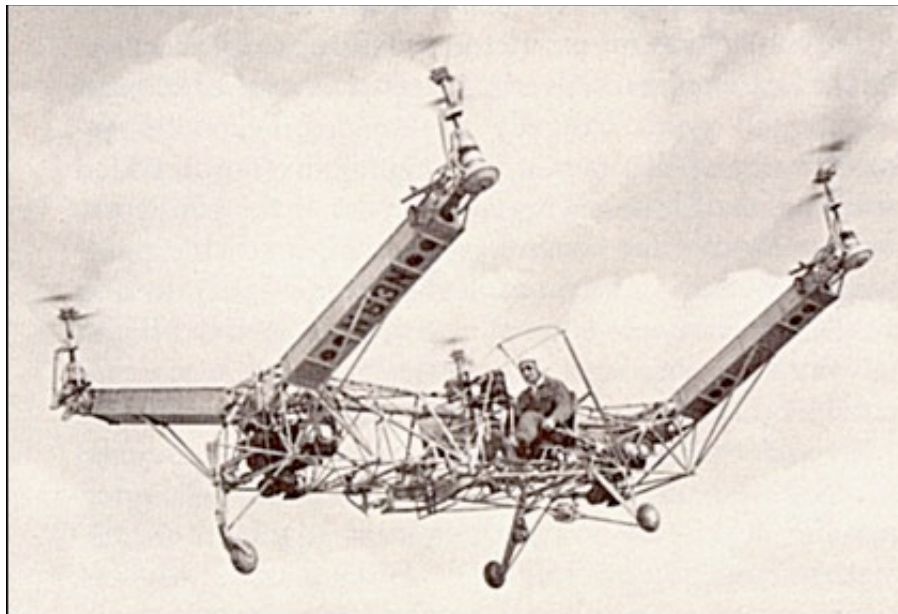


CAHIER DE CONCEPTION – révision N° 3  
2 décembre 2006

Étude et réalisation d'un modèle réduit d'hélicoptère  
à quatre hélices





*« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi! »*

Albert Einstein

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1 Présentation du projet</b>	<b>5</b>
<b>2 Carctéristiques principales du projet</b>	<b>5</b>
<b>3 Avancement du projet</b>	<b>6</b>
3.1 Première soutenance (début septembre) . . . . .	6
3.2 Deuxième soutenance (fin octobre) . . . . .	7
3.3 Troisième soutenance (début décembre) . . . . .	8
 <b>Réalisation de la partie mécanique</b>	 <b>11</b>
<b>4 Construction de la structure en croix</b>	<b>11</b>
<b>5 Construction des attaches des moteurs</b>	<b>12</b>
<b>6 Construction de la carte des capteurs</b>	<b>12</b>
<b>7 Construction du banc d'essai</b>	<b>13</b>
 <b>Réalisation de l'électronique</b>	 <b>14</b>
<b>8 Spécifications de l'électronique</b>	<b>14</b>
<b>9 Les microcontrôleurs PIC</b>	<b>15</b>
9.1 Choix des microcontroleurs . . . . .	15
9.2 Communication inter-composants . . . . .	15
9.2.1 La communication USART avec l'ordinateur . . . . .	16
9.2.2 La communication I <sup>2</sup> C entre les deux PIC . . . . .	16
9.2.3 Chronogramme des interruptions . . . . .	17
9.3 Interface de programmation . . . . .	18
<b>10 Les capteurs</b>	<b>18</b>
10.1 L'accéléromètre . . . . .	18
10.1.1 Le capteur . . . . .	18
10.1.2 Amplification du signal . . . . .	19
10.1.3 Filtre anti-repliement de spectre . . . . .	19
10.2 Les gyroscopes . . . . .	21
10.2.1 Le capteur . . . . .	21
10.2.2 Amplification du signal . . . . .	22
10.3 L'altimètre infrarouge . . . . .	22
<b>11 L'électronique de puissance</b>	<b>22</b>
11.1 Schémas de base . . . . .	23
11.2 Rôle de la « roue libre » . . . . .	23
11.3 Mesure du courant dans les moteurs . . . . .	24

<b>12 Alimentation électrique</b>	<b>24</b>
<b>Réalisations des asservissements</b>	<b>26</b>
<b>13 L'ordinateur dans la boucle</b>	<b>26</b>
13.1 Scilab et Scicos . . . . .	26
13.2 Port série sous Scicos . . . . .	26
13.3 Vitesse de Scicos . . . . .	26
13.3.1 Le temps réel sous Scicos . . . . .	26
13.3.2 Vitesse d'échantillonnage obtenues . . . . .	27
13.3.3 Définition d'un période et fréquence Scicos . . . . .	27
<b>14 Asservissement des moteurs</b>	<b>27</b>
14.1 Etude théorique d'un moteur DC . . . . .	27
14.2 Asservissement en courant . . . . .	28
14.3 Déterminer la fonction non linéaire PWM-Courant en régime établi . . . . .	29
14.4 Non linéarité entre les moteurs . . . . .	30
<b>15 Asservissement du tangage</b>	<b>31</b>
15.1 Modèle de l'hélicoptère . . . . .	31
15.2 Etude de l'influence néfaste du retard . . . . .	31
15.3 Le contrôleur adopté . . . . .	33
15.4 Résultats obtenus . . . . .	33
<b>16 Schéma bloc Scicos</b>	<b>33</b>
<b>Conclusion</b>	<b>37</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>38</b>

# Introduction

## 1 Présentation du projet

Ce document présente la réalisation d'un modèle réduit d'hélicoptère à quatre hélices avec son banc d'essai électromécanique. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de la spécialisation temps réel de l'EPITA.

Les caractéristiques principales de l'hélicoptère sont les suivantes. Il est constitué d'une croix en fibre de carbone assemblée au moyen d'une pièce en aluminium façonnée à la main dans une plaque de ce métal. Quatre moteurs électriques à courant continu avec collecteur qui sont attachés sur la croix de fibre de carbone par des attaches en aluminium façonnées, elles aussi, à la main. Dans chacun des tubes creux en carbone sont insérées des pattes en laiton sur lesquelles peut reposer l'hélicoptère. Sur la croix est attachée une carte électronique contenant les capteurs servant à la stabilisation de l'appareil : trois gyroscopes un axe, un accéléromètre deux axes, un capteur de proximité commutant à une quarantaine de centimètre d'un obstacle. L'électronique de puissance, l'électronique de commande et la source d'énergie ne sont pas, pour l'instant, embarquées. L'alimentation électrique est assurée par une alimentation de PC standard 12V, suivi d'un régulateur, qu'il a fallu réaliser, fournissant du 5V et du 8.5V avec une intensité maximale de 5A. L'électronique de puissance consiste en quatre MOSFET commandés par des entrées PWM. L'électronique de commande consiste en deux microcontrôleurs PIC 16F876 de Microchip [35] reliés entre eux par un bus I<sup>2</sup>C connectés à un PC standard par un bus série. Ces deux microcontrôleurs font l'acquisition des données et envoient au MOSFET les commandes PWM calculées par le PC. La stabilisation est calculée par le PC avec des logiciels de hauts niveaux Scilab-Scicos [21, 22] qui sont les analogues libres du couple Matlab-Simulink. Pour tester la stabilisation de l'appareil, un banc d'essai, réalisé en Lego, permet de maintenir et de limiter les mouvements de l'hélicoptère en lui laissant un nombre limité de degrés de liberté.

La construction de l'hélicoptère fait appel à plusieurs spécialités de l'ingénierie à savoir : – construction mécanique, – électronique, – informatique, – automatique. Chacun de ces aspects seront discutés successivement dans la suite de ce document.

Des projets similaires existent déjà sous la forme commerciale et sont connus sous les noms de Draganflyer [15], Engager [16], X-UFO [17], Microdrones [18]. Il existe également des projets réalisés par des étudiants ou par des passionnés (références [2] à [14]). En général ces hélicoptères sont radio-commandés ce qui ajoute une difficulté supplémentaire dans la conception mais ce qui simplifie aussi la stabilisation car l'opérateur humain est capable d'observer et de compenser les dérives des gyroscopes [2]. En général ces hélicoptères possèdent deux moteurs tournant dans un sens et deux autres tournant dans l'autre afin de stabiliser le lacet. Parfois, sur des modèles de petites tailles, pour éviter l'inversion du sens de rotation des moteurs, ce qui implique l'utilisation d'hélices propulsives difficiles à trouver, les moteurs sont inclinés de façon à créer une poussée compensant le lacet due à la rotation des moteurs (voir [14]). Nous adopterons ce point de vue faute d'avoir pu trouver des hélices propulsives de petites tailles.

## 2 Caractéristiques principales du projet

**Robustesse à son environnement.** L'appareil est prévu pour fonctionner en intérieur, avec un minimum de perturbation atmosphérique.

**Contraintes de dimension et de poids de l'hélicoptère.** La plate-forme se veut être de dimension et de poids le plus réduit possible (envergure inférieure à 20 cm, poids en dessous des 200 g). On a choisi de ne pas utiliser de cartes d'acquisitions à cause de leur

poids et de leur prix. L'acquisition des données est réalisée par les deux microcontrôleurs PIC.

**Communication avec un ordinateur non embarqué.** L'hélicoptère communique avec un ordinateur non embarqué au moyen d'un port série. Le microcontrôleur envoie les données de la centrale inertielle à l'ordinateur. Ce dernier fait les calculs flottants de stabilisation et les communique au microcontrôleur embarqué.

**Source d'énergie.** L'hélicoptère ne dispose pas de batterie, il est alimenté une source d'énergie au sol au moyen de fils électriques. Ce qui permet une économie de poids importante et une autonomie beaucoup plus grande mais qui implique l'existence des fils reliant l'hélicoptère au sol. L'embarquement de la source d'énergie électrique pose en effet un gros problème, car les plus petits moteurs consommant de l'ordre de 10W chacun l'autonomie est souvent très réduite. Certains modèles du commerce peuvent avoir une autonomie de quelques minutes seulement.

### 3 Avancement du projet

#### 3.1 Première soutenance (début septembre)

La première soutenance a présenté l'hélicoptère avec seulement deux moteurs sur un banc d'essai qui permettait un seul degré de liberté : le tangage.

L'hélicoptère avait un de ses axes maintenus par le banc autour duquel il pouvait tourner. Il se comportait comme une balançoire (photo 1) où les deux moteurs commandaient l'inclinaison de la balançoire. Cette inclinaison était acquise par l'accéléromètre grâce à un PIC, était communiquée, par le port série, au PC qui calculait la sortie PWM à envoyer aux moteurs. Cette commande était fournie au PIC par l'intermédiaire du port série et le PIC mettait en forme, sur ses deux sorties PWM, le signal à envoyer au MOSFET, commandant ainsi deux moteurs.

Sur ce premier prototype, seul l'accéléromètre était embarqué. Les fils liant la carte d'essai à l'hélicoptère étaient assez rigides. Ils se comportaient comme des ressorts non-linéaires, difficilement modélisables, tendant à maintenir l'hélicoptère dans une position plus ou moins inclinée contribuant à la stabilité de l'appareil.

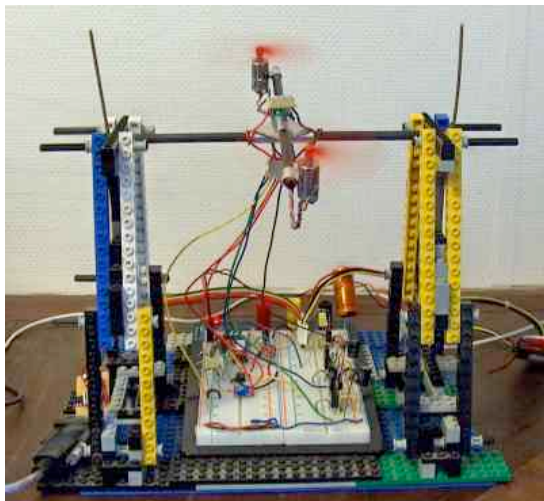


FIG. 1 – Prototype 1

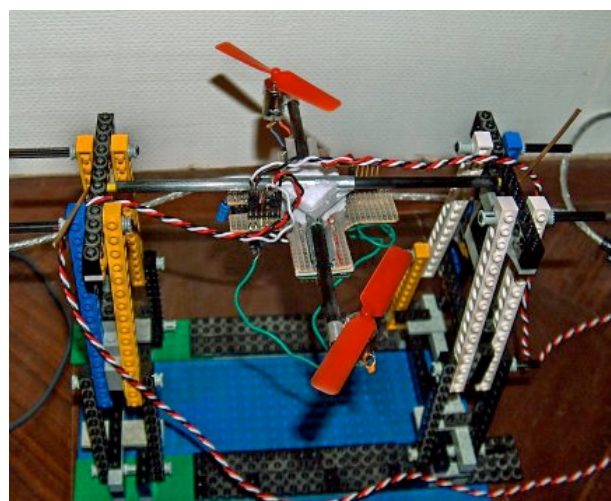


FIG. 2 – Prototype 2

Les courants dans les moteurs n'étaient pas observés, la boucle de régulation élaborait la commande PWM à partir de la seule donnée d'inclinaison en calculant un PID réglé em-

piriquement. La poursuite des consignes d'inclinaison était suivie avec une qualité jugée pas complètement satisfaisante.

Un deuxième prototype a été ensuite réalisé (photo 2). Les fils ont été remplacés par des fils plus souples et plus longs. Une carte électronique contenait en plus de l'accéléromètre, un gyroscope un axe et un capteur de proximité infrarouge.

