

P21 : A la découverte des commandes des drones - semestre 6



Encadrant : M. Nakrachi

Sommaire

Introduction	1
1. Choix du matériel	2
2. Fonctionnement d'un quadricopter - étude du comportement des moteurs	3
3. Modélisation et simulation de l'ensemble moteur-hélice	6
Conclusion	10
Annexe 1 : Diagramme de Gantt	11
Annexe 2 : Maquette pour simuler une translation horizontale	12
Bibliographie	13

Introduction

De nos jours, les drones sont présents dans de nombreux domaines : industrie, agriculture, sports, loisirs, etc. Dans les airs ou dans la mer, ils ont tous des buts différents selon leur utilisation.

Nous allons nous concentrer sur les drones de développement. Ils sont utilisés dans la recherche, l'éducation et par les amateurs de robotique. Ils présentent de nombreux enjeux, comme la commande automatique, l'évitement d'obstacles, la détection d'intrus.

L'ouverture à la programmation et à la modification hardware/software peut être un frein dans la mise en place d'une application d'un drone de développement. C'est pourquoi nous allons nous concentrer sur un drone open source au niveau hardware et software.

Plus particulièrement, notre projet se servira du drone Quadricopter Crazyflie 2.0.

Notre projet visant à asservir en position un drone de façon autonome, il existe de très nombreux scénarios d'usage pouvant s'inscrire dans notre projet. Par exemple, on pourrait imaginer un agriculteur souhaitant contrôler l'état de ses arbres. On pourrait installer des petites balises sur chacun des troncs, et effectuer un vol autonome afin de filmer chacun de ces arbres. L'agriculteur n'aurait qu'à observer la vidéo, sans avoir à se déplacer dans tout le verger. Notre drone étant asservi en position, il décollera et se maintiendra à une altitude supérieure aux arbres (par exemple 3 mètres) et reliera tous les points indiqués par les balises pour ensuite revenir à son point de départ.

Le fil directeur de notre projet est le contrôle d'un drone sous les facettes d'informatique, microélectronique et automatique. Au niveau informatique, nous nous concentrerons sur le développement d'algorithmes de déplacement. Pour la partie électronique nous nous pencherons sur le fonctionnement d'un moteur, des cartes électroniques et des capteurs. Enfin, nous nous servirons de l'automatique pour réguler en position notre drone.

L'objectif final est de programmer le drone mis à notre disposition afin qu'il puisse se déplacer point d'un A point à un B tout en étant stable. Au cours de son déplacement il devra transmettre sa position à l'utilisateur.

Dans un premier temps, nous étudierons le fonctionnement général d'un drone à 4 branches. Ensuite, nous allons étudier les différentes commandes à envoyer au drone afin de le déplacer selon l'axe voulu. Puis, du côté pratique nous allons asservir une position statique à notre drone qu'il devra maintenir quelle que soit la perturbation (vent, etc). Dans un second temps, nous développerons les fonctions de déplacement dans l'espace. Enfin, nous lui donnerons une trajectoire qu'il devra respecter tout au long de son parcours.

Au cours du semestre 6, nous allons nous concentrer sur le fonctionnement général d'un drone à 4 branches, nous verrons quelle commande, en terme de vitesse (qualitatif) envoyer au drone pour qu'il puisse se déplacer et quelles sont ses degrés de liberté. Nous allons ensuite nous concentrer sur l'étude d'un système moteur-hélice. Nous allons le modéliser puis le simuler afin de pouvoir l'asservir convenablement selon notre cahier des charges. Notre réalisation pour ce semestre sera donc une simulation de commande d'un moteur de drone brushless.

1. Choix du matériel

Tout d'abord, notre choix s'était porté sur l'Intel Aero Ready To Fly. En effet, celui-ci dispose d'une carte de développement Intel embarquant une distribution de Linux, couplée à ROS. Avec la suite d'outils Dronecode, nous avons le nécessaire pour pouvoir développer des algorithmes complexes de déplacement et d'évitement d'obstacle. Nous avons étudié le fonctionnement de ce drone, définissent nos axes de travail en fonction des ressources et des possibilités que ce drone avait à nous offrir. Cependant, après avoir contacté plusieurs fournisseurs, nous nous sommes aperçus que le drone ne serait plus produit après juin 2019. À partir de là, nous avons dû chercher un autre drone. Les recherches sur l'Intel Aero, nous avaient permis de mieux définir notre recherche et d'apporter un autre critère : l'open source au niveau du hardware. En effet, le début de notre projet visant à modéliser un moteur de drone, il nous fallait une liste détaillée du matériel composant le drone, comme le moteur, l'ESC, le support moteur, etc., afin de pouvoir les modéliser au mieux et de pouvoir les acheter au besoin, afin de les étudier séparément.

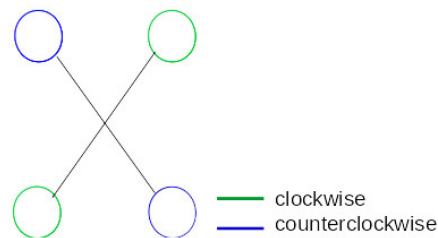
Répondant à tous ces critères, nous avons choisi le drone Crazyflie de chez Bitcraze. Ce drone est customisable avec plusieurs modules, que l'on peut imbriquer les uns avec les autres.

