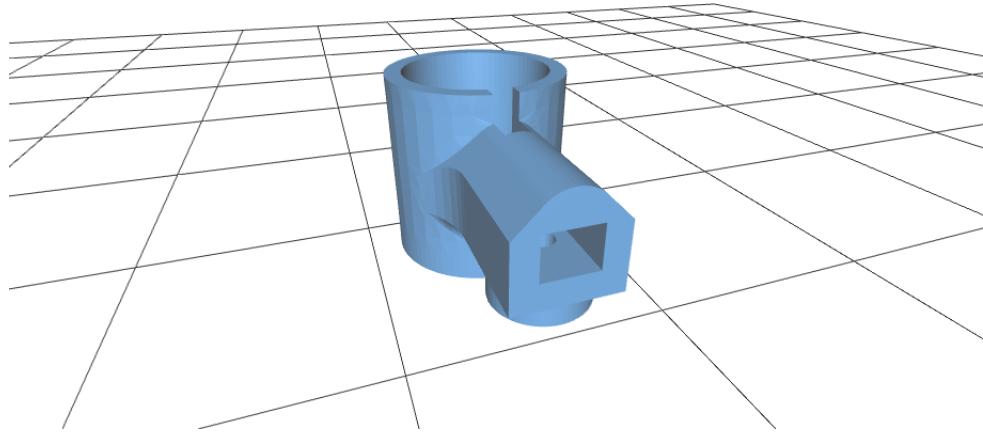


FIGURE 2.8 – Modèle de fixation moteur

La Figure 2.8 est une capture d'écran du fichier de modélisation des fixations moteurs.

2.2.3 Production des pièces manquantes

L'EISTI étant une école d'ingénieur informatique, elle ne dispose ni du matériel nécessaire pour la production de circuit imprimé, ni d'imprimante 3D pour imprimer nos fixations moteur. Ainsi, nous avons dû chercher une entité externe à notre école pour pouvoir obtenir nos deux dernières pièces.

Dans un premier temps nous avons pensé à nous servir du fablab[12] de l'université de Cergy-Pontoise. Cet atelier se trouve à Gennevilliers (92), il propose un grand nombre d'outils mis à disposition gratuitement. La seule contrepartie est de donner de son temps à la vie du laboratoire. Toutefois pour utiliser certaines machines comme les imprimantes 3D (de qualité), les découpeuses laser, les fraiseuses, etc... il est nécessaire de suivre une formation. Les gérants étant conscients que nous sommes soumis à des deadlines, nous ont proposé de faire les choses à notre place. En échange nous devions simplement faire des formations sur l'utilisation du logiciel Fritzing et sur la fabrication d'un drone. Ils nous ont alors demandé de leur envoyer un mail afin qu'on puisse rester en contact. Ce que nous avons fait au retour de notre visite. Cependant, nous n'avons jamais obtenu de réponse.

Nous avons alors cherché un autre moyen. Il existe des entreprises qui disposent de quelques imprimantes 3D. Elles les mettent alors à disposition du public contre une petite somme d'argent. Nous avons envoyé une commande, à l'aide du fichier de modélisation. Mais notre demande s'est vue être refusée car leurs imprimantes ne sont pas assez précises pour nos besoins.

À cette même époque, notre école accueillait le concours annuel de robotique, *RobAFIS*[13]. Durant la compétition des entreprises exposaient leurs produits. Notamment *Polytech Instrumentation*[14] (une filiale de *Jeulin*[15]) exposait des imprimantes 3D. Nous en avons alors profité pour leur demander s'ils accepteraient de nous imprimer nos pièces. Ils ont alors accepté et nous avons reçu nos pièces (voir Figure 2.9) par courrier deux semaines plus tard.



FIGURE 2.9 – Photographie des fixations moteur

Une fois les fixations moteur en notre possession, il ne nous manquait plus que le circuit pour assembler le tout. Pour la production de ce dernier nous avons eu l'idée de nous tourner vers l'*ENSEA* qui est une école d'ingénieur en électronique proche de la nôtre. Nous leur avons fourni les fichiers générés par Fritzing puis ils ont lancé la production. Quelques jours plus tard nous avons pu aller récupérer notre circuit. Cependant, il restait encore quelques modifications à faire dessus, afin qu'il soit vraiment opérationnel. En effet, il fallait encore le découper afin d'y créer des embouts pour les fixations moteurs. Pour cela nous avons fait appel à une connaissance qui dispose des outils nécessaires pour ce genre de situations. Il en a aussi profité pour retravailler un peu, à l'aide d'une fraiseuse, les fixations qui étaient un peu trop petites. La Figure 2.10 est une photographie de notre carte avant et après découpe.



(a) avant

(b) après

FIGURE 2.10 – Photographie de notre circuit avant et après découpe

2.2.4 Fabrication et premiers essais

Une fois les deux pièces manquantes rassemblées nous avons pu passer à l'assemblage du drone. Nous avons donc soudé les composants sur le circuit et collé les fixations. Il est important de noter qu'au moment de l'assemblage nous avons constaté que l'Arduino que nous avions achetée n'était pas conforme au modèle officiel. En effet, les broches de l'alimentation étaient inversées. Par conséquent, notre circuit ne pouvait pas fonctionner. Nous avons dû racheter d'urgence une Arduino (cette fois-ci, officielle). Ce problème nous aura fait perdre une semaine de travail. La Figure 2.11 est une photographie du résultat final.