Monté sur le même banc, l'hélicoptère avait deux positions possibles : – l'une stable où le centre de gravité est au dessous de l'axe de rotation, maintenu par le banc ; – l'autre, instable en absence de poussée des moteurs, dans laquelle le centre de gravité est au dessus de l'axe de rotation. Il est beaucoup plus facile de commander l'hélicoptère dans la première position au moins dans les situations de faible poussée des moteurs.

Afin d'améliorer la qualité de la régulation les courants ont été observés. La commande était alors réalisée grâce à deux boucles : – une première boucle interne poursuit une consigne de courant en agissant sur la commande PWM, – une deuxième boucle poursuit l'inclinaison en envoyant les consignes de courant à la deuxième boucle. Malgré la sophistication de cette régulation, recommandée par les spécialistes de ces problèmes pour élargir la bande passante de la régulation donc la réactivité de la commande, l'amélioration observée n'a pas été très importante. Une des raisons probables, restant à confirmer par l'expérience, est la lenteur de la boucle de courant due à sa réalisation dans le PC. Le remède étant de faire la boucle de courant dans le PIC plutôt que dans le PC.

Après la réalisation de ce deuxième prototype la régulation de la balançoire restait donc pas complètement satisfaisante, bien que susceptible de pouvoir maintenir en l'air l'hélicoptère. Des oscillations non voulues restaient visibles à l'oeil, mais ne semblaient pas compromettre la stabilité de l'appareil. Au cours de ces étapes les deux moteurs, utilisés sous 6V, de faible puissance, étaient insuffisants pour pouvoir soulever l'appareil.

### 3.2 Deuxième soutenance (fin octobre)

Le travail de la deuxième période (photo 3) a eu pour but d'améliorer la qualité de la régulation et d'essayer de faire voler l'hélicoptère en ne lui laissant que deux degrés de liberté : – le tangage décrit dans la première partie – un mouvement vertical dans une glissière de l'axe en fibre de carbone autour duquel peut tourner l'hélicoptère. Pour cela il a fallu progresser sur plusieurs points.

Il a fallu obtenir une poussée plus importante en changeant les moteurs. Les nouveaux moteurs consommant plus et fonctionnant avec une tension différente il a fallu changer l'alimentation. Le banc d'essai a du être modifié pour réaliser le deuxième degré de liberté : le mouvement vertical.

Les non-linéarités entre la correspondance courant et consigne PWM ont été étudiées en régime stationnaire. Elles sont dues aux charges aérodynamiques sur l'hélice et ont été compensées dans le régulateur de la boucle de courant.

L'utilisation de Scicos dans les boucles d'asservissement introduit des retards importants du fait de : – de la vitesse de la liaison série entre le PIC et le PC, – des contraintes temporelles sur la gestion des processus de linux, – des visualisations graphiques dans le scope et des temps de calcul de Scicos. L'influence de ce retard sur les boucles d'asservissement a été analysée. Pour améliorer cette vitesse, un changement d'ordinateur et d'OS a été nécessaire (cf. section (12)). Au cours de ce travail quelques bogues de Scicos sont apparus et ont été signalés puis résolus par les auteurs de Scicos.

Les niveaux de bruit sur la mesure de l'inclinaison et des courants ainsi que la dérive de l'accéléromètre en fonction de l'intensité du courant passant dans les moteurs ont été grandement améliorés en modifiant les circuits de masse et d'alimentation des composants.





FIG. 3 – Prototype 3 et son électronique

La dérive basse fréquence du gyroscope a été partiellement filtrée, il reste toutefois des bruits importants et inexpliqués qui limite pour l'instant l'utilisation des gyroscopes (contrairement au signal de l'accéléromètre qui est maintenant satisfaisant).

La fonction de transfert du comportement mécanique a été explicitée. Une boucle de régulation simplifiant la partie stable de la fonction de transfert en boucle ouverte a été essayée dans le but d'améliorer le gain de boucle tout en assurant une marge de stabilité satisfaisante. L'idée était d'améliorer la régulation pour éliminer des oscillations résiduelles autour des consignes demandées. Les gains obtenus restent médiocres. Une meilleure modélisation électromécanique sera tentée pour la troisième soutenance.

Malgré les résultats relativement décevants de la régulation du tangage, les premiers essais de vols dans la glissière ont été réalisés.

### 3.3 Troisième soutenance (début décembre)

Deux moteurs arrivent à soulever la carcasse de l'hélicoptère mais sont en limite de puissance, il n'est donc pas possible de réaliser l'asservissement d'altitude. Pour pouvoir voler dans cette espace à deux degrés de liberté (tangage, altitude) il faut les quatre moteurs. Leur mise en oeuvre implique de gros changements.

Il faut modifier le banc d'essai afin qu'il continue à limiter les mouvements de l'hélicoptère tout en permettant aux quatre moteurs de tourner afin d'obtenir une poussée suffisante pour pouvoir voler. Il faut réaliser une nouvelle carte électronique semblable à la première et doubler la puissance électrique disponible ce qui suppose réaliser une nouvelle alimentation capable de supporter 5A sous 8.5V. Voir photo (4).

Les PIC 16F876A possédant seulement deux sorties PWM, l'utilisation de quatre moteurs impose l'ajout d'un nouveau PIC de même type ou le passage à un processeur plus puissant comme le dsPIC. Si le dsPIC est beaucoup plus puissant il est aussi plus compliqué à programmer. Par exemple l'assembleur passe de 30 à plus de 80 instructions. C'est donc un changement de technologie dont la maîtrise demande un minimum de temps incompatible avec les échéances à respecter. Il a donc été décidé d'utiliser un deuxième PIC 16F876A et de faire communiquer

les deux PIC au moyen d'un bus I<sup>2</sup>C. Voir photo (5).

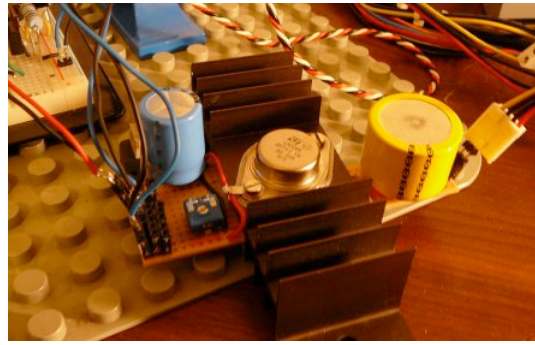


FIG. 4 – Nouvelle alimentation 8.5V 5A.

Il faut doubler la complexité du schéma Scicos avec les problèmes de vitesse que cela impose puisque : – on demande à la liaison série de transmettre un flux double de celui nécessaire aux deux moteurs, – on doit faire un calcul et un affichage deux fois plus long. D'autre part, il reste à améliorer la régulation de du tangage en faisant un meilleur modèle de la fonction de transfert courant-inclinaison. La boucle de courant reste aussi améliorable à condition de la réaliser par les PICs au lieu de Scicos. De même des filtres anti-repliement de spectre doivent être implémentés au niveau du PIC.

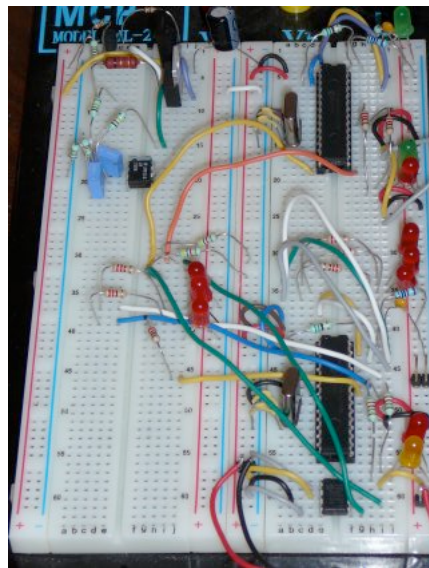


FIG. 5 – Carte à essai pour la communication I<sup>2</sup>C.

De ce vaste programme, seule une faible partie a été réalisée dans le temps imparti (le reste sera réalisé pendant le stage de fin d'année) à savoir : – la nouvelle alimentation a été construite, – la liaison I<sup>2</sup>C entre 2 PIC a été programmée mais reste boguée (elle fonctionne dans le cas d'un PIC et d'une EPROM, mais pas entre 2 PIC), – les fixations en aluminium pour les deux autres moteurs ont été faites et collées sur les moteurs, – la modélisation électromécanique du couple balançoire moteur a été étudiée et les paramètres correspondants ont été estimés sur le banc d'essais, – une nouvelle régulation du tangage a été réalisée, – la nouvelle carte d'essai électronique a été commencée, elle n'a pas été connectée avec l'ancienne afin de préserver le prototype à deux moteurs pour la démonstration.

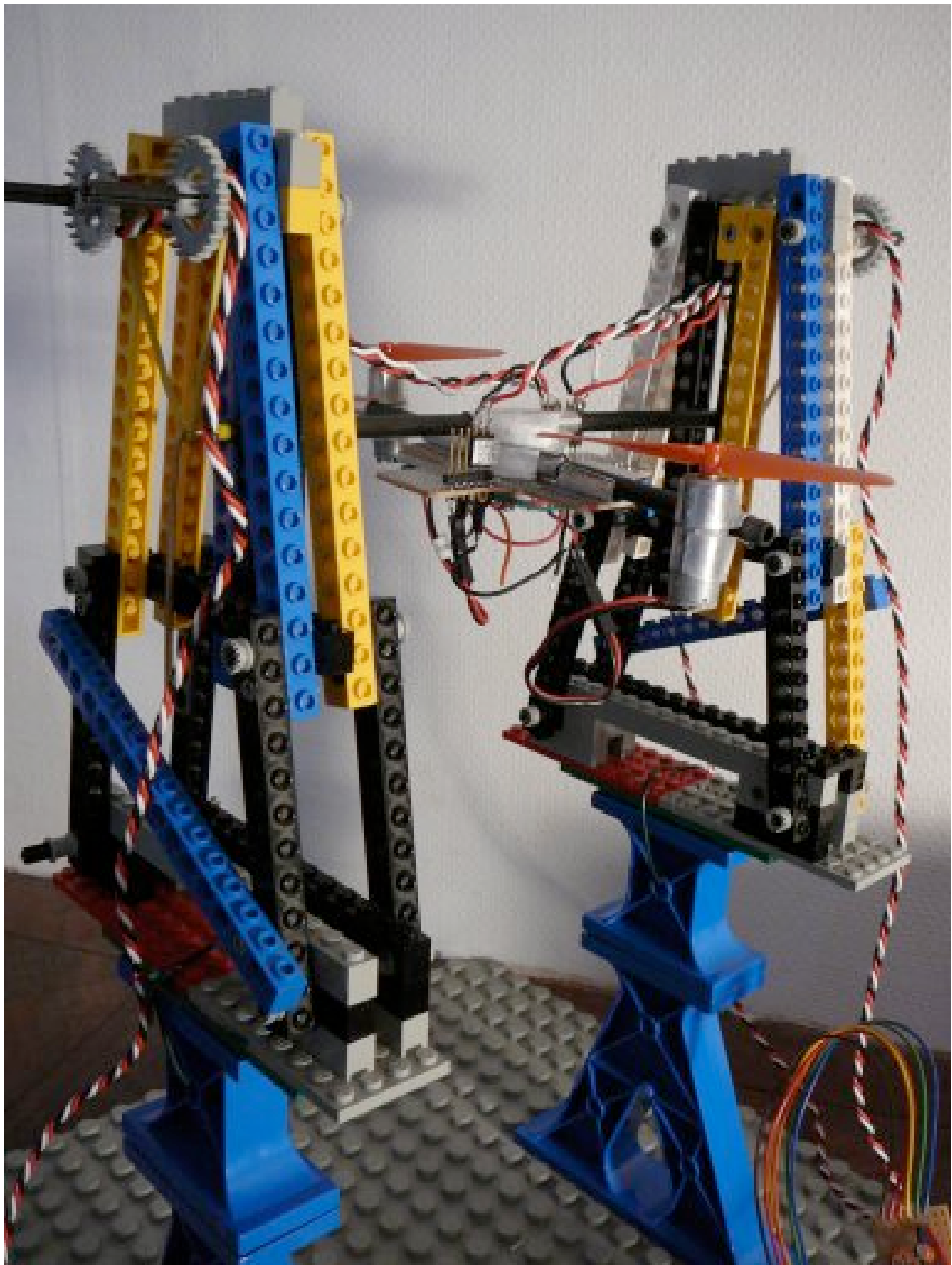


FIG. 6 – Dernière version du prototype.

# Réalisation de la partie mécanique

Ce chapitre explique comment la structure de l'hélicoptère a été construite. Son *design* a été pensé pour que l'hélicoptère soit le plus simple possible à fabriquer, qu'il soit de petite taille et peu coûteux. Une journée suffit pour construire la croix, les pattes et les attaches des moteurs et attendre que la colle prenne.

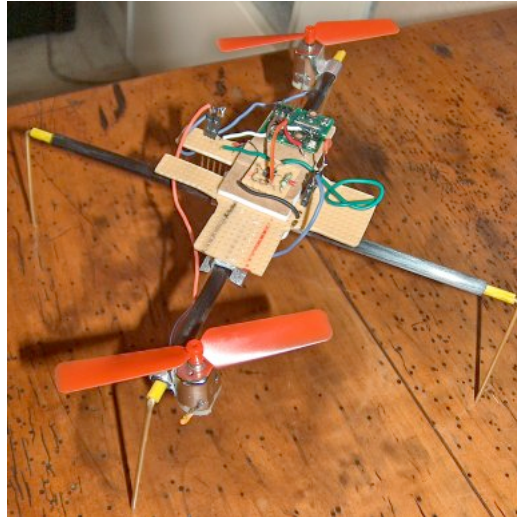


FIG. 7 – Prototype 1.