Afin de pouvoir mener à bien notre projet d'étude, nous utiliserons :

- le drone Crazyflie
- 1 jeux d'hélices de rechange (sens horaire + sens antihoraire)
- 4 moteurs
- 1 jeux de 4 supports moteurs
- 1 module radio PA 114990112 (pour la communication avec l'ordinateur)
- 1 module pour insérer une carte SD, 1 pour lire les balises repères, et 1 pour stabilisé le drone
- 4 balises de repérage dans l'espace "Loco positioning node"
- 2 batteries 240mAh LiPo battery

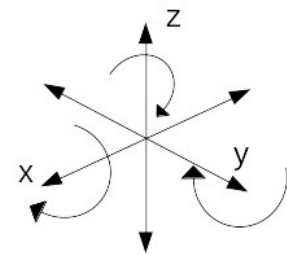
2. Modèle dynamique - étude du comportement des moteurs

Afin de pouvoir réaliser un mouvement quelconque avec notre drone, il faut tout d'abord entraîner les moteurs opposés dans le même sens et les deux autres en sens contraire. Lors de notre étude, nous nous baserons sur le schéma suivant :



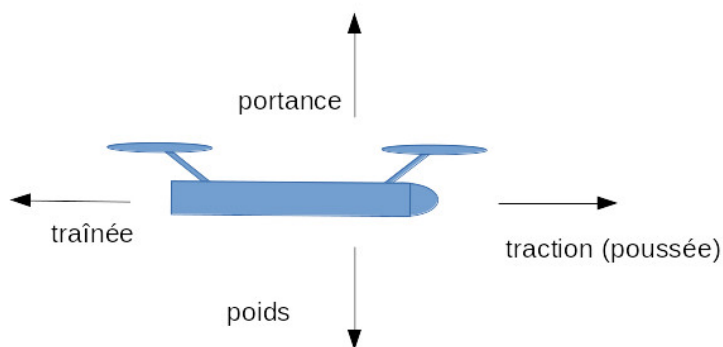
Tout d'abord, on peut dire qu'un drone possède **6 degrés de liberté** qu'il faudra étudier :

- Tangage (pitch) – axe Y
- Roulis (roll) – axe X
- Lacet (yaw) – axe Z
- Avant – arrière (forward/backward) – axe X
- Droite – gauche (right/left) – axe Y
- Haut – bas (up/down) – axe Z



6 degrees of freedom

Au cours de son vol, le drone est soumis à plusieurs forces :



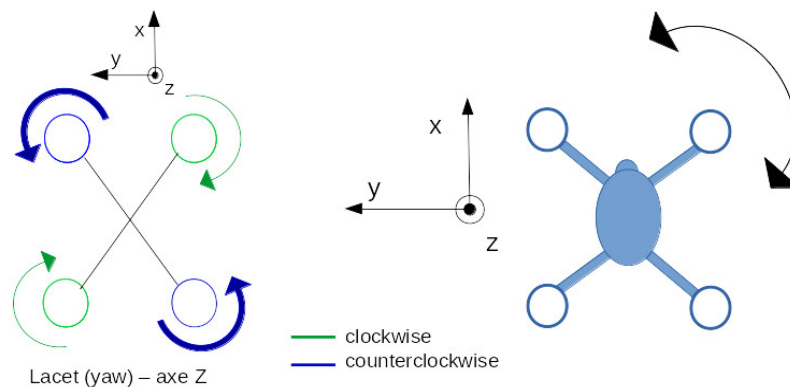
- la traînée : force formée par le vent relatif, et qui s'oppose au déplacement
- la portance : force formée par l'incidence de la main et qui pousse la main vers le haut
- la traction : force formée par les moteurs induisant un mouvement vers l'avant
- poids : force exercée sur le drone du fait de la force de pesanteur
- l'incidence : angle formée par l'inclinaison de la main par rapport au vent relatif

- force de sustentation : composante verticale des résultantes des forces aérodynamiques s'exerçant sur le drone.

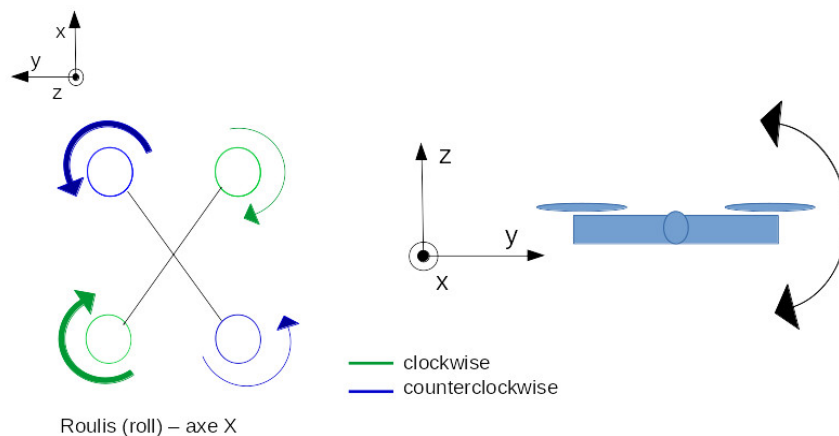
En tournant, les hélices vont engendrer une force de sustentation, qui va compenser le poids du drone. Lorsque cette force dépasse le poids du drone, le quadcopteur s'envole.