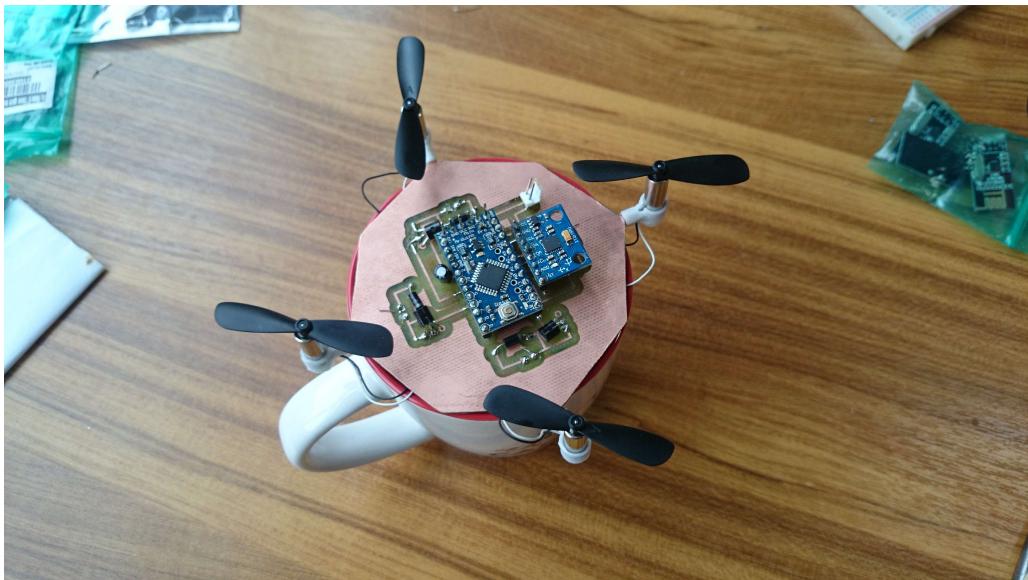


FIGURE 2.11 – Photographie du résultat final

Lorsque nous avons enfin terminé d'assembler le drone notre premier réflexe a été de vérifier s'il pouvait décoller. Nous avons alors pour cela écrit simple code Arduino qui se contentait de faire tourner les moteurs à mi-régime. Sans grande surprise cela ne suffisait pas à le faire décoller. Nous avons alors essayé de les faire tourner à plein régime. Et nous avons pu constater un problème. Lorsque l'Arduino délivre sa puissance maximum, les moteurs ne tournent pas au maximum de leur capacité. En d'autres termes, l'Arduino n'est pas capable de délivrer assez de courant pour faire tourner les moteurs au maximum de leur capacité. Le drone n'a donc pas décollé.

Nous avons eu ensuite une deuxième idée pour tester le décollage. Faire un "by-pass" de l'Arduino.

C'est à dire brancher les moteurs directement sur l'alimentation. En procédant de cette façon les moteurs tournent bien au maximum de leur capacité. Mais nous avons constaté un deuxième problème. Un moteur est défectueux. Ainsi, lors de notre premier essai sans passer par l'Arduino le drone s'est soulevé d'un côté mais le manque de couple produit par le moteur défectueux a fait que le drone s'est retourné.

Nous pensons donc que si nous possédions quatre moteurs en bon état, le drone serait capable de décoller si on les branche directement sur l'alimentation. Cependant, ce ne serait pas vraiment intéressant car on ne pourrait pas contrôler leur vitesse. Ainsi, le drone ne pourrait que s'élever verticalement. Nous ne pourrions pas le faire avancer ou aller sur les côtés. De plus on serait dans l'incapacité de le faire s'arrêter.

Nous avons alors compris que nous ne pourrions pas faire décoller ce prototype. De plus, la soutenance approchait à grand pas. Nous n'étions qu'à deux semaines de la présentation alors nous n'avions pas le temps de préparer un second drone à partir d'autres composants. Nous avons toutefois préparé un code pour la présentation, qui servait à montrer l'influence du gyroscope sur le contrôle des moteurs. Lorsqu'on incline le drone, on peut voir que certains moteurs réagissent à cette inclinaison afin d'essayer de stabiliser. Par exemple, si on penche le drone vers l'avant, les moteurs avant vont accélérer afin d'essayer de replacer le drone parallèlement au sol. De plus on peut remarquer que plus l'angle d'inclinaison est important, plus les moteurs accélèrent afin de produire plus de puissance pour essayer de stabiliser l'appareil.

Chapitre 3

Analyse

Le but de ce chapitre est de faire une analyse complète de nos erreurs et des problèmes que nous avons rencontrés. Cette analyse pourra alors nous servir de point de départ pour la mise en place d'un nouveau drone. Dans n'importe quel projet il est important de faire le point sur les erreurs commises afin de ne plus les reproduire à l'avenir.

Cette analyse parcourera l'ensemble des étapes du projet, allant de nos premières réflexions jusqu'à l'assemblage de l'appareil, en passant par les problèmes qui ne dépendent pas de nous mais de nos fournisseurs.

3.1 Conception

Dans cette section nous allons aborder les erreurs commises dès la conception du drone. C'est à dire lorsque nous avons fait le choix de nos composants.

3.1.1 Poids

Comme expliqué dans le chapitre 2, nous avons choisi de nous inspirer du Crazyflie. Ce drone a un type de vol très rapide et agile, alors que nous souhaitions que notre drone ait un type de vol plutôt hybride. Nous avons choisi les mêmes moteurs que le Crazyflie, mais le reste des composants étaient différents. En choisissant nos composants nous avons aussi calculé la somme du poids de chaque composant. Cependant, afin de connaître le poids total de notre drone nous avons dû estimer le poids de certains éléments (comme les transistors, les diodes, les soudures, le circuit, etc...). Pour cela nous avons pensé que le poids de ces éléments ne dépasserait pas 10% de la somme calculée précédemment. Nous arrivions donc à un poids total de 35 grammes contre 19 grammes pour le Crazyflie. Nous espérions donc que cette différence de poids irait à notre avantage, en ramenant le vol du drone à celui que nous attendions. L'erreur que nous avons commise à ce moment là, c'est d'avoir confiance en nos choix. Les moteurs du Crazyflie ont une documentation vraiment très pauvre. À tel point que leur puissance n'est pas même pas mentionnée. Les acheter en espérant que leur couple serait suffisant était vraiment une erreur naïve de notre part. Comme nous avons pu le constater lors de nos premiers essais, le couple de ces moteurs ne suffit pas si l'on passe par l'Arduino car notre drone est beaucoup trop lourd. Par contre il semble suffire s'ils sont directement reliés à l'alimentation. Nous en avons donc conclu que nous aurions dû choisir des moteurs plus puissant.