## 4 Construction de la structure en croix

La structure de l'hélicoptère est constituée de deux tubes en fibre de carbone de 20 cm de longueur maintenus ensemble par deux pièces en aluminium façonnées à la main et collées ensemble. Voir photo (8). Les tubes sont creux (diamètre 6 mm) afin de pouvoir insérer des tiges de laiton qui serviront de pieds à la structure. Voir photo (7).

Les fibres de carbone constituent un matériau très léger mais qui amortit peu les vibrations. Il faut donc être attentif aux modes propres de la structure. Dans notre cas, du fait de la petite dimension de l'hélicoptère, ces modes propres ne sont pas gênants.



FIG. 8 – Attache des tubes de carbone.



## 5 Construction des attaches des moteurs

La première soutenance avait présentée une version de l'hélicoptère qui possédait des attaches adaptées aux les moteurs Speed 195 de Graupner [44] (voir photo (9)), elles se décollaient souvent. De nouvelles attaches (voir photo (10)) adaptées à la forme cylindrique des moteurs Micro Speed 6V de Graupner ont été réalisées. Elles ont une bien meilleure tenue mécanique que les précédentes même si les nouveaux moteurs utilisés sont plus puissants.



FIG. 9 – Anciennes attaches pour moteur Speed 195.

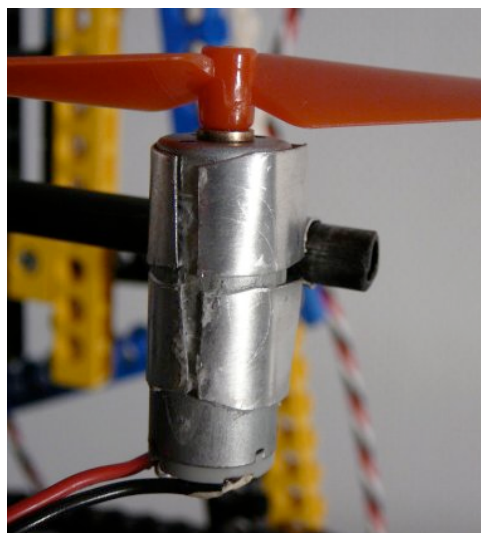


FIG. 10 – Nouvelle attache pour moteur Micro Speed.

## 6 Construction de la carte des capteurs

Cette carte est une plaque d'essai en epoxy que l'on peut détacher de la croix. Elle contient, pour l'instant, un gyroscope, un accéléromètre et un capteur de distance infrarouge (voir photo 11). Il reste de la place pour deux gyroscopes et un AOP avec ses résistances et condensateurs.

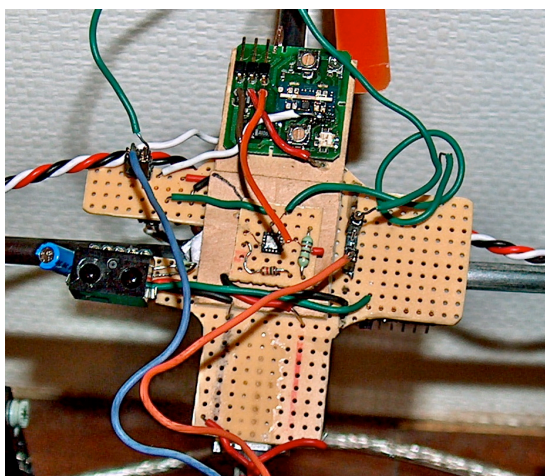


FIG. 11 – Carte des capteurs vue de dessus.

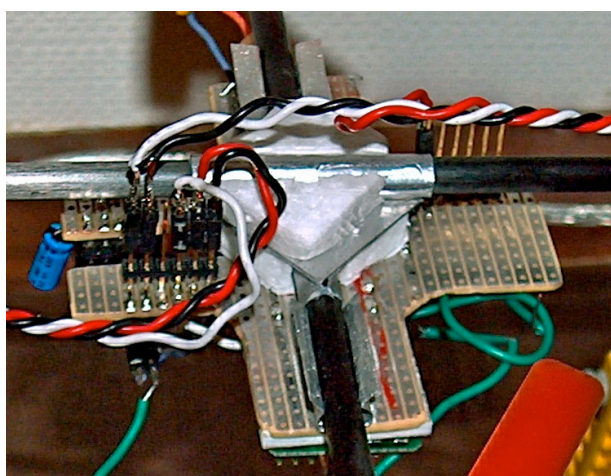


FIG. 12 – Carte des capteurs vue de dessous.

Cette carte est placée au dessus la croix de l'hélicoptère. Une deuxième carte électronique détachable portant l'électronique de contrôle et de puissance (PIC, AOP, MOSFET, régulateur), plus lourde, sera placée en dessous. Le centre de gravité de l'hélicoptère sera ainsi placé en dessous de la structure alors que le centre de poussée des hélices, lui, est placée au dessus. L'hélicoptère sera stable. Les deux cartes s'emboîteront ensemble.

En l'absence de la deuxième carte électronique, les moteurs sont retournés et la carte des capteurs se trouve en dessous de la structure. Ainsi, lorsque l'hélicoptère est attaché sur le banc d'essai, son centre de gravité se trouve ainsi sous l'axe de rotation. A l'équilibre stable, les hélices sont dirigées vers le haut et l'hélicoptère se comporte mécaniquement comme un pendule standard.

## 7 Construction du banc d'essai

Le but du banc d'essai est de limiter les degrés de liberté laissés aux mouvements de l'hélicoptère. Les degrés de liberté sont : – une rotation que l'on appellera tangage, – une translation verticale pour pouvoir tester une version simplifiée du vol.

Lorsque le banc d'essai permet le seul tangage, on parlera de *balançoire* pour l'ensemble hélicoptère-banc d'essai. Le banc d'essai a été fait en Lego Technique pour des raisons de simplicité. Il doit être suffisamment haut pour pouvoir tester le capteur de proximité commutant à quarante centimètres. Elle doit aussi être suffisamment large pour pouvoir l'utiliser avec les quatre moteurs.

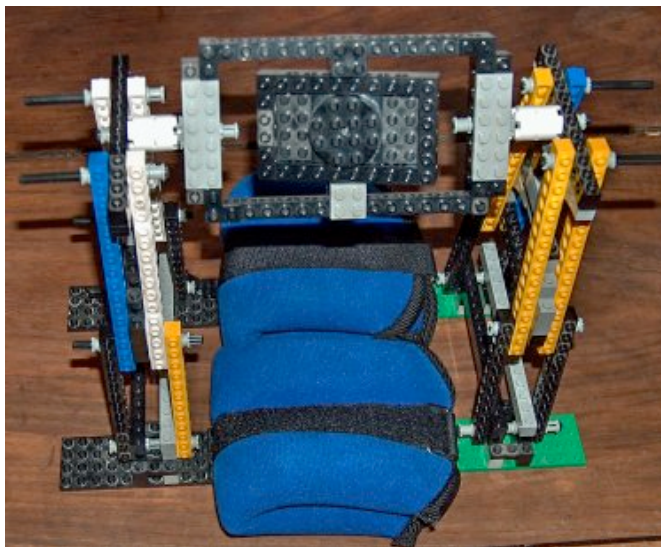


FIG. 13 – Version 1 – Un modèle simple de rotule trois axes a été réalisée mais n'a pas encore servi.

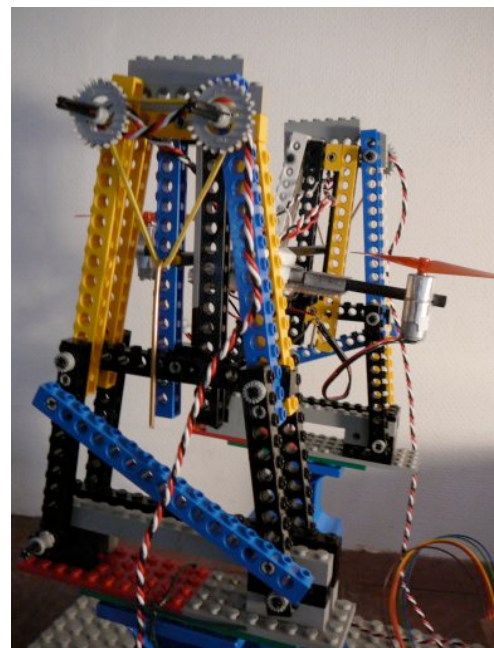


FIG. 14 – Version 2 – Banc d'essai modifié permettant le mouvement vertical.

# Réalisation de l'électronique

## 8 Spécifications de l'électronique

Les cartes électroniques embarquées de l'hélicoptère (confère le schéma complet page 12) doivent comprendre :

- Une partie contenant tous les capteurs (un accéléromètre, trois gyroscopes, un altimètre infrarouge),
- Une partie logique contenant les microcontrôleurs, la mise en forme des signaux et le port de communication avec l'ordinateur,
- Une partie électronique de puissance qui alimente les quatre moteurs contrôlés par les microcontrôleurs.

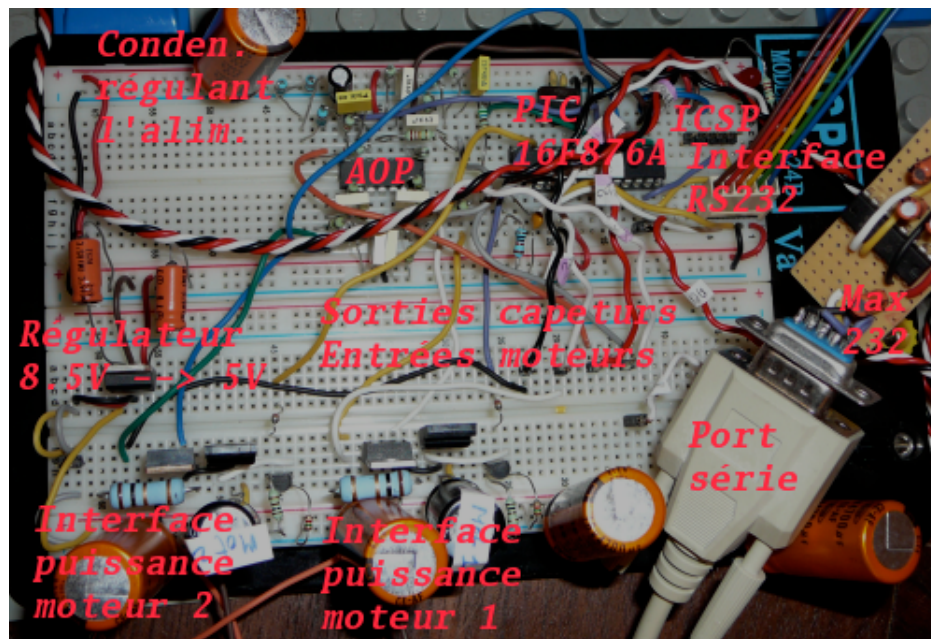


FIG. 15 – Le circuit à embarquer.

Elles doivent pouvoir gérer :

- neuf entrées analogiques :
  - les courants circulant dans les moteurs soit quatre entrées analogiques,
  - les vitesses angulaires données par les gyroscopes soit trois entrées analogiques,
  - l'orientation par rapport à la verticale (roulis, tangage) donnée par l'accéléromètre, soit deux entrées analogiques.
- L'altitude soit une entrée numérique.
- quatre sorties PWM (Pulse Width Modulation) contrôlant la vitesse des moteurs.
- un port série de communication avec l'ordinateur.
- un bus I<sup>2</sup>C de communication entre les microcontrôleurs.



## 9 Les microcontrôleurs PIC

### 9.1 Choix des microcontrôleurs

Les microcontrôleurs de Microchip [35] ont été choisis à cause de leur prix, de la disponibilité de la documentation et de la distribution gratuites des logiciels (PC et Linux) pour les programmer et les déboguer. Parmi les microcontrôleurs de Microchip, deux choix sont possibles :

- Soit utiliser deux PIC 16F876A,
- Soit utiliser un dsPIC 30F3011.

En effet, les PIC 16F876A ont deux sorties PWM et cinq entrées analogiques alors que le dsPIC 30F3011 a au moins quatre sorties PWM et neuf entrées analogiques.

Le choix s'est porté sur le PIC 16F876A plutôt que sur le dsPIC 30F3011. Etant novice dans ce domaine, ce choix était le plus simple (quitte à devoir re-écrire le programme ASM pour le dsPIC) sachant que l'excellent cours sur les PIC de Bigonoff [34] est une aide précieuse pour la compréhension des PIC 16F84 et 16F87x. Par contre, pour le dsPIC, on ne dispose que de la documentation du constructeur Microchip, qui bien que très riche, est beaucoup moins pédagogique que le cours de Bigonoff. Avant d'utiliser des dsPIC, il est préférable de maîtriser le fonctionnement des PIC. Dans une deuxième version du projet, on utilisera un unique dsPIC car, en plus du très grand nombre d'entrées/sorties disponibles il dispose d'un multiplieur intégré qui permet de mettre en oeuvre plus facilement les contrôleurs et les filtres nécessaires.

On a choisi le 16F876A au lieu du 16F877 pour son meilleur compromis puissance/poids (format PDIP). Le 16F877 est beaucoup plus lourd (40 pattes contre 28).

Un PIC 16F876A est suffisant pour contrôler un axe de l'hélicoptère. Dans le cas de deux axes à la communication I<sup>2</sup>C près les programmes de chaque PIC sont les mêmes.

### 9.2 Communication inter-composants

De nombreuses communications entre les différents composants (capteur, actionneur, processeur) doivent être établies. Le diagramme (16) définit les différents acteurs, les communications à réaliser avec leur sens et les ordres temporels à respecter (les numéros entourés).