Après avoir posé notre cadre d'étude, passons à l'analyse des mouvements du drone : quelle commande envoyer aux moteurs pour réaliser un mouvement selon un des 6 degrés de liberté ? Pour illustrer cette étude, nous avons mis en place une maquette (cf annexe2)

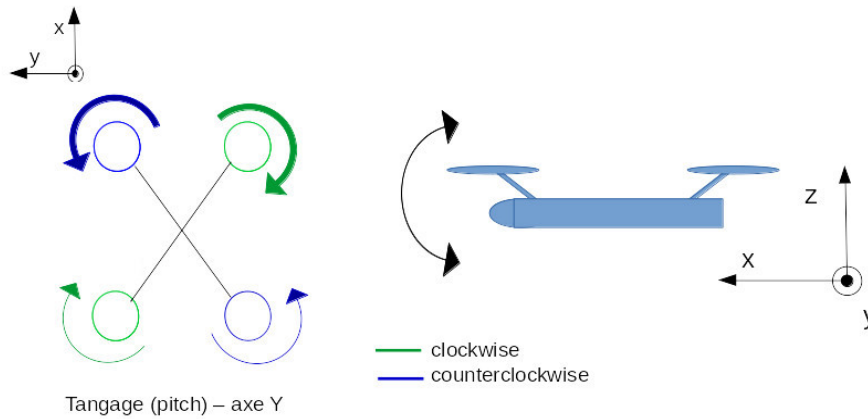
Tout d'abord, intéressons-nous au **lacet**. Il s'agit d'une rotation du drone selon l'axe Z. Pour ce faire, on augmente la vitesse de deux moteurs tournant dans le même sens. Les deux autres tournent à la même vitesse, mais moins vite.



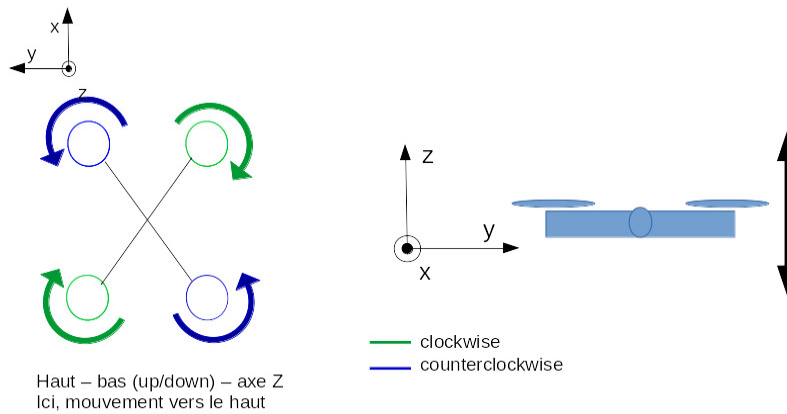
Ensuite, le drone a la possibilité d'effectuer un **roulis**. Il s'agit d'une rotation du drone selon l'axe X. Pour ce faire, on augmente la vitesse de deux moteurs situés du même côté du drone. Les deux autres tournent à la même vitesse, mais moins vite.



De plus, le drone a la possibilité d'effectuer un **tangage**. Il s'agit d'une rotation du drone selon l'axe Y. Pour ce faire, on augmente la vitesse de deux moteurs situés sur l'avant ou l'arrière de notre drone. Les deux autres tournent à la même vitesse, mais moins vite.

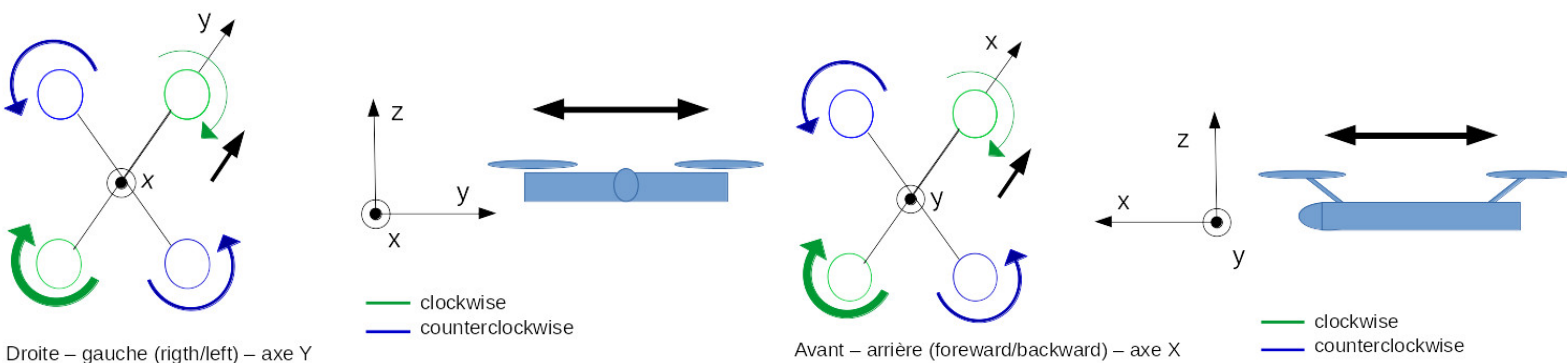


Après avoir étudié le tangage, roulis, lacet, étudions le **mouvement vertical du quadcopteur**. Par mouvement vertical, nous entendons un mouvement parallèle à l'axe Z, c'est-à-dire la montée en altitude ou la descente du drone. Pour ce faire, on doit augmenter simultanément et de façon égale les quatre moteurs pour gagner en altitude et inversement pour redescendre.