3.1.2 Alimentation

Après avoir commandé l'ensemble de nos composants nous nous sommes rendu compte d'un problème au point de vue de l'alimentation. Les moteurs du Crazyflie nécessitent une alimentation 3.3V. Nous avons établit le fait que l'ensemble de notre circuit serait alimenté en 3.3V. Nous avons donc choisi la même batterie que le Crazyflie, l'Arduino Pro Mini dans sa version 3.3V (et non 5V), etc... Cependant nous nous sommes aperçus, par la suite, que les capteurs ultrasons que nous avions en notre possession demandait une alimentation de 5V. Ainsi, nous savions que le premier drone que nous allions construire ne pourrait pas nous permettre de faire l'application que nous avions prévue. Nous aurions pu éviter ce problème en

achetant que des composants fonctionnant en 5V (et donc en choisissant une batterie autre que celle du Crazyflie). Nous aurions pu garder les moteurs que nous avions choisis, il aurait juste fallu créer un pont diviseur de tension[16] à l'entrée de chaque moteur. Un pont diviseur de tension est un montage de deux résistances très simple à mettre en place, permettant de réduire une tension. Ainsi nous aurions pu avoir un circuit qui fonctionne en 5V, sauf à l'entrée des moteurs où cette tension aurait été réduite à 3.3V.

Nous avons tout de même pensé qu'il serait intéressant de monter ce premier drone tout en sachant qu'il ne pourrait pas remplir notre cahier des charges. En effet, nous avons pensé qu'il pourrait nous permettre de vérifier nos calculs (autonomie de la batterie, poussé des moteurs, puissance requise, ...). Finalement, les résultats de nos calculs étaient plutôt proche de la réalité. Nous avions estimé l'autonomie de la batterie à sept minutes. Et en réalité elle se décharge en cinq minutes en faisant tourner les moteurs à plein régime. Cependant, il est important de noter qu'il n'y a ni les capteurs ultrason ni le transmetteur/récepteur radio. L'autonomie est donc trop courte pour notre application. Aussi, lorsque les moteurs tournent à plein régime on peut remarquer que le drone se soulève et que ce qui l'empêche de décoller est le moteur défectueux. On peut donc en conclure que nos calculs mécaniques étaient plutôt bons. Vous pouvez retrouver ces calculs dans l'Annexe C de ce rapport.

3.2 Fournisseurs

Le rôle de cette section est de présenter les problèmes venant des différents fournisseur et qui donc ne dépendent pas de nous.

3.2.1 Délais

Comme nous l'avons expliqué précédemment, notre école étant une école d'informatique est donc peu adaptée à des projets qui ont pour objectif de faire une réalisation matérielle. Nous avons alors eu besoin d'un support extérieur pour les fixations moteur, la réalisation du circuit imprimé et sa découpe. Mais la recherche de ces entités prend un certain temps, auquel il faut ajouter le temps de création des éléments. Nous arrivons alors à un délai conséquent, qui peut prendre plusieurs mois suivant l'entité. Par exemple si l'on passe pas un faclab, il faut ajouter à cela le temps qu'il faut pour apprendre à se servir des machines. En ce qui nous concerne nous avons eu un peu de chance en rencontrant Polytech Instrumentation. Car sans eux nous aurions peut-être pris encore plus de temps pour trouver des imprimantes 3D. De plus, il est important de noter que le temps de réceptions des différents composants électronique prend un temps considérable (de l'ordre d'un mois). Par fois ce temps peut être utilisé pour avancer d'autres parties du projet (comme le serveur). Mais dans l'autre cas, c'est du temps de perdu car nous avons besoin des composants pour apprendre à nous en servir, développer leur librairie et donc tout simplement avancer dans le projet.

Nos premiers essais ont été fait fin février. La soutenance étant prévue pour le 16 mars, cela nous a laissé deux semaines de marge. Cependant, ce laps de temps est loin d'être suffisant pour concevoir un second drone. Ainsi, nous n'avons pas pu profiter de l'expérience aquise tout au long du projet, pour mettre en place une seconde version du drone. Nous pensons alors que les premiers essais auraient dû être fait fin 2014 pour nous laisser le temps de produire un drone fonctionnel. Malheureusement, le projet de fin d'étude, commençant en septembre, cela ne laisse que quatre mois pour produire un premier drone. Ce qui est un délai vraiment trop court. Ainsi, nous pensons qu'une telle application ne peut pas être faite en sept mois, avec nos moyens.

3.2.2 Fiabilité

Un des avantages d'Arduino (et du Crazyflie) est que ce soit un projet libre. Cependant, ceci peut devenir un désavantage. En effet, n'importe qui peut produire les composants. Ainsi il est possible d'acheter des composants à un prix vraiment faible comparé aux fournisseurs officiels. Mais, il n'existe aucune garantie de fiabilité si on ne passe pas par ces fournisseurs et bien trop souvent ce coût réduit se ressent sur la qualité des composants.