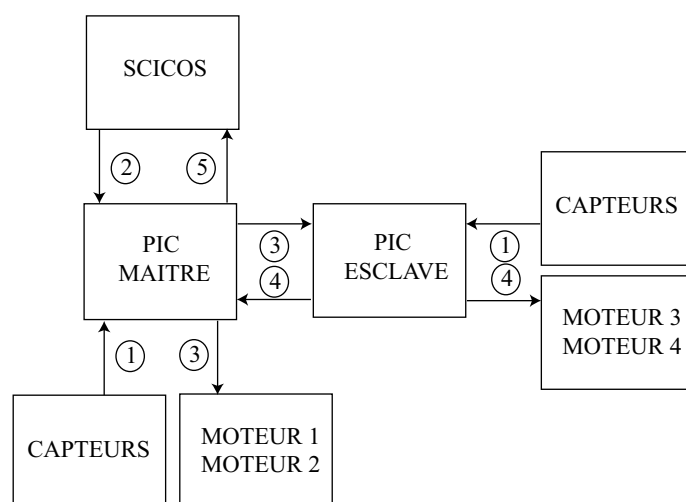


FIG. 16 – Chronologie de la communication inter composants

1. Le PIC maître et le PIC esclave lisent les valeurs analogiques (sauf l'altimètre) des capteurs (accéléromètre, gyroscopes).



2. Scilab envoie au PIC maître les consignes des signaux PWM des quatre moteurs.
3. Pendant que le PIC maître envoie au PIC esclave, via le module I<sup>2</sup>C, les consignes PWM des moteurs 3 et 4, les consignes sont envoyés aux MOSFET commandant les moteurs 1 et 2.
4. Une fois terminé la réception des consignes PWM pour les moteurs 3 et 4 le PIC esclave les fait suivre aux moteurs et envoie les conversions analogiques de ses capteurs au PIC maître.
5. Pendant que le PIC maître envoie à Scicos ses acquisitions analogiques et celles du PIC esclave.

### 9.2.1 La communication USART avec l'ordinateur

Le PIC, configuré en mode USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) communication série asynchrone de type RS232 avec un ordinateur via ses pattes Rx (réception) et Tx (transmission) branchées sur un port série. La vitesse de transmission est de 19200 bauds, 8 bits de données, parité paire, 1 bit de stop et aucun contrôle de flux. Le composant MAX232 convertit les signaux du port série (+12V/-12V) en signaux adaptés au PIC (0V/+5V). Le cours de Bigonoff [34] explique en détail comment fonctionne l'ensemble et fournit un programme type à charger sur le microcontrôleur et un programme PC pour tester la communication série.

### 9.2.2 La communication I<sup>2</sup>C entre les deux PIC

Pour faire communiquer les deux PIC, deux choix sont possibles : – soit utiliser le protocole SPI, – soit utiliser le protocole I<sup>2</sup>C. Bien que la communication SPI soit beaucoup plus simple (chaque PIC écoute et envoie un octet de donnée simultanément), il a l'inconvénient d'utiliser deux pattes analogiques du PIC esclave (à cause de l'utilisation des ports *Slave Select*). Puisque neuf entrées analogiques sont nécessaires, il n'est pas possible d'utiliser le mode SPI. Le cours de Bigonoff [34] explique en détail ce protocole.

La communication I<sup>2</sup>C est également une communication de type série multi-maîtres, multi-esclaves fonctionnant avec deux fils (horloge et données). Seul le protocole mono-maître et multi-esclave nous intéresse. Les esclaves ont tous un numéro d'identification différent. Le PIC maître est l'unique chef d'orchestre, il ne sait faire que deux actions différentes : désigner un esclave pour lui envoyer des données (on dit qu'il est en mode écriture) et désigner un esclave pour recevoir des données (on dit qu'il est en mode lecture). L'esclave ne peut donc pas choisir l'instant d'envoi d'une donnée.

La communication se fait de la façon suivante : le PIC maître commence toujours une communication en envoyant un bit de start suivi du numéro d'identification d'un esclave puis d'un bit qui indique s'il va envoyer des données ou que c'est à l'esclave de lui envoyer des données. L'esclave envoie alors un bit d'acquiescement pour dire qu'il est présent. Le maître, selon le cas envoie un paquet de données ou attend que les données arrivent. Lorsqu'une donnée est reçue, un bit d'acquiescement est envoyée. Seul le maître décide quand se termine la communication.

Du point de vue du câblage électrique, un bus I<sup>2</sup>C utilise sur chaque ligne une résistance de rappel (d'au moins 1700  $\Omega$ ) branchée sur le 5V afin d'éviter des courts circuits. Un bit de niveau bas met au niveau bas la ligne quelque soit les autres envois. Le cours de Bigonoff [34] détaille le protocole I<sup>2</sup>C et donne des exemples d'utilisation que nous avons adapté à notre application.

### 9.2.3 Chronogramme des interruptions

Les PIC permettent de lancer plusieurs opérations en parallèle. Les fins de ces calculs sont signalées par des interruptions. Les PIC ont été programmés pour faire tourner en parallèle deux timers, une conversion analogique, la génération de deux signaux PWM, la réception et l'émission d'un octet sur le port série et le module I<sup>2</sup>C. Le chronogramme des interruptions est illustré sur la figure 17.

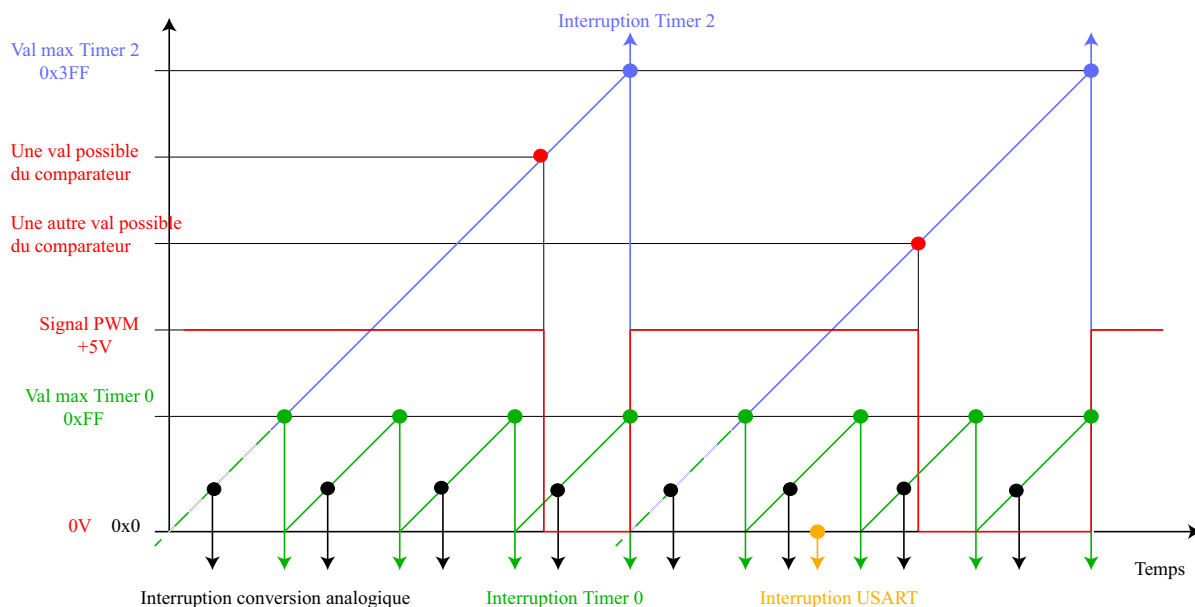


FIG. 17 – Chronogramme des interruptions du PIC maître.

Le PIC maître contient deux buffers permettant de communiquer avec l'ordinateur :

- un premier pour la réception, que l'on appellera *BufRec* ;
- un deuxième pour l'émission, que l'on appellera *BufEm*.

Chaque résultat des conversions analogiques est sauvegardé dans *BufEm*. Une interruption (représentée par une flèche noire sur le chronogramme 17). Le PIC permet une seule conversion à la fois. On doit alors changer de patte analogique. Il faut attendre que :

- les condensateurs de la nouvelle patte se chargent ;
- la conversion analogique se fasse.

Comme ces durées dépendent de la tension et de la chaleur du PIC, on utilise le timer 0 avec une période assez grande pour pouvoir relancer une nouvelle lecture (interruption en vert sur le chrono).

Scilab envoie alors les consignes PWM par le port série, ce qui crée une interruption (orange sur le chrono). Le PIC maître les lie et les stocke dans *BufRec*. Il profite de cette interruption pour envoyer le contenu de *BufEm*.

Les consignes PWM, stockées dans *BufRec*, sont les nouvelles valeurs des comparateurs du PIC. Deux comparateurs sont présents et peuvent fonctionner avec le timer 2. Lorsque la valeur du timer 2 atteint celle du comparateur  $x$ , +5V est généré sur la patte CCP $x$  du PIC jusqu'au débordement du Timer 2, qui permet de terminer un cycle d'un signal PWM, en mettant à la masse les sorties des pattes CCP. La vitesse de notre signal PWM est de 5 kHz avec un PIC possédant un quartz de 20MHz. Enfin, avant qu'une interruption de débordement du Timer 2 soit lancée, quatre interruptions de débordement du Timer 0 sont lancées.

Le chronogramme des interruptions du PIC esclave est équivalent au schéma (17). Les routines d'interruptions sont les mêmes. La seule différence est l'interruption USART qui est alors

remplacée par une interruption I<sup>2</sup>C.

### 9.3 Interface de programmation

Une technique, où un microcontrôleur est programmé après qu'il ai été soudé sur une carte est appelé *In Circuit Programming* (ICP). La programmation et le débogage du PIC se fait grâce à une interface à 5 fils, reliée en série avec une autre carte électronique appelée programmeur.

Lorsque la pin VPP du PIC est à +12V (au lieu du +5V), le PIC se met en mode *program-  
mation* et charge le nouveau programme par la patte ICSPDAT, synchronisé par ISPCLK.

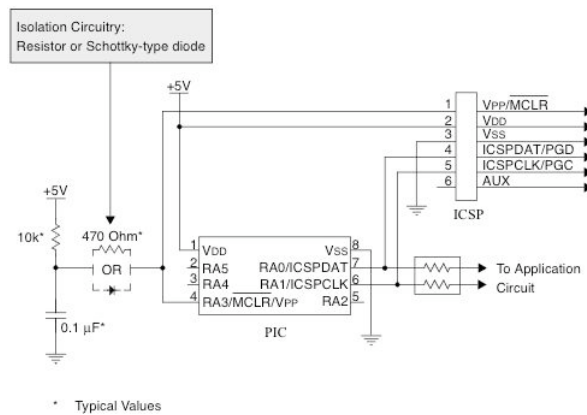


FIG. 18 – Cablage ICSP d'un PIC

Un programmeur PIC que l'on branche sur un port série d'un PC peut être facilement fabriqué comme l'explique le site [37]. D'autres programmeur, plus évolués, permettant le débogage en ligne sont disponibles chez le constructeur et des vendeurs indépendants accessibles sur Ebay. La photo (20) et le schéma (19) montrent mon premier programmeur JDM. Les composants ont été placés par rapport au JDM original afin de pouvoir accéder au PIC directement sur la carte.

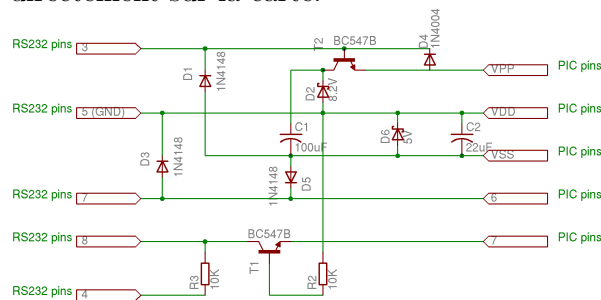


FIG. 19 – Schéma électronique du programmeur JDM modifié.

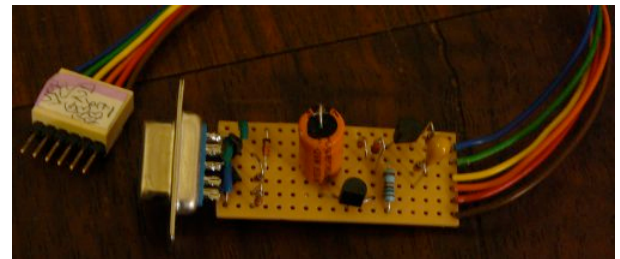


FIG. 20 – Premier programmeur JDM.

## 10 Les capteurs

### 10.1 L'accéléromètre

#### 10.1.1 Le capteur

Un accéléromètre deux axes placé horizontalement au centre de gravité (supposé immobile) de l'hélicoptère, permet de détecter la verticale. C'est le capteur le plus important dans la phase

d'essai où le centre de gravité de l'hélicoptère sur son banc d'essai est maintenu immobile (cas de la balançoire). Un unique accéléromètre 5G ADXL320 de AnalogDevice est alors suffisant pour stabiliser l'hélicoptère. Malheureusement, les accéléromètres disponibles bons marchés existent sous formes de petites tailles ( $4 \times 4$  mm) et sont très difficiles à souder sur une carte epoxy standard.

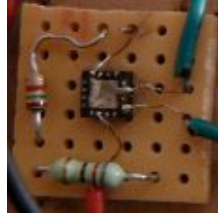


FIG. 21 – Carte accéléromètre  $1.5\text{cm} \times 1.5\text{cm}$ .