Pour finir, étudions les **mouvements horizontaux** du quadrotor. Selon la configuration du drone (en « X » ou en « plus »), et les stratégies de développement des fonctions de déplacement, ces mouvements se réalisent de plusieurs façons. Typiquement, le drone réalisera un lacet (rotation axe Z) et/ou roulis (rotation axe X), suivi d'un tangage (rotation axe Y) puis utilisera ces fonctions pour suivre une trajectoire rectiligne.

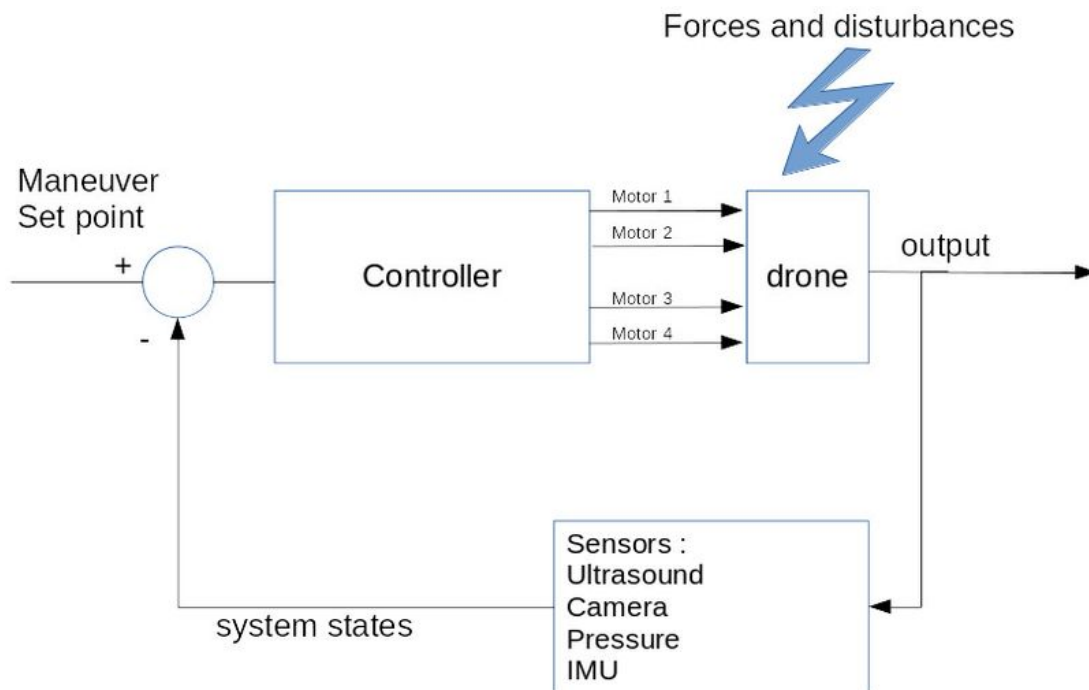
Pour ce faire, on augmente la vitesse d'un moteur et on diminue celle du moteur tournant dans le même sens. Les deux autres moteurs restent à la même vitesse, c'est-à-dire entre la vitesse du moteur que l'on a augmenté et celle du moteur que l'on a diminué.



3. Modélisation et simulation d'un moteur de drone

Après avoir étudié le mode de fonctionnement du déplacement du drone, nous allons étudier sa régulation en vitesse.

Voici le principe de la régulation d'un drone :



Durant ce semestre, nous nous sommes basés sur l'étude en régulation d'un seul moteur du drone. Nous avons dans un premier temps modélisé le moteur qui déclenche le mouvement de l'hélice qui lui est associée. Un moteur de notre drone peut être schématisé de cette manière :

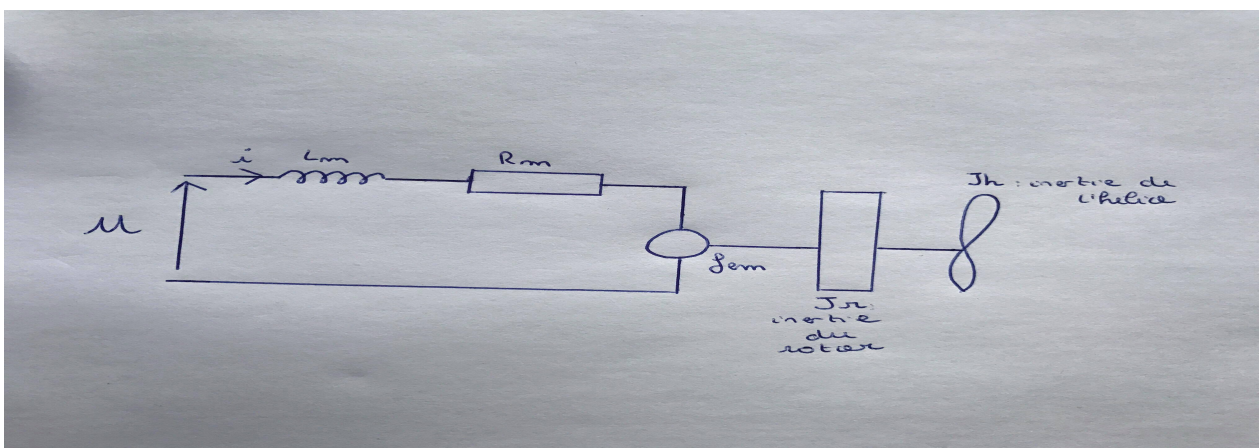


schéma du système composé du moteur et de l'hélice

Nomenclature :