Par exemple, nous pouvons citer les problèmes d'Arduino que nous avons rencontrés. Après avoir reçu tous les composants commandés, l'Arduino manquait toujours à l'appel. Ainsi après avoir attendu plus de deux mois, nous avons recontacté le vendeur qui nous a assuré que le composant était arrivé chez nous.

Nous avons alors demandé un remboursement et commandé chez un autre fournisseur. Aussi, comme nous l'avons expliqué précédemment, lors de l'assemblage du drone, nous nous sommes rendus compte que l'Arduino que nous avions commandé n'était pas une "Arduino Pro Mini" mais une "Arduino Mini Pro" (donc une contrefaçon). Et les broches de l'alimentation étaient inversées, ce qui faussait tout notre circuit.

Nous pouvons citer un autre exemple, les quatres moteurs que nous avons achetés proviennent du même fournisseur. Cependant, il y a un moteur défectueux dans le lot.

Un dernier exemple en citant le manque de qualité du côté des composants radio. Nous ne pouvons recevoir tous les messages envoyés (de l'ordre de un message sur deux). Si nous utilisions ces composants dans une application réelle nous ne pourrions pas parler d'une transmission fiable. De plus cela pourrait être dangereux, si par exemple on demandait à un drone de se poser et qu'il ne recevait pas le message. Il est important de noter qu'au début du développement de la librairie, la fiabilité était encore plus médiocre. Mais en recherchant sur Internet, nous avons vu des sites webs qui expliquaient qu'il faut brancher un condensateur entre les deux broches de l'alimentation. Le fournisseur vend donc un produit qui n'est pas du tout fiable.

Ainsi, nous avons compris que faire des économies peut être un avantage (nous avons pu monter un drone pour un peu moins de 30 €, tandis que le Crazyflie vaut environ 120 €). Mais à vouloir trop chercher le moins cher, on prend des risques sur la qualité des produits. Il faut donc mieux rechercher, se méfier de la contrefaçon et faire plus d'essais lors de la réception des pièces.

3.3 Assemblage

En ce qui concerne l'assemblage, il y a une problématique que nous n'avons pas prise en compte au moment de la conception. En effet, en choisissant les moteurs du Crazyflie, nous étions dépendant de leur dimension atypique. Aussi, les moteurs de drones possèdent généralement des pas de vis afin d'être vissés au châssis. Ce qui n'est pas le cas des moteurs que nous possédons. Ainsi, nous avons plus ou moins été contraint d'utiliser le même système de fixation que le Crazyflie. Cependant, nous avons omis le fait que le Crazyflie est assemblé par des machines et que pour notre drone c'est nous qui allions devoir le monter. Or, les machines peuvent placer des éléments avec un degré de précision proche de la perfection, ce qui n'est pas le cas de l'être humain. Donc, outre le fait que nos fixations risquaient de ne pas être parfaitement fiables (les imprimantes 3D étant une technologie assez récente) nous serions incapable de fixer les moteurs parfaitement verticaux. Ce qui entraînerait un défaut dans le vol de l'appareil. En effet, si un moteur était pencher plus d'un côté que les autres, cela produirait une dérive dans la direction du drone. Aussi, suivant le défaut d'inclinaison des moteurs, cela peut entraîner une perte de poussé des moteurs et donc rendre le décollage de l'appareil plus difficile.

3.4 Expérience

Il est important de noter le côté ambitieux de notre projet. En effet, nous avons jusqu'à cette année suivi une formation orientée dans l'ingénierie informatique. En nous spécialisant dans l'informatique embarquée, nous avons mis un pied dans l'ingénierie système. Cependant, nous ne sommes pas des ingénieurs système. Ainsi même pour des personnes de cette profession, un tel projet nécessite plusieurs années.

De plus nous avons eu affaire à des contraintes et réfléchir à des problématiques auxquelles nous ne sommes pas habitué (comparer du matériel, prendre en compte des délais de livraison, contraintes système telles que la tension, le courant, le poids, la puissance délivrée...). Nous avons commis beaucoup de petites erreurs pour cette raison, mais si nous devions réfléchir à une seconde version nous serions probablement mieux préparé car nous avons appris beaucoup de ces erreurs.

Chapitre 4

Deuxième drone

Bien que le temps ne nous permette pas de réaliser un second drone, nous pouvons tout de même établir un nouveau devis afin d'utiliser une partie de l'expérience que nous avons aquise.

Pour rappel, les principaux problèmes de notre premier drone sont :

- Moteurs pas assez puissants
- Voltage du circuit
- Autonomie de la batterie

Pour ce second drone nous changeront donc les moteurs et la batterie. Nous garderont par contre les autres composants qui malgré leur manque de fiabilité suffirait pour une simple présentation. Bien entendu, pour une application réelle il faudrait voir à choisir des composants de meilleure qualité.

4.1 Moteurs

Le problème de nos moteurs actuels est le couple maximum qu'ils peuvent fournir. En effet, celui-ci est sur la limite de ce dont notre drone à besoin. Ainsi, à plein régime ils pourraient peut-être suffire, mais nous ne pourrions pas vraiment jouer sur leur vitesse de rotation.

C'est pour cette raison que nous avons cherché des moteurs plus puissants. Nous avons alors choisi les *DYS BE1806-13* (voir Figure 4.1). Ces moteurs n'ont plus rien avoir avec ceux que nous avions avant puisqu'il sont environ trois fois plus gros et douze fois plus lourd. Ceci va entraîner un changement radical dans la dimension de notre drone. En fait, un drone de la dimension du Crazyflie n'est pas forcemment un bon point de départ pour des débutants comme nous car les composants sont assez spécifiques. Ainsi, en nous ramenant à une dimension plus "normale", nous élargissons notre catalogue de composants. Ce deuxième drone devrait alors faire environ 30 centimètres de diamètre pour un peu moins de 370 grammes.