L'accéléromètre choisi donne un signal utile compris entre  $+1.3\text{V}$  (à l'horizontale) et  $+1.7\text{V}$  (à  $90$  degrés) qui doit donc être recentré et normalisé entre  $0\text{V}$  et  $+5\text{V}$  afin d'avoir une précision maximale avec le convertisseur analogique numérique 8 ou 10 bits disponibles sur le PIC.

### 10.1.2 Amplification du signal

Un AOP est un composant électronique qui permet d'amplifier un signal continu ce qui permet au final de créer des fonctions mathématiques (d'où le mot opérationnel) telles que la dérivée, l'intégrale, l'addition, le log, des filtres ... Les sites [38, 39, 40] étudient les AOP et expliquent les différents montages possibles. Des AOP sous la forme de composants à deux sorties (LM358) ou à quatre sorties (LM324) consommant du  $+5\text{V}$  sont utilisés pour la carte de l'hélicoptère. Voici le schéma caractéristique (22) :

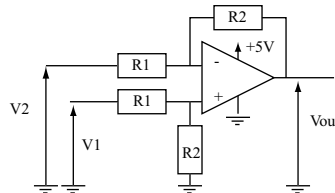


FIG. 22 – AOP en montage soustracteur.

On obtient la sortie  $V_{out} = G (V_1 - V_2)$  avec un gain  $G = R_2/R_1$ . En pratique, les valeurs des résistances  $R_1$  et  $R_2$  seront choisies de l'ordre de  $100\text{ K}\Omega$ . Pour connaître les valeurs des résistances  $R_1$  et  $R_2$ , on résout le système suivant, où  $G$  est le gain et  $r$  la tension de référence.

$$G(1.3 - r) = 0$$

$$G(1.7 - r) = 5$$

D'où :  $G = 12.5$  et  $r = 1.3$  D'où les valeurs  $R_1 = x$ ,  $R_2 = x$ ,  $R_a = x$  et  $R_b = x$  sur le schéma (23). La sortie amplifiée  $V_{out}$  est branchée directement sur une des pattes analogiques d'un PIC.

### 10.1.3 Filtre anti-repliement de spectre

La fréquence d'échantillonnage de l'ordinateur est limitée à  $50\text{Hz}$  à cause du débit de la liaison série. Les PIC feront eux les acquisitions à une fréquence de  $5\text{kHz}$ . Nous devons couper

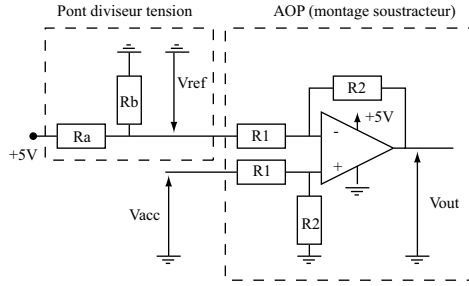


FIG. 23 – AOP en montage soustracteur et son pont diviseur.

les signaux de fréquence supérieure à 25Hz afin d'éviter de les retrouver sous forme de signaux parasites dans le signal échantillonné (repliement de spectre).

Nous utilisons un filtre anti-repliement de spectre d'ordre 4. Pour le réaliser nous le décomposons en un filtre d'ordre 2 réalisé électroniquement (en utilisant l'AOP) et un deuxième filtre d'ordre 2 écrit en assembleur dans les PICs. Le filtre électronique assure également la coupure à 2.5kHz nécessaire à l'acquisition analogique des PICs.

### Filtre électronique

Pour réaliser ces filtre des condensateur  $C_1$  et  $C_2$  sont ajoutés au circuit de montage l'AOP (23) ce qui donne le nouveau schéma (24).

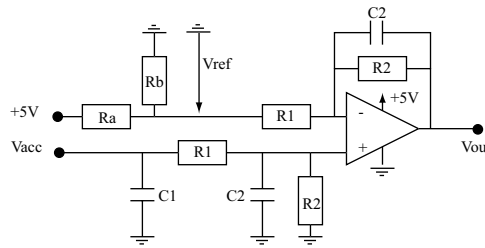


FIG. 24 – AOP en montage soustracteur et avec filtre anti-repliement de spectre.

- Pour trouver la valeur de  $C_2$ , sachant que  $\omega = 25 \times 2\pi$  et  $R_2$  est fixé à 250k $\Omega$ , il faut résoudre l'équation suivante :

$$\left( \frac{1}{R_2 C_2 \omega} \right)^2 = \frac{1}{\sqrt{256}} \quad (1)$$

On en déduit :  $R_2 C_2 = 0.025$  et  $C_2 = 4/(250 \times 10^3 \times 25 \times 2\pi) = 100\text{nF}$

- Pour déterminer  $C_1$ , le calcul est le même sachant que la résistance de l'accéléromètre est de 32k $\Omega$  :  $C_1 = 0.025/(32 \times 10^3) = 800\text{nF}$ .

### Filtre logiciel

Suivant le même principe, le filtre logiciel du second ordre  $y = (\frac{u}{1+0.025\omega})^2$ , s'écrit :

$$z_{n+1} = z_n \left( 1 - \frac{1}{128} \right) + \frac{u_n}{128}$$

$$y_{n+1} = y_n \left( 1 - \frac{1}{128} \right) + \frac{z_n}{128}$$

où  $\frac{1}{128}$  est le pas de temps et  $u_n$  est le signal analogique de l'AOP et  $y_n$  le résultat à envoyer à l'ordinateur.

## 10.2 Les gyroscopes

### 10.2.1 Le capteur

Il existe maintenant des composants électroniques contenant des gyroscopes capable de mesurer la vitesse angulaire grâce à l'observation des forces de Coriolis sur une barre vibrante. Ils sont beaucoup moins coûteux que les gyroscopes mécaniques qui eux sont capables de mesurer les variations angulaires d'un mobile par rapport à une direction fixe obtenue par une toupie tournant à grande vitesse. Les prix des gyroscopes mécaniques étant trop élevés pour ce projet, trois gyroscopes piézo-électriques à un axe Gyrostar (série ENC) de Murata sont utilisés.

Ces gyroscopes donnent un signal utile dans une bande de fréquence de l'ordre de l'hertz à quelques dizaines de hertz, en particulier la mauvaise qualité du signal à basse fréquence induit une dérive difficile à filtrer. Cette dérive est très gênante pour maintenir l'hélicoptère dans une position stationnaire (objectif principal de ce projet). Néanmoins le signal de vitesse angulaire est de bien meilleure qualité que la vitesse obtenue en dérivant les données venant de l'accéléromètre.

D'autre part certains auteurs affirment qu'il n'est pas possible de stabiliser la plate-forme avec les seuls accéléromètres à cause des accélérations du centre de gravité supposées perturber l'information sur la verticale fournie par l'accéléromètre. Ces affirmations sont douteuses dans notre cas puisque l'accéléromètre étant supposé fixé approximativement au centre de gravité dans une position perpendiculaire à la poussée des moteurs l'accélération du mobile à une contribution sur l'accéléromètre.

A priori, une fois maîtrisée la dérive du gyroscope, la meilleure façon de concevoir le régulateur est d'utiliser le signal donné par le gyroscope et de le recalibrer par celui donné par l'accéléromètre.

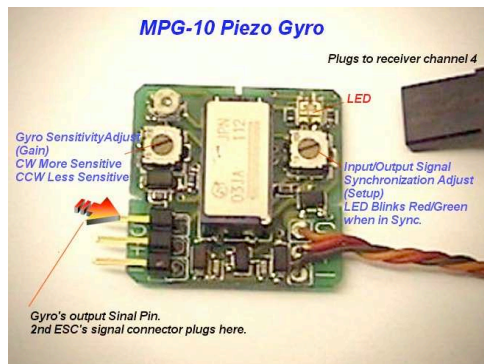


FIG. 25 – un GWS MPG10 contenant un gyro Murata.

Les capteurs Gyrostar sont difficiles à trouver, mais sont le cœur de gyroscopes utilisés en aéromodélisme comme les GWS PG03. Les PG03 sont conçus pour être branchés entre la télécommande et modifier le signal envoyé aux servomoteurs. Ils disposent donc de l'électronique pour moduler le signal de télécommande. Deux choix sont alors possibles :

- récupérer le signal analogique du Gyrostar avec la carte du PG03 (image 26),
- utiliser directement la sortie du PG03 (à savoir la modulation PWM pour servomoteur).

Le premier choix élimine la contrainte de vitesse du signal télécommandé modulé à 50Hz des PG03 mais n'utilise plus son circuit d'amplification. Il semble facile de dessouder le Gyrostar



FIG. 26 – La sortie analogique récupérée par le fil blanc.

du PG03 mais il est moins dangereux de souder un fil sur la patte Out (numéro 4) du Gyrostar directement sur la carte du PG03 figure (26). C'est la méthode utilisée ici (image 26).

### 10.2.2 Amplification du signal

Le document [?] de l'EPFL [7] donne le filtre passe bande suivant (27) pour éliminer les dérives et filtrer les bruits du gyroscope.

- Le filtre passe haut coupe les fréquences en dessous de 0.33Hz pour réduire la dérive ;
- Le filtre passe bas élimine les fréquences au dessus de 588Hz ;
- le signal est amplifié d'un facteur 9.
- le signal est centré sur  $V_{DD}/2$  (soit +2.5V en entrée).

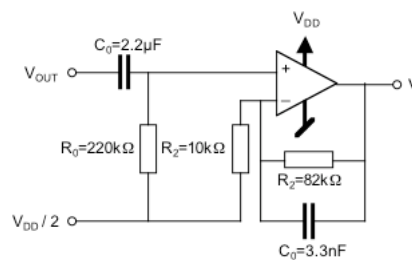


FIG. 27 – Filtre pour gyroscope de l'EPFL.

Malheureusement le signal de notre gyroscope reste encore perturbé par un bruit de taille fixe apparaissant de façon aléatoire. D'autre part une dérive gênante reste présente. Il reste encore du travail à faire pour exploiter au mieux le signal du gyroscope.

## 10.3 L'altimètre infrarouge

L'altimètre infrarouge Sharp GP2Y0D340K est le plus petit et le moins cher des capteurs IR. Il commute de 0 à 1 en présence d'un obstacle à moins de 40cm. Il se branche sur une patte numérique du PIC. La distance de commutation semble dépendre de la couleur de l'obstacle. Le capteur sera dirigé vers le haut de l'hélicoptère (et non vers le bas) afin qu'un utilisateur puisse contrôler l'altitude de la plate-forme en présentant au dessus un obstacle que l'hélicoptère essaiera de poursuivre. Dans la phase d'essai, il est dirigé vers le bas, l'hélicoptère essaie de se maintenir à 40cm du sol.

## 11 L'électronique de puissance

Le but de l'électronique de puissance est d'alimenter et de commander les moteurs. Pour des raisons de simplicité, cette version d'hélicoptère utilise uniquement des moteurs électriques à collecteur alimentés en courant continu (MDC) tournant dans un seul sens. Il suffit donc de 4 MOSFET pour les commander à partir des commandes PWM envoyées par les PICs.

Les moteurs fonctionnent sous 7V et consomment 4A. Pour pouvoir observer les courants passant dans les moteurs, des résistances de 1 Ohm sont mise en série avec les moteurs. Les courants passant dans chaque moteur étant de l'ordre de 1A, on choisit d'alimenter sous 8.5. Une alimentation capable de fournir 5A sous 8.5V est donc nécessaire. D'autre part l'électronique de commande (par exemple les PICs) doit être alimentée en 5V. Ce 5V est obtenu à partir du 8.5V grâce à un régulateur L78S05.



## 11.1 Schémas de base

La documentation de Microchip [35, 33] « Brushed DC Motor Fundamentals » montre deux schémas ((28) et (29)) pour contrôler un MDC selon le type de MOSFET utilisé.

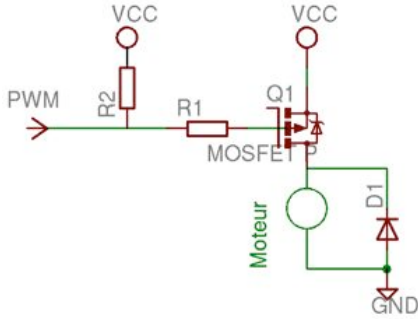


FIG. 28 – High side.

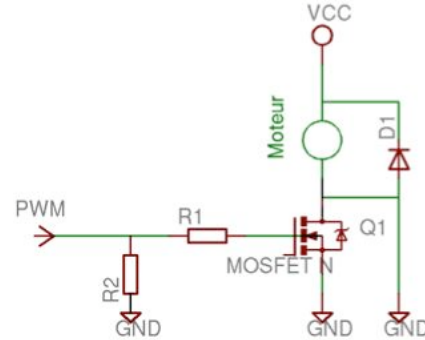


FIG. 29 – Low side.

Dans ces deux schémas, le signal PWM est envoyé par les pattes CCP1 ou CCP2 (Compare Capture PWM) d'un PIC. Afin d'obtenir la précision maximum (10 bits) le signal PWM (créneaux 5V/0V) est envoyé avec une fréquence de 5kHz). En faisant varier le rapport cyclique du signal PWM (rapport entre le temps de l'état haut et le temps de l'état bas), on fait varier la tension au borne du moteur supposé approximativement constante grâce à la self du moteur et la capacité rajoutée filtrant le courant. Le cours de [34] explique comment générer un signal en mode compare ou en mode PWM.