U : Tension au borne du moteur

Rm : Résistance du moteur

i : courant traversant le moteur

Lm : inductance

kfem : coefficient de force électron-motrice

wh : vitesse de rotation du moteur

Jm : inertie du moteur

L'objectif de la modélisation est d'obtenir des équations (qu'on représentera en schéma de block sur simulink) permettant d'analyser le comportement du moteur (à travers son courant i et sa vitesse de rotation) quand on applique une tension U à l'entrée.

La mise en équation du schéma 2 (système composé du moteur et de l'hélice), nous donne une équation électrique et une équation mécanique :

$$\text{équation électrique : } U = Rm \times i(t) + Lm \times \left(\frac{di(t)}{dt} \right) + kfem \times wh$$

$$\text{équation mécanique : } Jm \times \left(\frac{dwh}{dt} \right) = CoupleMoteur - Coupleresistant$$

$$\text{Avec } CoupleMoteur = km \times i(t) \text{ et } Coupleresistant = ktr \times wh^2$$

On obtient alors les deux équations:

$$(1) \quad U = Rm \times i(t) + Lm \times \left(\frac{di(t)}{dt} \right) + kfem \times wh$$

$$(2) \quad Jm \times \left(\frac{dwh}{dt} \right) = km \times i(t) - ktr \times wh^2$$

Une des deux équations n'est pas linéaire, on ne peut donc pas étudier la régulation du système à partir de ces équations. Il faut linéariser l'équation. Pour cela, on linéarise autour d'un point de fonctionnement.

$$\text{On a alors la vitesse de rotation } wh = w + w0 \text{ et } wh^2 = w0^2 + 2 \times w \times w0 + w^2 \simeq 2 \times w \times w0 + w0^2$$

On remplace wh dans les équations (1) et (2) et on obtient:

$$(3) \quad U = Rm \times i(t) + Lm \times \left(\frac{di(t)}{dt} \right) + kfem \times (w + w0)$$

$$(4) \quad Jm \times \left(\frac{dwh}{dt} \right) = km \times i(t) - ktr \times (2 \times w \times w0 + w0^2)$$

On a l'inductance $L \ll 1$ donc on peut réécrire (3) en:

$$U = Rm \times i(t) + kfem \times (w + w0)$$

qu'on peut réécrire :

$$(5) \quad i(t) = \frac{1}{Rm} (U - kfem(w + w0))$$

Autour du point fixe $U(t) = u(t) + u0$, on a l'équation (5) en:

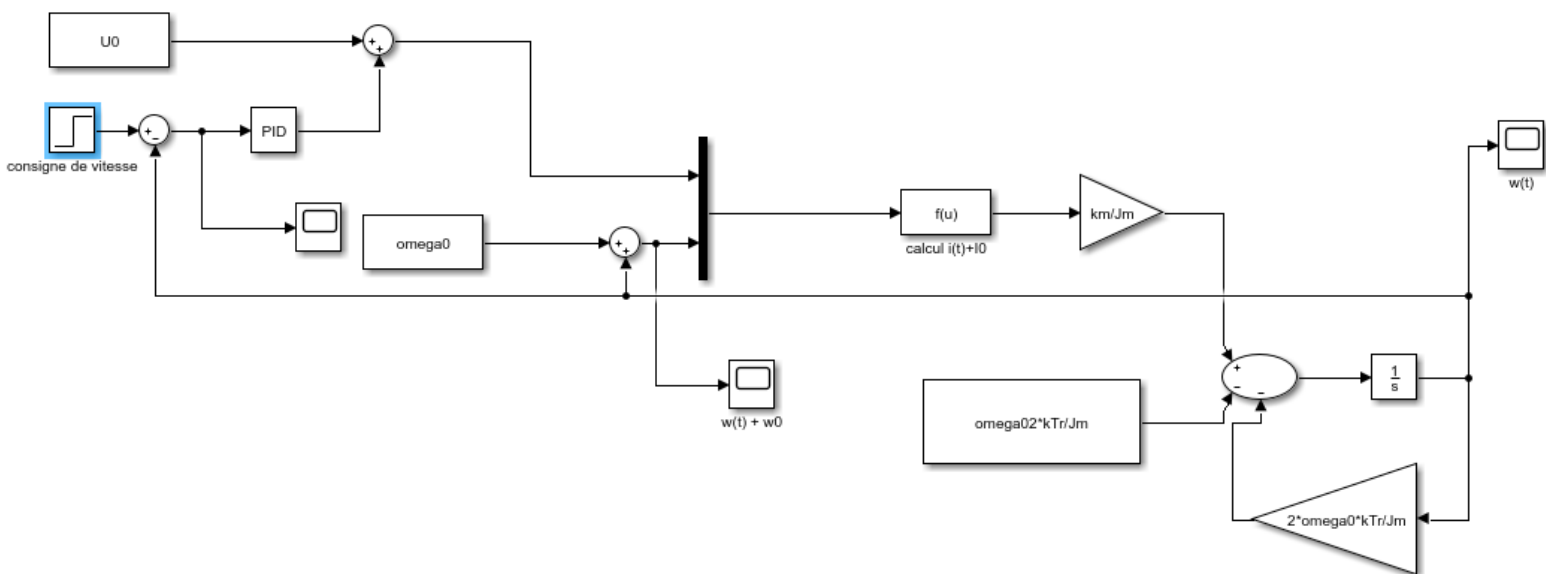
$$(6) \quad i(t) = \frac{1}{Rm} (u(t) + u0) - \frac{1}{Rm} kfem(w + w0)$$