FIGURE 4.1 – Image d'un moteur DYS BE1806-13

Pour ces moteurs nous disposons d'une documentation assez complète. Ainsi, nous sommes capable de faire nos calculs sans faire d'estimation. Ces moteurs sont capable de fournir une puissance maximum de 89 watts. Pour un drone de 370 grammes il faut compter une puissance 9 watts par moteur. Nous pouvons donc remarquer que les moteurs choisis sont bien supérieurs à ce que le drone requiert. Mais, cela nous permettrait d'avoir une grande marge de manoeuvre sur la vitesse de rotation des moteurs.

Aussi, cela nous permettrait d'éviter de faire tourner les moteurs à plein régime de manière constante, ce qui augmenterait leur durée de vie et qui déchargerait moins vite la batterie.

Dû aux nouveaux moteurs qui sont beaucoup plus puissants et à la nouvelle dimension de notre drone, il nous faut choisir de nouvelles pales (plus longues). Nous avons alors choisi des *APC 6*2 .049* (voir Figure 4.2). Ces pales font six pouces de longueur (environ 15 centimètres).



FIGURE 4.2 – Image d'une pale APC 6x2 .049

Grâce à ces nouvelles pales plus longues, le drone pourra plus facilement brasser l'air et donc décoller plus facilement. Par contre, nous perdrons en vitesse, mais pour rappel, nous cherchons justement à obtenir un vol hybride afin d'obtenir le plus d'information possible sans être lent au point de pouvoir faire des prises de vue.

4.2 Batterie

Comme nous l'expliquions dans le chapitre précédent, nous avons un problème de voltage sur notre premier drone. Les capteurs ultrasons ont besoin d'une tension de 5V, tandis que la batterie fournit du 3.3V. Il nous faut alors un voltage plus élevé. C'est pour cette raison que nous avons sélectionné une *Turnigy 1700Mah 7.4v* (voir Figure 4.3). On peut remarqué que la tension délivrée par cette batterie est supérieure à 5V, mais comme nous l'avons expliqué une tension peut se réduire à l'aide d'un pont diviseur de tension (par contre le problème inverse est plus compliqué à résoudre).



FIGURE 4.3 – Image d'une batterie Turnigy 1700Mah 7.4v

D'après nos calculs, le drone devrait avoir besoin de 1600mA par moteur pour décoller et l'ensemble des autres composants demandent 124mA de manière continue. Ainsi, avec cette batterie qui peut fournir 1700mAh, nous devrions avoir une autonomie d'une quinzaine de minutes. L'autonomie de ce nouveau drone est donc doublée par rapport au précédent, alors qu'il doit alimenter six capteurs ultrasons ainsi que le transmetteur/récepteur radio (ce que ne faisait pas l'ancien).

4.3 Coût total

Ce nouveau devis nous indique un prix beaucoup plus élevé que pour le premier. En effet, nous arrivons à environ 75 €, tandis que le premier drone nous a coûté environ 25 €. Ceci s'explique notamment que le prix des batteries est proportionnel à leur capacité. Aussi, les moteurs du Crazyflie sont vraiment bons marchés. Dès que l'on regarde d'autres moteurs on arrive à des prix beaucoup plus élevés.

Aussi il ne faut pas oublier de changer l'Arduino Pro Mini 3.3V, en sa version 5V.

Chapitre 5

Conclusion

Maintenant que toutes les étapes du projet ont été abordées, nous pouvons conclure ce rapport.

Nous pouvons commencer par dire que divers éléments ont été implémentés. Premièrement nous pouvons discuter du serveur. Celui-ci est quasiment fonctionnel, dans le sens où il remplit bien sa fonction première à savoir, dessiner la topographie de la zone étudiée. Cependant, il n'est pas entièrement fonctionnel puisque sa deuxième fonction, envoyer des ordres aux drones, ne fonctionne pas encore. En effet, le serveur arrive bien à déterminer si un ordre doit être envoyé puis à faire remonter cet ordre jusqu'à la première tâche (c'est-à-dire, écrire l'ordre sur le port série de la machine). Cependant, nous n'arrivons pas à faire en sorte que la première tâche écrive les messages des drones sur le port série puis simultanément lise les ordres sur le port série. Pour le moment on n'arrive qu'à faire l'un ou l'autre.

En admettant que le serveur soit fonctionnel. Il nous faudrait quand même un drone opérationnel afin de faire de vrais essais. Ce qui nous permettrait alors d'établir une liste complète des états du drone qui nécessitent un envoi d'ordre. Car il est compliqué d'établir une liste exhaustive sans voir le déroulement réel de notre application. Biensûr, nous pouvons commencer par penser à quelques états. Mais il est quasiment certain que nous en oublierons. C'est pour cette raison qu'un drone fonctionnel serait d'une grande utilité.

Dans un deuxième temps nous pouvons parler de la construction du drone. Ceci représentait un challenge énorme. En effet, ce projet requiert des connaissances pluridisciplinaires et complexes (mécanique, électronique, informatique, physique, ...). Au vu de notre formation orientée informatique, nous avons fait beaucoup trop de petites erreurs dans les domaines qui ne sont pas notre spécialisation. Ces erreurs ont conduit à un drone ne pouvant pas voler. Cependant, nous avons beaucoup appris de nos erreurs. Mais ce projet était un peu trop ambitieux. Nous ne disposions que de sept mois pour le réaliser, alors qu'il faudrait plutôt partir sur un ou deux ans. De plus ce manque de temps, ne nous a pas permis de profiter de l'expérience aquise durant le projet.