La résistance  $R_1$  protège le PIC des surtensions et la résistance  $R_2$  empêche le MOSFET d'être passant à l'initialisation du PIC. La diode, dite de roue libre, qui doit être capable commuter rapidement, protège le MOSFET des surtensions qui apparaîtrait en son absence au instant de commutation du signal PWM. En effet, la bobine accumule l'énergie magnétique qui doit pouvoir se décharger au moment où l'alimentation du moteur est coupé par le MOSFET.

On utilise des MOSFET P plus facile à trouver en boîtier TO 220. L'inconvénient du MOSFET P, dans le schéma (28), est la tension de la gâchette du MOSFET à 8.5V incompatible avec la tension haute (5V) du PIC. Ce problème se résout facilement par l'adjonction d'un transistor ouvert/ferme par le signal PWM. possible d'utiliser un MOSFET P, à condition d'utiliser un transistor NPN et trois résistances. Voir schéma (31).

Un condensateur placé en parallèle au moteur permet de filtrer ses parasites du moteur.

## 11.2 Rôle de la « roue libre »

La tension  $u$  aux bornes d'une bobine vaut  $L \frac{di}{dt}$ . A l'instant où le MOSFET coupe le courant  $u$  devient un Dirac négatif. Ce qui signifie en pratique qu'une grosse surtension  $V_B \gg V_A$  est créée avec des risques d'apparition d'arcs électriques dans l'interrupteur ici le MOSFET. La diode protège le circuit en renvoyant le courant dans la bobine de B vers A, courant qui va s'amortir progressivement à cause des résistances électriques.

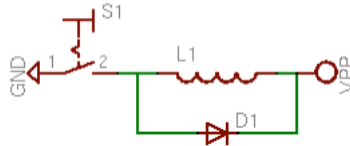


FIG. 30 – Interruption de courant passant dans une self.



### 11.3 Mesure du courant dans les moteurs

L'asservissement des moteurs se faisant en courant, on doit l'observer. Le capteur correspondant est constituée d'une résistance dont on mesure la tension aux bornes. La loi d'Ohm donne alors le courant cherché. On utilise donc le schéma suivant (32).

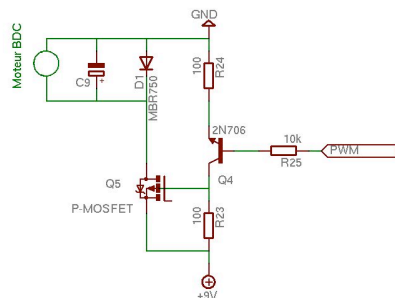


FIG. 31 – Interface de puissance.

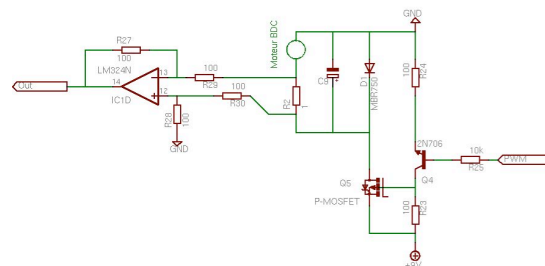


FIG. 32 – Interface de puissance et AOP.

La lecture de la tension se fait grâce à un AOP en montage soustracteur. L'inconvénient de ce montage est la perte de puissance par effet joule dans la résistance. D'autres possibilités existe pour observer le courant en consommant moins de puissance mais ne seront pas discutés ici. On aurait pu placer  $R_2$  entre le moteur et la masse, ce qui aurait évité d'avoir à faire la soustraction réalisée par l'AOP. Ce montage différentiel peu sensible aux perturbations a été choisi ici surtout pour économiser la pose d'un fil supplémentaire entre la plaque à essais et l'hélicoptère.

## 12 Alimentation électrique

Comme nous l'avons vu précédemment, les moteurs doivent être alimentés avec une tension de 8.5V et avec une intensité maximale de 4A. Le composant LM338K est capable de fournir 5A. Un potentiomètre (R66 sur le schéma (12)) permet de régler la tension de sortie à 8.5V. Un condensateur C25 de grande capacité (0.1F) permet de filtrer les parasites et micro coupures. Un régulateur LM7805 permet d'obtenir du 5V (1A) à partir du 8.5V pour alimenter les PIC et les capteurs. Comme le LM338K est alimenté en 12V (grâce une alimentation PC 12V 9A) il doit dissiper une puissance allant jusqu'à 14W, un gros radiateur est nécessaire. On a choisi un radiateur dont la température augmente de 2 degrés par W. Il ne devrait donc pas dépasser 50 degrés à la charge maximale.

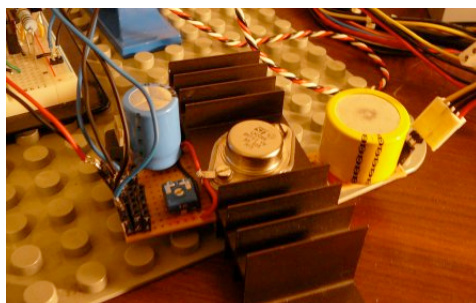
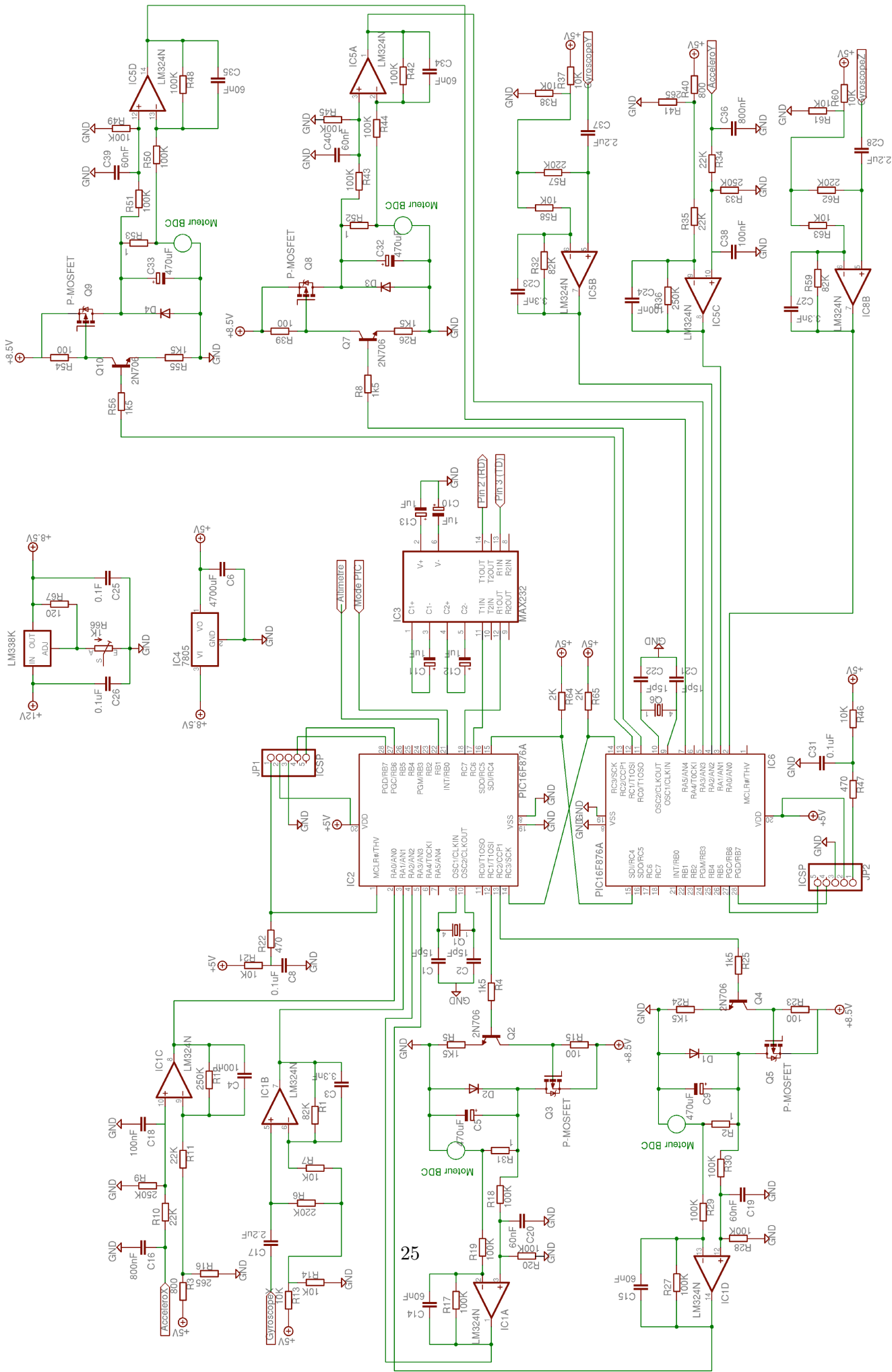


FIG. 33 – Nouvelle allimentation 8.5V 5A.



# Réalisations des asservissements

Les microcontrôleurs PIC 16F876A embarqués sur l'hélicoptère, permettent de réaliser facilement l'acquisition des signaux analogiques et la génération des signaux PWM. Par contre ils ne disposent pas module DSP intégré et donc sont mal adaptés pour faire du calcul numérique en ligne.

L'utilisation d'un ordinateur non embarqué mais connecté par une liaison série avec les micro-contrôleurs permet d'ajouter au système la puissance de calcul manquante. Il existe des logiciels libres spécialisés au calcul numérique à la commande et traitement du signal comme Scilab permettant de programmer aisément les lois de commandes et de les mettre en oeuvre en temps réel.

## 13 L'ordinateur dans la boucle

### 13.1 Scilab et Scicos

Il existe deux types de programmes scientifiques :

- les logiciels algébriques faisant essentiellement du calcul symbolique (Maple, Mathematica, Maxima, Axiom, et MuPad) ;
- les logiciels de calcul scientifique faisant essentiellement de l'analyse numérique (Scilab, Matlab).

Scilab [26, 21] est un logiciel libre pour le calcul scientifique. C'est un interpréteur de langage manipulant des objets typés dynamiquement. Il inclut de nombreuses fonctions spécialisées pour le calcul numérique organisées sous forme de bibliothèques ou de boîtes à outils qui couvrent des domaines tels que la simulation, l'optimisation, et le traitement du signal et du contrôle.

Une des boîtes à outils les plus importantes de Scilab est Scicos [26, 22]. Scicos est un simulateur hybride avec un éditeur graphique de bloc diagrammes permettant de modéliser et de simuler des systèmes dynamiques. Il est particulièrement utilisé pour modéliser des systèmes où des composants temps-continu et temps-discret sont inter-connectés.

### 13.2 Port série sous Scicos

Bien que Scicos possède des moyens de communication avec l'extérieur, il ne possédait pas de module tout fait pour communiquer par le port série. Il a donc fallu rajouter à scicos un bloc diagramme qui puisse envoyer et écouter des données sur un port série.

Ceci est facilement réalisable, car Scilab permet de faire de l'édition de liens sur des fonctions C et de les lier à des blocs diagrammes Scicos. Pour construire un bloc Scicos, deux fichiers sont nécessaires, donc deux fonctions : *fonction de calcul* et *fonction d'interface*.

En créant la fonction de calcul et d'interface pour le port série, Scicos devient un oscilloscope numérique 50Hz. Il lit les données des capteurs de l'hélicoptère sur le port série, les affiche sous forme de courbes, calcule la loi de commande et envoie les consignes PWM sur le port série. La vitesse du port série est de 19200 bauds, 8 bits de données, 1 bit de stop et aucun flot de contrôle (ni matériel ni logiciel).

### 13.3 Vitesse de Scicos

#### 13.3.1 Le temps réel sous Scicos

Une des difficulté de ce projet a été d'obtenir et d'assurer une vitesse suffisante d'exécution des calculs des affichages et des transmissions des données. Ces difficultés proviennent des li-

mitations de vitesse du port série, de l'ordonnanceur de linux, et de la vitesse d'affichage de Scicos.

Scicos permet de lancer une simulation en temps réel <sup>1</sup>. Une seconde Scilab correspond alors au mieux à une seconde réelle. Scicos peut être ralenti durant la simulation d'un buffer graphique trop petit ou à cause de bloc diagramme écrit en langage Scilab (bloc **Sciblock**) que Scicos doit interpréter<sup>2</sup>.

Ces restriction sur la fréquence d'échantillonnage induit à cause du théorème de Shannon (la fréquence d'échantillonnage doit être plus du double de la fréquence maximale du signal pour pouvoir le restituer complètement) que la bande de fréquence qui peut être traitée est inférieure à 25Hz. Bande de fréquence suffisante pour la régulation du tangage mais insuffisante pour la boucle de courant.

### 13.3.2 Vitesse d'échantillonnage obtenues

Les vitesses d'échantillonnage ont été obtenues sous Scicos avec un port série à 19200 bauds :

- 20Hz sur un Macintosh iBook G4 cadencé à 933MHz.
- 50Hz sur un PC 1.2 GHz avec un Linux Ubuntu recompilé en mode 1kHz.

### 13.3.3 Définition d'une période et fréquence Scicos

Dans l'utilisation du temps de Scicos, il faudra prendre garde à ce qui est appelé une fréquence est en fait une pulsation et que les périodes réfèrent aux événements générées par l'horloge (un cycle d'un signal carré **square wave generator** nécessite deux tops d'horloge pour être généré).

## 14 Asservissement des moteurs

Il existe deux méthodes pour contrôler un moteur :

- soit l'asservissement en vitesse (alias asservissement en tension). Son avantage est que la consigne PWM s'obtient linéairement en fonction de la tension. Son inconvénient est que la charge (qui varie proportionnellement à la vitesse au carré de l'hélice) du moteur est non linéaire par rapport à la tension.
- soit l'asservissement en couple (alias asservissement en courant). Son avantage est que le couple (et donc la charge) est une fonction linéaire du courant. Son inconvénient est qu'une consigne PWM est une fonction non linéaire du courant.