On peut aussi écrire l'équation (4) comme:

$$(7) \quad \frac{dwh}{dt} = \frac{km}{Jm} \times i(t) - \frac{ktr}{Jm} \times (2 \times w \times w0 + w0^2)$$

Nos équations linéaires sont les équations (6) et (7). Pour ces deux équations l'entrée est la tension $U(t)$. Cette tension commande donc le courant $i(t)$ et la vitesse de rotation du moteur wh .

A partir de ces équations on en déduit le schéma de block sur simulink:



Pour pouvoir étudier la réponse de notre système, nous devons disposer des coefficients nécessaires au fonctionnement du moteur.

```

% simulation du moteur + hélice
%
clear all
close all
%
% les paramètres
%
kfem=0.5; % coefficient force électromotrice
kTr=.007; % coefficient de traînée de l'hélic

Jm=2.97*10^-5; % Inertie du rotor et de l'hélice Jr+Jh
km = 0.36; % coefficient du couple moteur
Rm=2.3; % résistance interne du moteur (ohm)
%
% point de fonctionnement I0, U0 et omega0
I0=2.5; % courant d'entrée du moteur
omega0=sqrt((I0*km)/kTr);
omega02=omega0^2;
U0=Rm*I0+kfem*omega0;

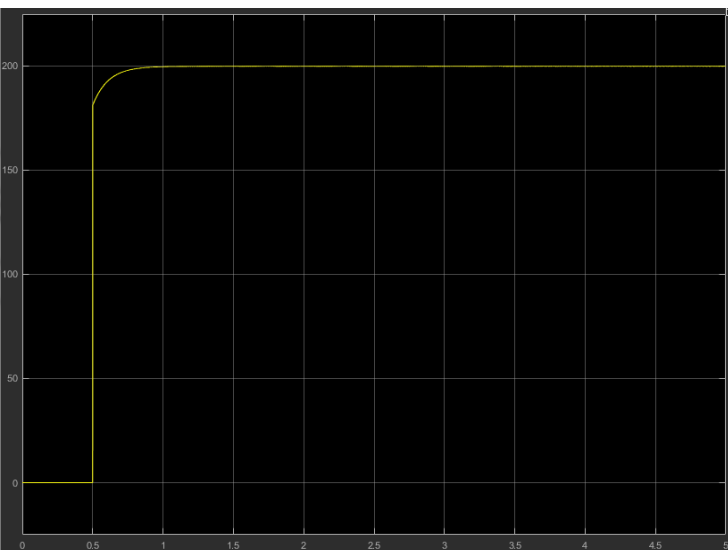
```

script Simulink permettant de simuler le modèle moteur-hélice

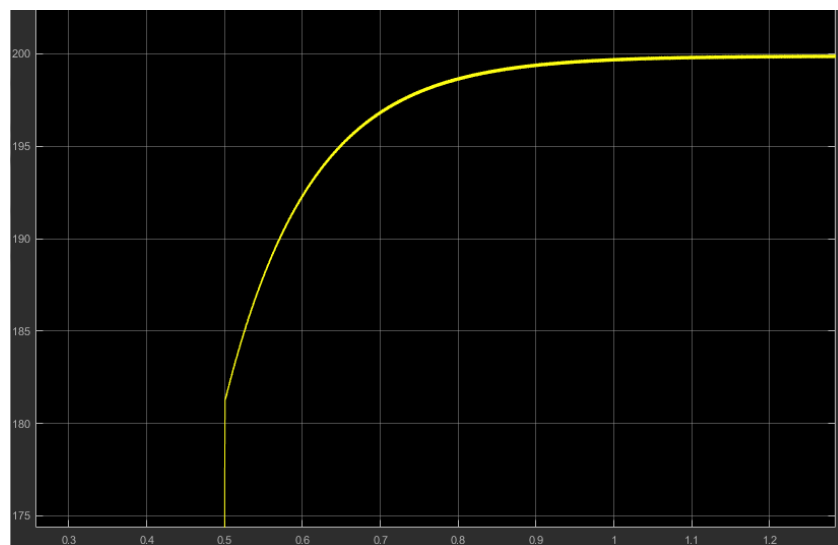
Nous fixerons donc le point de fonctionnement I_0 , qui est le courant d'entrée du moteur, pour pouvoir obtenir les autres points de fonctionnement U_0 et ω_0 .

On sait que la valeur max du courant que peut supporter le Crazyflie est de 4,2A et que la valeur min de démarrage du moteur est de 0,8A. On choisit donc une valeur entre les deux, 2,5A.