Même si nous avions réussi à produire un drone qui est capable de voler. Nous serions encore bloqué à la problématique de la détermination de la position du drone dans l'espace étudié. Il plutôt simple de localiser un drone sur une grande étendue (c'est-à-dire, lorsque l'on ne cherche pas à obtenir une précision au décimètre près) en extérieur grâce au GPS. Cependant, nous savions que nous devrions présenter le projet dans une pièce. Ainsi, la précision d'un GPS n'est pas assez suffisante (de l'ordre de trois à cinq mètre). Donc, le GPS ne détecterait quasiment aucun déplacement. C'est pour cette raison que nous avons cherché d'autres solutions et que l'idée de calculer la position du drone en mesurant et en intégrant deux fois son accélération (à l'aide d'un accélémètre) nous est venue. Cependant, chaque intégration introduit une erreur et dû à la double intégration, cela produit une erreur quadratique. Ainsi, nous serions peut-être capable de localiser à peu près le drone au début de l'application, mais tout au long de son déroulement l'erreur introduite par l'intégration fausserait complètement nos résultats. Il est important de noter que cette problématique est encore au stade de la recherche. Et que pour le moment il n'existe peu (voir pas) de moyens fiable de localiser un objet en mouvement avec beaucoup de précision.

Bien que ce projet n'est pu aboutir à l'objectif initialement prévu, cela a été un plaisir de travailler sur ce sujet. Du fait des nombreuses connaissances qu'il demande dans des domaines variés, nous pouvons dire que c'est un projet très enrichissant techniquement parlant. Et puisque nous avons dû faire appel à de l'aide extérieure à l'EISTI afin d'obtenir certains de nos composants, nous pouvons aussi dire que c'était enrichissant sur le plan relationnel. Car nous avons dû faire de nombreuses démarches vers des

entités extérieures à notre école afin d'obtenir les derniers éléments qu'il nous manquait.

Mais nous n'aurions peut-être pas pu réussir ces démarches sans l'aide de madame *Nga Nguyen*, pour obtenir la participation de Polytech Instrumentation et sans l'aide de madame *Besma Zeddini*, pour obtenir la participation de l'ENSEA. C'est pour cette raison que nous souhaitons remercier les quatre noms cités ci-dessus, ainsi que les divers connaissances qui nous ont aidé dans notre projet, à savoir pour la découpe du circuit et pour divers conseils techniques.

Annexe A

Suivi de projet

A.1 Gestionnaire de version

Pour ce projet nous avons choisi de former un groupe de trois personnes. Travailler en équipe a ses avantages, notamment pour le partage de tâches. Mais ceci peut entraîner des problèmes de version entre les travaux de chacun. Pour palier ce problème nous avons choisi d'utiliser le gestionnaire de version Git[17]. Cet outil est vraiment pratique, puisqu'il permet de travailler à distance, de mettre à jour le code de chacun des membres, d'avoir un suivi de chaque implémentation, de faire des versions tests (sans toucher à la version fonctionnelle) ou encore de revenir à des versions précédentes du projet. Aussi cet outil nous permet de donner une visibilité à notre travail. Ainsi, si une personne compte faire un projet semblable au nôtre il pourra consulter, reprendre, modifier, améliorer... ce que nous avons fait.

Plus précisément nous avons créé une "organization"[18] sur *GitHub*[19]. Ceci nous a permis de décomposer l'ensemble du projet en plusieurs répertoires. Ainsi chacun peut accéder à la partie du projet qui l'intéresse sans avoir à récupérer l'ensemble de l'application. Par exemple si un utilisateur souhaite ne travailler que sur le drone, il peut le faire sans avoir à télécharger en plus la partie qui s'occupe du serveur. Aussi un projet bien découpé est plus compréhensible et plus facilement réutilisable. De plus, une "organization" peut héberger un petit site web statique. Ce qui nous a permis de mettre en place notre blog[20].

A.2 Communication

Dès le début du projet nous avons pensé qu'il serait intéressant de tenir un blog pour communiquer notre progression. Lorsque l'on se lance dans un projet de cette envergure il est toujours utile de trouver des ressources sur Internet. Cela peut donner des idées et résoudre des problématiques que l'on rencontre. Afin de pouvoir communiquer avec le plus de monde possible, il est rédigé dans trois langues : anglais, français et japonais. Il présente l'avancée du projet, nos choix de développement, quelques notions de physique et les résultats de nos essais afin de guider les lecteur qui veulent créer une application similaire. Nous avons souhaité présenter le processus de construction d'un drone, sous une forme simple, en expliquant comment les choses fonctionnent.

A.3 Calculateur

Après avoir établit nos différents calculs (autonomie de la batterie, poussée requise, puissance requise,...) nous avons pensé qu'il pourrait être intéressant de créer un tableur qui réalise ces différents calculs automatiquement en lui fournissant les caractéristiques des différents composants choisis par l'utilisateur. Ce tableur se trouve sur notre GitHub, car nous avons pensé qu'il était important de partager ce genre de ressources. Lors du début de notre projet nous aurions été content d'avoir ce genre d'outils sous la main. Bien sûr, il existe sur Internet quelques outils similaires[21] mais ils sont souvent payant ou demandent en entrée des composants bien précis. Or, le nôtre demande les caractéristiques des composants. Ce qui est plus intéressant quand les composants choisis par l'utilisateur ne sont pas connus par le calculateur.

Annexe B

Fonctionnement d'un gyroscope et utilisation du MPU6050

B.1 Historique

Le gyroscope est un appareil inventé par Foucault en 1852. Suite à ses travaux sur la rotation de la terre, avec notamment son pendule, il cherche à créer un système plus simple de démonstration de rotation terrestre. À l'aide de Froment, ils réalisent ce qu'on appelle maintenant le gyroscope.

B.2 Principe de fonctionnement

Le gyroscope est un appareil fonctionnant grâce à un phénomène physique appelé conservation du moment angulaire.