Dans notre cas, à cause de la lenteur de Scilab qui nous empêche de réaliser une bonne boucle de courant, la supériorité de l'asservissement en courant sur l'asservissement en tension n'est pas claire. Dans le futur la boucle de courant sera réalisée dans le PIC. L'avantage de la boucle de courant devrait apparaître plus nettement.

### 14.1 Etude théorique d'un moteur DC

Cette section, tirée d'un cours de EPFL [7], explique le modèle d'un moteur à courant continu. Un moteur est constitué de deux parties :

- une partie tournante appelée *rotor* qui contient une bobine appelée *induit*. Cette bobine est caractérisée par sa résistance  $R$  et son inductance  $L$ . Du fait de son mouvement elle est le siège d'une force contre électromotrice  $e$  proportionnelle à sa vitesse angulaire.

---

<sup>1</sup>en modifiant la valeur **Real Time Scaling** du menu <Simulate><Setup>.

<sup>2</sup>Les **Sciblock** sont à éviter. Il vaut mieux utiliser **Mathematical Expression** ou **C block** qui sont beaucoup plus rapides.

- une partie fixe appelée *stator* qui dans notre cas sera un aimant permanent caractérisé par un coefficient appelé *excitation magnétique*  $\Phi$ .

La tension au borne de l'induit est alors donnée par

$$u(t) = Ri(t) + Ldi/dt + e(t), \quad (2)$$

$$e(t) = k \Phi \omega(t). \quad (3)$$

Le courant dans le rotor dans le champ magnétique du stator est le siège de force électromagnétique induisant un couple électromagnétique  $T_e(t)$ . Il est proportionnel au courant induit  $i(t)$ . Il vaut :

$$T_e(t) = k \Phi i(t). \quad (4)$$

Notant  $J$  l'inertie du moteur sa dynamique s'écrit :

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - R_f \omega(t) - T_r. \quad (5)$$

Où,  $T_r$  est un couple résistant et  $R_f$  un couple caractérisant les frottements. En posant  $K_e = K_t = k\Phi$ , on obtient le schéma bloc suivant (34) modélisant le moteur. Le moteur est un système en boucle fermé.

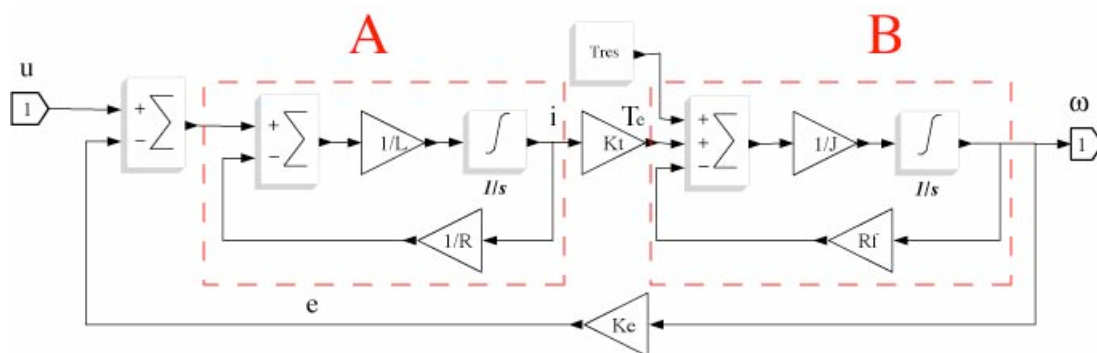


FIG. 34 – Schéma théorique d'un moteur.

Les fonctions de transfert des blocs A et B s'écrivent :

$$H_A = \frac{1/R}{1 + sL/R}, \quad H_B = \frac{1/Rf}{1 + sJ/Rf}.$$

Dans notre cas, quatre moteurs Graupner Micro Speed sont utilisés et sont alimenté par une tension 7V (courant 1.2A) hachée par un signal PWM à 5kHz. L'impédance de la bobine du moteur est de 0.2mH et sa résistance interne est de 2Ω. Le paramètre  $k$  n'a pas été identifié.

## 14.2 Asservissement en courant

La régulation théorique d'un moteur avec un PID se fait selon le schéma (35) suivant.

Le PID de ce diagramme corrige l'erreur et la fait converger vers 0 (si le PID est bien réglé). La fonction du bloc **Conversion courant vers consigne PWM** se comporte, dans notre cas, de façon non linéaire.

Cependant, dans notre cas, nous voulons que la sortie du régulateur PID soit la valeur de la **Consigne de courant**. Pour cela, nous devons modifier le schéma bloc (35) en ajoutant un feedforward. Le nouveau schéma bloc ressemble donc à l'image (36). La notion de feedforward

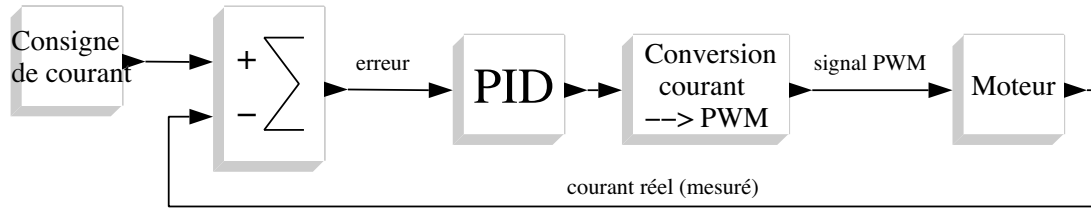


FIG. 35 – Régulation d'un moteur avec un feedback.

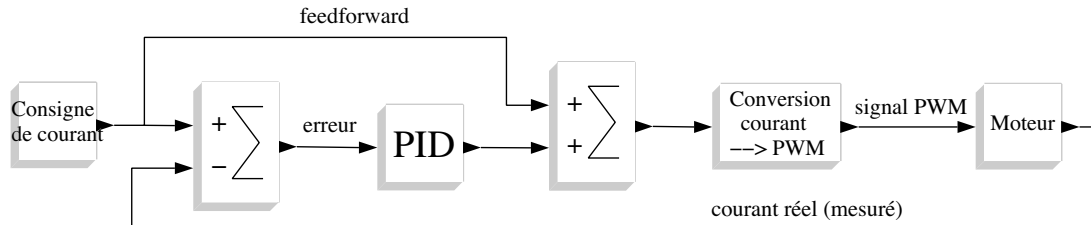


FIG. 36 – Régulation d'un moteur avec un feedforward et feedback.

est très bien expliquée sur le cours d'automatique d'Åström [31], gratuit et disponible sur son site web.

Åström résume les différences entre feedback et feedforward :

Feedback	Feedforward
Est utilisé en boucle fermée	Est utilisé en boucle ouverte
Réagit seulement quand il y a des perturbations	Réagit avant que les perturbations arrivent
Est robuste aux erreurs de modélisation	Est non robuste aux erreurs de modélisation
Pose des risques d'instabilité	Pose aucun risque d'instabilité

Pour atténuer la perturbation, le feedforward s'utilise de la façon suivante :

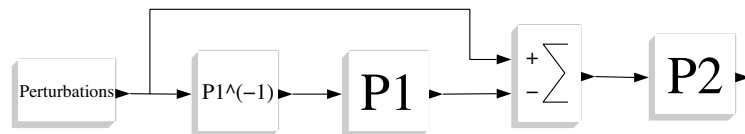


FIG. 37 – Atténuation de la perturbation.

où la perturbation est totalement éliminée mais le **process**  $P_1$  doit être bien compris puisqu'il doit être explicitement inversé dans le bloc  $P_1^{-1}$ .

### 14.3 Déterminer la fonction non linéaire PWM-Courant en régime établi

Une série de mesure sur des réponses indicielles à permis de déterminer le courant en fonction de consignes de PWM. Après inversion de la fonction on obtient la fonction en statique du bloc **conversion courant vers PWM**. On supposera que cette fonction en dynamique se comporte linéairement entre les points mesurés (le régulateur PID jouera ce rôle).

En reprenant l'étude du moteur section (14.1). Le circuit induit d'un moteur en régime établi se comporte, du point de vue électrique, comme une résistance  $R$  et d'une FEM en série. Le couple  $C$  de l'équation (4), en régime établi, est proportionnel au courant et s'écrit donc  $C = k i$ .

On trouve dans des documents que le couple (traînée, portance) sur une hélice est également une fonction dépendante du carré de la vitesse de l'hélice (donc du rotor  $\omega$ ), d'où  $C = k_1 \omega^2$ . On en déduit la vitesse  $\omega$  en fonction du courant :  $\omega = \sqrt{i k/k_1}$ .

La tension  $u$  aux bornes du circuit induit vaut  $u = Ri + e = Ri + k_2 \sqrt{i k/k_1}$ . Soit plus simplement :

$$u = K\sqrt{i} + Ri$$

Les mesures obtenues figure (38), lors des expériences confirment la théorie. Pour obtenir ces mesures, on donne une consigne de PWM sur 10 bits sur un moteur avec son hélice et on observe le courant obtenu.

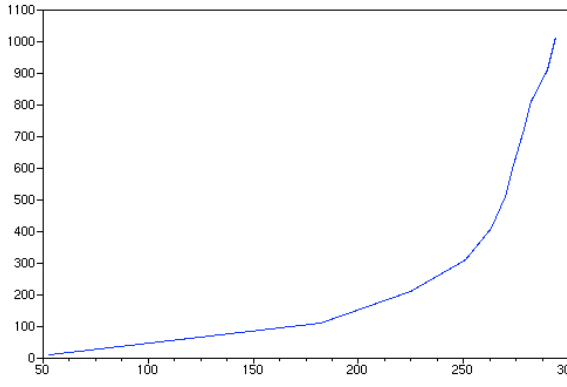


FIG. 38 – PWM (ordonnées) en fonction du courant (abscisses).

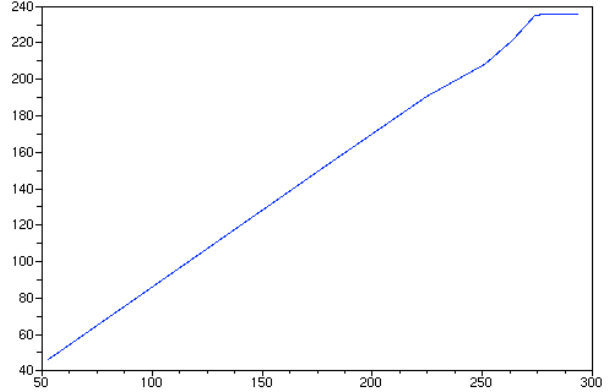


FIG. 39 – Correspondance des courants entre 2 moteurs.

#### 14.4 Non linéarité entre les moteurs

Les quatre moteurs du même type ne proviennent pas de la même série et présente des caractéristiques légèrement différentes. Si la rotation d'une hélice est plus dure, le moteur tourne moins vite et la FEM induite est plus faible. Soumis à la même tension externe le courant est plus grand.

Afin d'équilibrer la poussée des deux moteurs gérant un axe de l'hélicoptère, une fonction statique établissant la correspondance entre courants des deux moteurs a due être déterminée. On voit sur la courbe (39), que pour des courants importants (haut droit), un des deux moteurs sature.

Le graphique (40) a été obtenu en simulation réelle du schéma (36). On envoie une consigne de courant aux deux moteurs (signal carré en noir). On voit que les courants (rouge et bleu) arrivent à suivre les consignes. Ce résultat a été obtenu essentiellement avec un feedforward statique compensant la non-linéarité, seul un terme intégral a été ajouté pour assurer erreur asymptotique nulle.

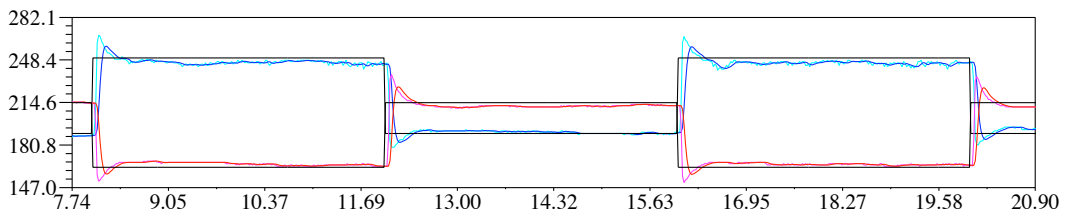


FIG. 40 – Consignes de courant et courant obtenus.

## 15 Asservissement du tangage

### 15.1 Modèle de l'hélicoptère

On obtient la réponse indicielle de l'hélicoptère (figure (41)) en regardant comment il oscille lorsqu'on le laisse se balancer sur le banc d'essai.

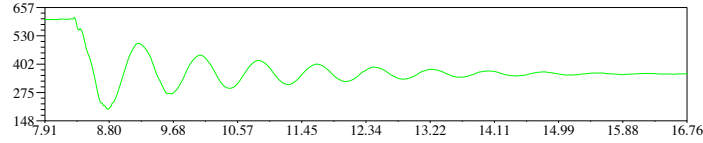


FIG. 41 – Réponse indicielle de l'hélicoptère stable.

De cette courbe, on en déduit la fonction de transfert  $H(s)$  qui au courant associe l'inclinaison de l'hélicoptère :

$$H(s) = \frac{300}{s^2 + 1.28s + 31}$$

Cette formule a été obtenue en supposant que la poussée était proportionnelle au courant ce qui n'est vrai qu'en régime établi.