En consigne, nous lui envoyons une vitesse (200 rad/s « arbitrairement ») et voici la vitesse du moteur en sortie :



asservissement PI du système moteur-hélice suite à un échelon



zoom sur la partie transitoire

On remarque que notre système est en régime apériodique donc que son coefficient d'amortissement est supérieur à 1.

Il a un temps de réponse de 0,1s (étude du schéma selon une réponse indicielle d'un système apériodique qui ressemble à celui d'un premier ordre).

Conclusion

Au cours de cette première année, nous avons pris connaissance du drone et nous l'avons étudié pour avoir tout ce qui était nécessaire à son bon fonctionnement. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur la partie motrice de ce drone pour pouvoir par la suite asservir correctement ses moteurs avec la programmation prévue pour la deuxième année.

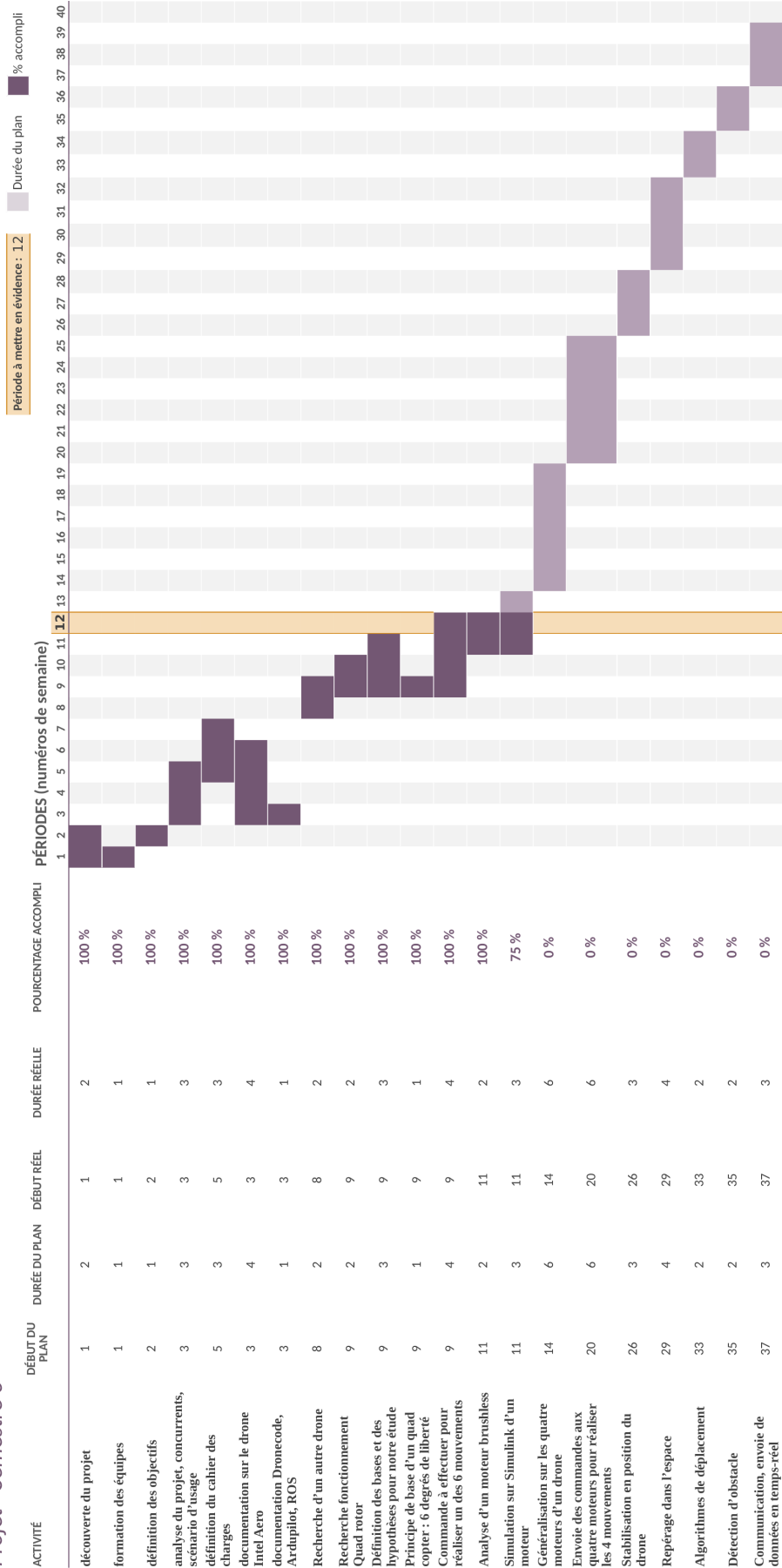
Cette première année a d'abord regroupé l'étude générale d'un drone, son fonctionnement et ses diverses applications dans la vie réelle. Ensuite, elle a regroupé, également, l'étude du drone que nous allons prendre pour notre projet, ce qu'il permet de faire notamment, ainsi que la capacité à être manipulé. Et pour finir, nous avons étudié son système motorisé pour pouvoir en deuxième année asservir correctement le drone en prenant en compte les résultats obtenus grâce à la simulation sur Matlab/Simulink.