B.2.1 Description de l'appareil

On peut décomposer le gyroscope en plusieurs parties. Une partie centrale (*rotor*) qui est un tore avec une cavité centrale. Cette cavité est traversée par un axe en acier (*spin axis*). Cet axe est alors inséré dans un cadran en métal (*gimbal*). Un enchainement de cadrans est alors présent (*gyroscope frame*), permettant à notre tore centrale d'avoir trois degrées de libertés (trois rotations).

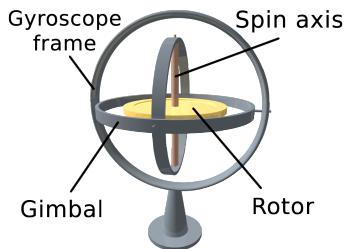


FIGURE B.1 – Composition d'un gyroscope

B.2.2 Principe

Le gyroscope profite d'un principe physique appelé principe de conservation du moment cinétique, ou effet gyroscopique. Cet effet implique que lorsqu'on applique une force sur un solide en rotation (le rotor dans notre cas), il se crée un couple (ω_p) perpendiculaire à cette force. Ce couple permet à notre système d'effectuer une rotation autour d'un axe (axe défini par un point en contact avec un repère fixe) ce qui a pour effet d'annuler la portée instable de la pesanteur. On obtient alors un système en rotation parfaitement stable malgré des angles d'inclinaisons importants.

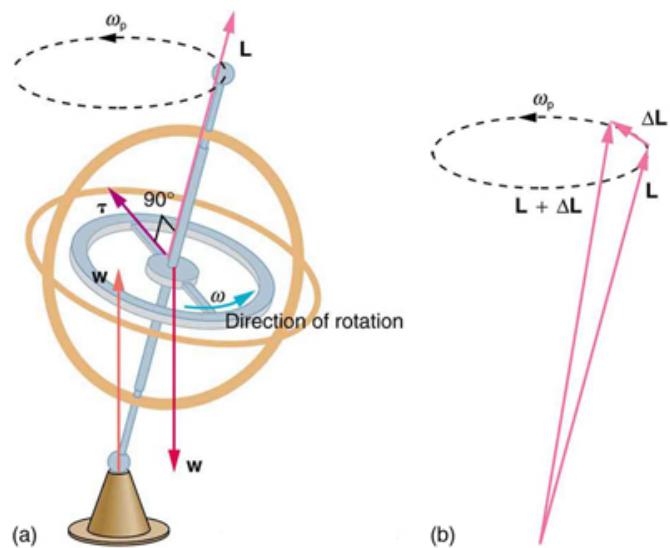


FIGURE B.2 – Descriptif des forces appliquées sur un gyroscope



FIGURE B.3 – Inclinaison maximale

Dans le cas de notre gyroscope, la situation est légèrement différente. En effet, si le fonctionnement est le même, notre système est inversé. Ainsi, les parties extérieures du gyroscope, fixées à notre drone seront mobiles. Elles absorberont les couples et forces énoncées précédemment, permettant au rotor de conserver une inclinaison fixe par rapport au repère Galiléen.

En étudiant les variations d'angles des anneaux extérieurs (puisque l'axe du tore central est fixe par rapport au repère terrestre, il est possible de connaître la variation d'angle des cadrans) nous sommes en mesure de connaître l'orientation de l'appareil par rapport au sol.

B.2.3 Le gyroscope dans notre montage

Le gyroscope choisi pour intégré notre drone est un MPU6050. Ce type de gyroscope, particulièrement répandu dans l'industrie, présente l'avantage d'être compatible avec notre montage, relativement abordable financièrement et de posséder un accéléromètre. Cet accéléromètre étant destiné à nous fournir des informations sur le déplacement, et la position de notre drone.

Ce capteur est constitué de trois axes (les axes X et Y étant indiqués sur la carte, l'axe Z étant perpendiculaire à la plaque (voir figure 1)). Puisqu'il faut que l'effet gyroscopique puisse s'appliquer sur le gyroscope, l'ensemble des angles pouvant être mesurés appartient à $[-80,80]$. Passé cette valeur, la gravité serait trop proche de la composante créée par l'effet gyroscopique, ce qui fausserait les mesures. Les mesures de rotations autour de l'axe Z varient quant à elles entre -180 et 180.

Afin d'utiliser le MPU6050 dans notre montage, nous nous sommes largement inspiré des travaux de Jeff Rowberg[22], qui propose un code permettant de mesurer les valeurs obtenues par les capteurs. Fort de ces informations, une analyse est effectuée afin de définir l'inclinaison de notre drone. Il convient ensuite de piloter les moteurs afin d'effectuer le traitement adéquat. Puisque notre drone a pour but de mesurer une topographie, il est nécessaire d'obtenir un drone en vol stationnaire, c'est-à-dire parallèle au sol. les moteurs sont donc gouvernés par le gyroscope afin de stabiliser.

B.2.4 Implémentation

Le programme est divisé en plusieurs parties. Le fichier *call_gyroscope* permet d'appeler les diverses fonctions nécessaires au bon fonctionnement du gyroscope.