Annexes

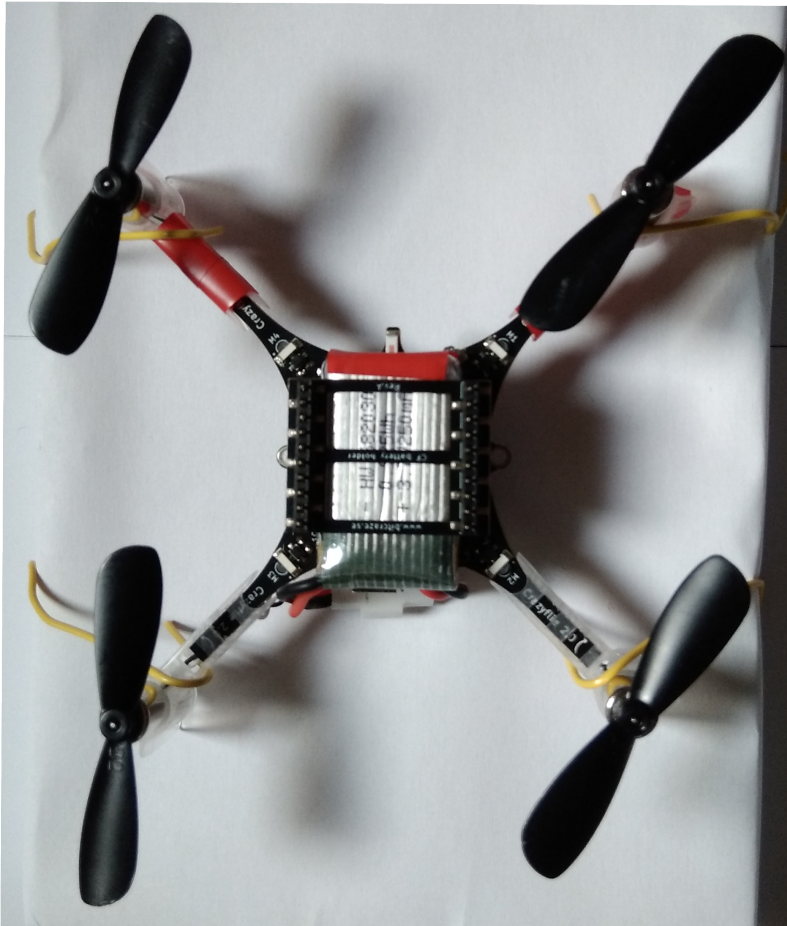
Annexe 1 : Diagramme de Gantt

P21 : A la découverte des commandes des drones

Projet - Semestre 6



Annexe 2 : Maquette pour simuler une translation horizontale

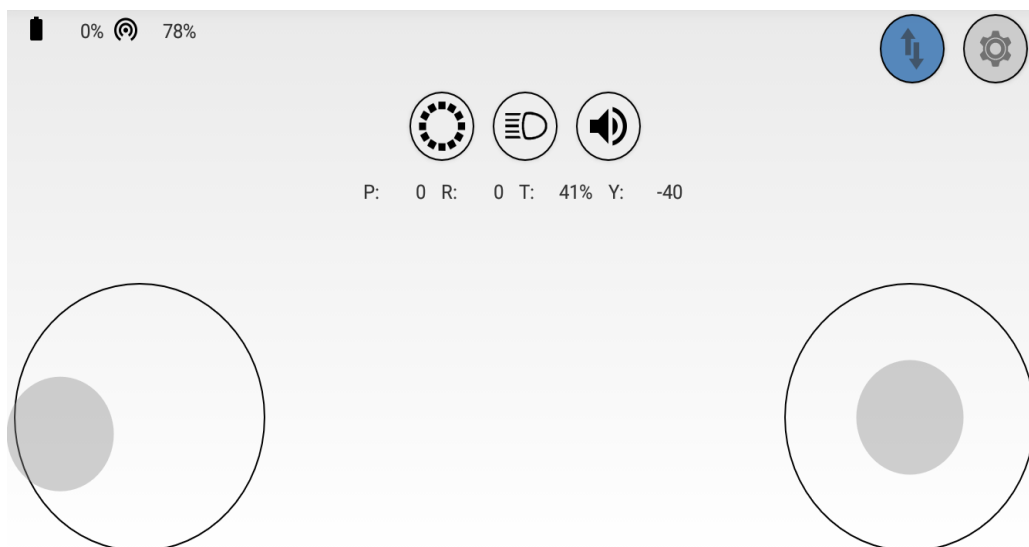


le drone est fixé à la planche, on l'isole pour s'intéresser seulement à ses moteurs

l'avant du drone est marqué en rouge

permet d'observer de manière qualitative le comportement des moteurs : pas d'informations temps réelles sur l'état des moteurs

maquette permettant d'étudier le comportement des moteurs



capture d'écran de l'application Crazyflie Client, permettant, ici, d'effectuer un lacet

Bibliographie

Pour suivre l'avancé de notre projet, et pour plus de détails :

https://projets-ima.plil.fr/mediawiki/index.php/IMA3/IMA4_2018/2020_P21

Bitcraze's Github, Sweden, 2019, *We create open platforms that enable people to explore the world of robotics*, consulté sur:

<https://github.com/bitcraze>

Bitcraze Wiki, 2019, *Information about the hardware design and advanced development topics for the Crazyflie 2.X*, consulté sur :

<https://wiki.bitcraze.io/projects:crazyflie2:index>