Les fichiers *I2Cdev.cpp* et *MPU6050.cpp* sont des fichiers disponibles sur le compte GitHub de Jeff Roswberg[7]. Ces fichiers permettent la gestion matérielle du gyroscope. Ainsi, d'un signal purement électrique et sans grande signification, ces bibliothèques permettent d'obtenir des valeurs plus intuitives (angles, différentiels de forces, ...).

gyro_lib est l'application développée afin d'assurer la gestion du gyroscope. Elle est divisée en plusieurs fonctions. La fonction *initialise* permet de préparer le gyroscope à la prise de mesure. Ainsi, suite à cette fonction, le système est opérationnel pour prendre des mesures et les stockera dans les variables *gravity*, *ypr*, *aa* et *aaReal* (variables permettant de se rendre compte de la valeur de la gravité, de la rotation autour des axes appelés *Yaw*, *Pitch* et *Roll*, et de l'accélération). La seconde fonction, *loop*, gère la stabilité du drone. Cette fonction est appelée lorsque le drone cherche à stabiliser sa position à une position particulière. On doit avoir une idée des actions à mener sur les moteurs. Par conséquent, lorsqu'elle sera appelée, cette fonction retournera une table de cinq entiers, les quatre premiers représentant l'action à effectuer sur un moteur (variable *moteur[]*) et le dernier renseignant sur la stabilité du drone. Ainsi, si la valeur renvoyée est positive (respectivement négative), il sera nécessaire d'augmenter (respectivement diminuer) la vitesse des moteurs.

Pour avoir une idée de l'action à mener sur chaque moteur, on décide d'acquérir la valeur des angles d'orientations, grâce aux commandes suivantes :

```
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
```

Puis on évalue la valeur de ces angles en testant :

$$\frac{ypr[1] * 18}{M_{PI}} * \frac{ypr[1] * 90}{M_{PI}} * 3 \quad (\text{B.1})$$

Avec ypr une table renvoyant le *YawPitchRoll* (angle d'inclinaison) de notre drone. Les facteurs 18, M_{PI} et 90 sont des facteurs permettant d'obtenir des valeurs en degrés (et non radians). Enfin le facteur 3 permet d'obtenir des actions ayant une influence sur la rotation des moteurs.

On peut remarquer que l'action sur les moteurs implique une modification coordonnée de différents moteurs. En effet, si le drone est incliné avec un *moteur₁* et un *moteur₄* trop bas, il sera nécessaire d'augmenter sa vitesse de rotation afin qu'il gagne en altitude. Néanmoins, il est aussi nécessaire de diminuer la vitesse du *moteur₂* et du *moteur₃* afin de conserver une altitude plus ou moins stable. La Figure B.4 illustre cet exemple.



FIGURE B.4 – Exemple d'action des moteurs suivant l'inclinaison du drone

En évaluant la valeur de ypr , on est en mesure de connaître l'inclinaison du drone afin de réévaluer la vitesse des bons moteurs. Une fois ceci effectué, on peut renvoyer notre table à l'Arduino qui n'aura alors qu'à modifier la vitesse des moteurs

Annexe C

Calculs mécaniques

Table des figures

1.1	Schéma du réseau	4
1.2	Transitions des données	5
1.3	Montage matériel du serveur	6
1.4	Représentation d'un message de drone	6
1.5	Représentation d'un ordre	7
1.6	Exemple de topographie	8
2.1	Crazyflie	9
2.2	Image et photographie de l'Arduino Pro Mini	10
2.3	Image et photographie du MPU6050	11
2.4	Image et photographie du NRF24L01	12
2.5	Comparaison des fiabilités de mesure	13
2.6	Image et photographie du HC-SR04	13
2.7	PCB du drone	14
2.8	Modèle de fixation moteur	14
2.9	Photographie des fixations moteur	15
2.10	Photographie de notre circuit avant et après découpe	16
2.11	Photographie du résultat final	16
4.1	Image d'un moteur DYS BE1806-13	21
4.2	Image d'une pale APC 6x2 .049	22
4.3	Image d'une batterie Turnigy 1700Mah 7.4v	22
B.1	Composition d'un gyroscope	27
B.2	Descriptif des forces appliquées sur un gyroscope	28
B.3	Inclinaison maximale	28
B.4	Exemple d'action des moteurs suivant l'inclinaison du drone	30

Bibliographie

- [1] Site Internet de Python. <https://www.python.org/>.
- [2] Site Internet de Redis. <http://redis.io/>.
- [3] Site Internet de Numpy. <http://www.numpy.org/>.
- [4] Site Internet de Matplotlib. <http://matplotlib.org/>.
- [5] Site Internet de Bitcraze. <http://www.bitcraze.se/>.
- [6] Page Wikipédia sur le principe de triangulation. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Triangulation>.
- [7] Github de JEFF ROWBERG. <https://github.com/jrowberg>.
- [8] Site Internet de la bibliothèque RadioHead.
<http://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/>.
- [9] Tim Eckel. Présentation de la bibliothèque NewPing.
<http://playground.arduino.cc/Code/NewPing>.
- [10] Site Internet du logiciel Fritzing. <http://fritzing.org/home/>.
- [11] GitHub de Bitcraze. <https://github.com/bitcraze>.
- [12] Site Internet du Faclab. <http://www.faclab.org/>.
- [13] Site Internet de RobAFIS. <http://www.robaoris.fr/RobAFIS/Bienvenue.html>.
- [14] Site Internet de Polytech Instrumentation.
<http://www.polytech-instrumentation.fr/fr/p-idp1000000074/accueil.html>.
- [15] Site Internet de Jeulin. <http://www.jeulin.fr/fr/p-idp1024135/accueil.html>.
- [16] Page Wikipédia expliquant le principe du pont diviseur de tension.
http://fr.wikipedia.org/wiki/Diviseur_de_tension.
- [17] Site Internet de Git. <http://git-scm.com/>.
- [18] Répertoire Git du projet Njörd. <https://github.com/NjordProject>.
- [19] Site Internet de Github. <https://github.com/>.
- [20] Blog du projet Njörd. <http://njordproject.github.io/>.
- [21] Calculateur de caractéristiques d'un drone. <http://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php?ecalc&lang=fr>.
- [22] Travaux de jeff rowberg sur le mpu6050. <http://www.i2cdevlib.com/devices/mpu6050>.