On peut essayer d'améliorer le modèle en ajoutant la dynamique du rotor. En effet la charge est une fonction non linéaire de la vitesse du moteur alors que le courant agit sur son accélération. Une linéarisation autour d'un régime donné montre que le comportement dynamique serait mieux modélisé par

$$\frac{300}{(s^2 + 1.28s + 31)(1 + ks)}$$

formule dans laquelle il faut estimer  $k$ . Après mesure de la fonction de transfert il apparaît qu'elle n'est pas d'ordre 3 dans la zone de fréquence utile. Cette fonction de transfert a été alors estimé en envoyant une séquence de sinusoides et en observant le gain de la réponse. Une bonne approximation de ce transfert est :

$$G(s) = \frac{240 + 40s}{s^2 + 1.28s + 31}$$

On vérifie que le système  $G(s)$  est stable car il n'a que des pôles négatifs.

### 15.2 Etude de l'influence néfaste du retard

En simulation, il est facile de stabiliser l'hélicoptère, mais dans la réalité, les retards accumulés (transition des données entre PIC et Scicos, faible fréquence d'échantillonnage de Scilab) font qu'il est difficile de stabiliser correctement l'hélicoptère. Etudions l'influence des retards sur un transfert obtenu précédemment (ancienne étude datant de la révision 2 de ce rapport) :

$$G(s) = \frac{192}{s^2 + 0.7s + 25}$$

A cause des retards, la fonction de transfert  $G(s)$  du modèle de l'hélicoptère stable doit être modifiée :

$$J(s) = G(s) \exp^{-\tau s}$$

Pour  $\tau = 0.02$  et en utilisant la formule du développement limité  $\exp^{-\tau s} \simeq 1 - \tau s \simeq \frac{1 - \tau/2s}{1 + \tau/2s}$ ,  $J(s)$  s'écrit :



$$J(s) = G(s) \left( \frac{1 - 0.005s}{1 + 0.005s} \right)^2$$

Soit  $F(s)$  la fonction de transfert, utilisée dans le feedforward, qui inverse le modèle de l'hélicoptère (avec plus ou moins d'exactitude) comme expliqué dans la section 14.2. Si on suppose que modèle  $G(s)$  est exact, on a alors :

$$F(s) = J(s)^{-1} = \frac{(s^2 + 0.7s + 25)}{192}$$

On introduit la fonction de transfert du filtre anti-repliement de spectre vue dans le chapitre concernant l'électronique (chapitre 7) :

$$A(s) = \left( \frac{1}{1 + 0.025s} \right)^4$$

Nous obtenons la fonction de transfert de l'hélicoptère et modifié par un contrôleur (on a ignoré le modèle d'un bloqueur échantillonneur (**Sample/hold**) parce qu'il serait trop compliqué à utiliser) :

$$K(s) = A(s)F(s)J(s)$$

En traçant le diagramme de Nyquist et de Black de  $K(s)$  :

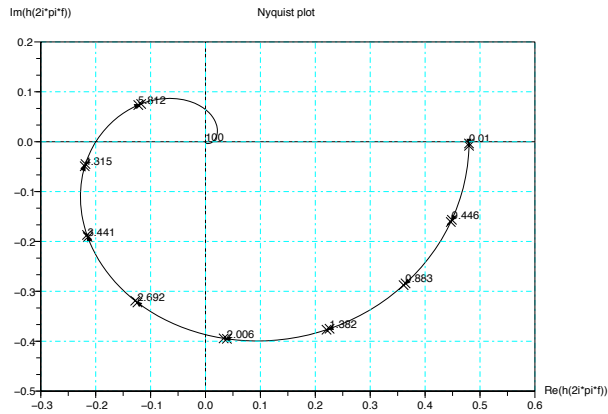


FIG. 42 – Tracé de Nyquist de  $K(s)$ .

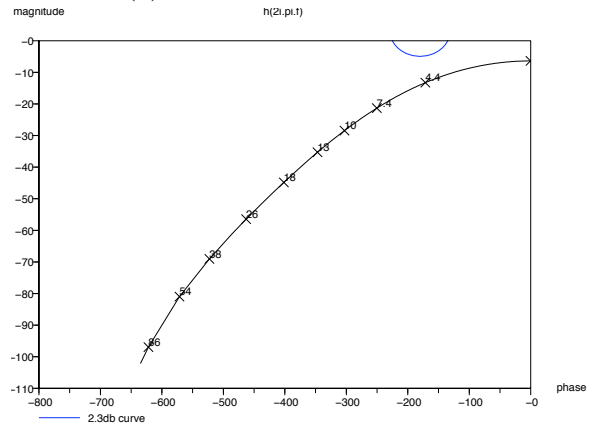


FIG. 43 – Tracé de Black de  $K(s)$ .

Le tracé du lieu de Nyquist de la fonction de transfert  $K$  nous montre qu'à cause du retard nous ne pouvons pas reboucler ce système avec des gains trop forts (la courbe de Nyquist risquerait d'entourer le point  $(-1;0)$ ).

En modifiant les différents paramètres comme : la longueur du retard, la vitesse d'échantillonnage, la précision du modèle  $G(s)^{-1}$  on se fait une bonne idée de la valeur des gains possibles du régulateur.

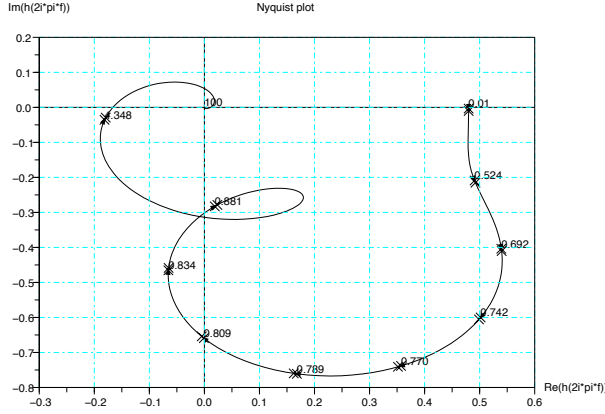


FIG. 44 – Tracé de Nyquist de  $K(s)$  avec une imprécision de 30% sur  $G(s)^{-1}$ .

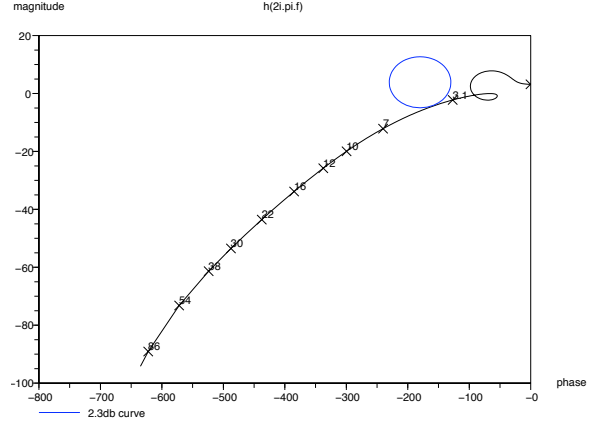


FIG. 45 – Black de  $K(s)$  avec une imprécision de 30% sur  $H(s)^{-1}$  et gain proport. de 3

### 15.3 Le contrôleur adopté

La fonction de transfert identifiée :

$$G(s) = \frac{240 + 40s}{S^2 + 1.28s + 31}$$

étant stable et d'inverse stable, le correcteur adopté est la somme de :

$$\frac{31}{(240 + 40s)(1 + 0.025s)^2}$$

appliqué au signal de : l'accéléromètre et de

$$\frac{s + 1.28}{(240 + 40s)(1 + 0.025s)^2}$$

appliqué au signal venant du gyroscope. Le résultat de cette correction est de placer les pôles du système en boucle ouverte corrigé à -40. Un feedback de gain 1/2 a été utilisé. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure (46). Le schéma scicos déterminant complètement le régulateur est donné dans les schémas Scicos (48), (49), (50), (51).

### 15.4 Résultats obtenus

Dans la figure (46), le premier diagramme (celui du haut) montre l'inclinaison (en vert), observée par l'accéléromètre, obtenue en réponse à des échelons de consigne d'inclinaison (en noir) envoyé par le PC. Les consignes PWM pour les deux moteurs sont de couleur rouge et bleue.

Le deuxième diagramme (celui du milieu) montre les deux consignes de courants (en noir) et les courants observés dans les deux moteurs (en bleu et rouge).

Le deuxième diagramme (celui du bas) montre le signal du gyroscope (en vert) et la dérivée du signal de l'accéléromètre (en violet).

## 16 Schéma bloc Scicos

Dans les schémas Scicos (47), (48), (49), (50), (51), les blocs sont coloriés pour une meilleure compréhension.

En jaune, les schémas blocs correspondant à la communication avec le PIC maître. En gris, les consignes. En rose pâle, les signaux arrivant au plot. En vert, les signaux du gyroscope et de l'accéléromètre (cette couleur correspond aussi au courbe obtenue sur la figure (46)). En bleu et rouge, les signaux correspondant aux courants des moteurs 1 et 2. En violet, les régulateurs.

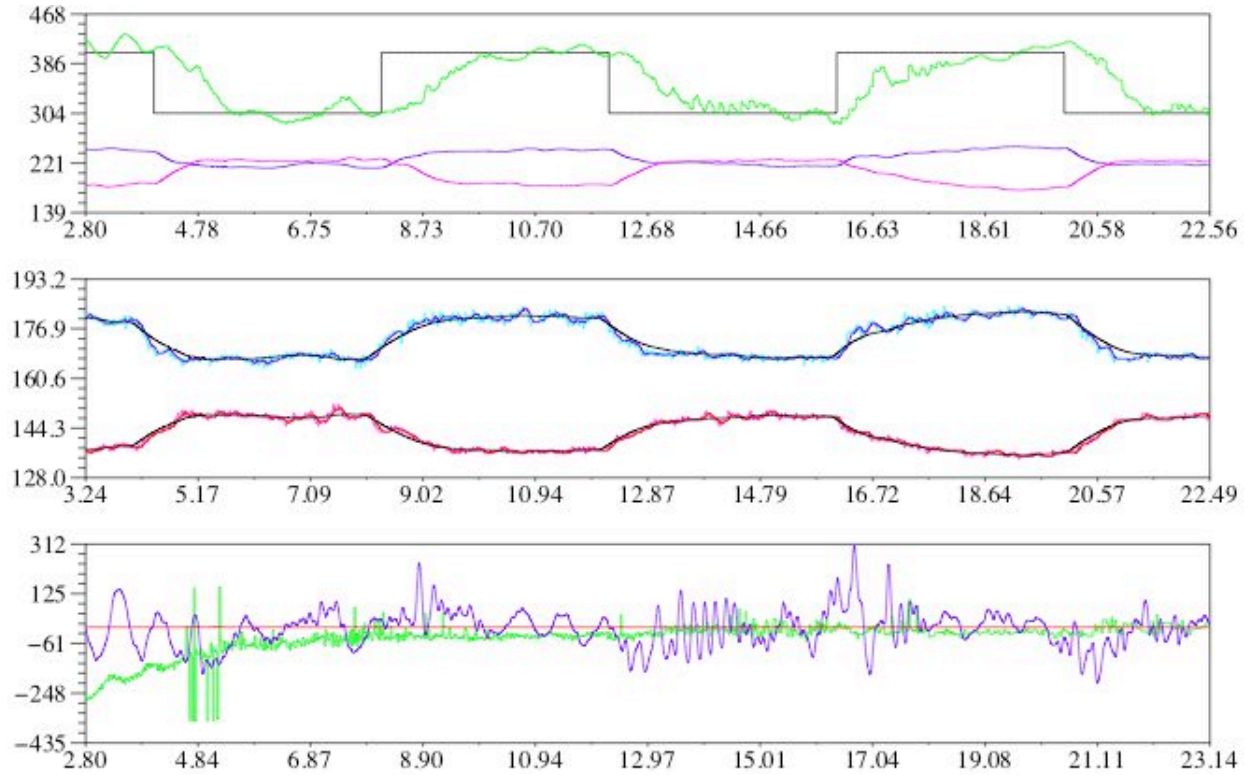


FIG. 46 – Résultats obtenus lors d'une simulation.

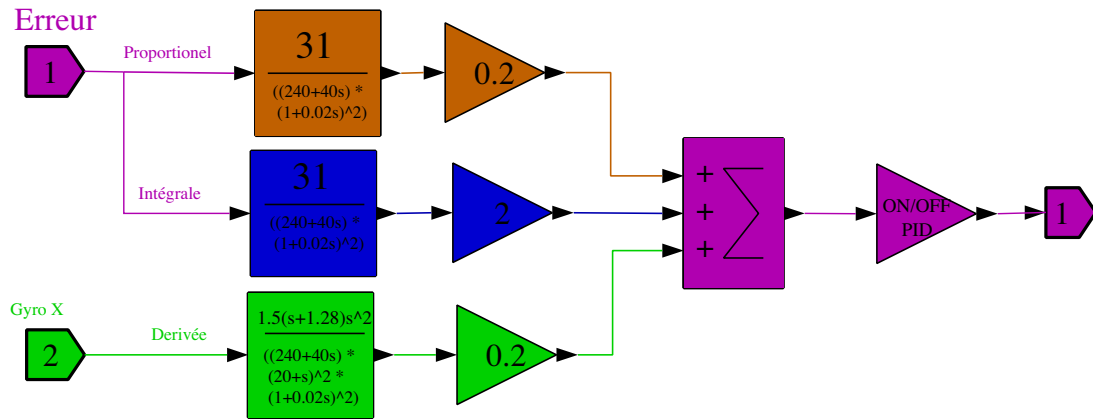


FIG. 47 – Super bloc du régulateur de l'inclinaison de l'hélicoptère.

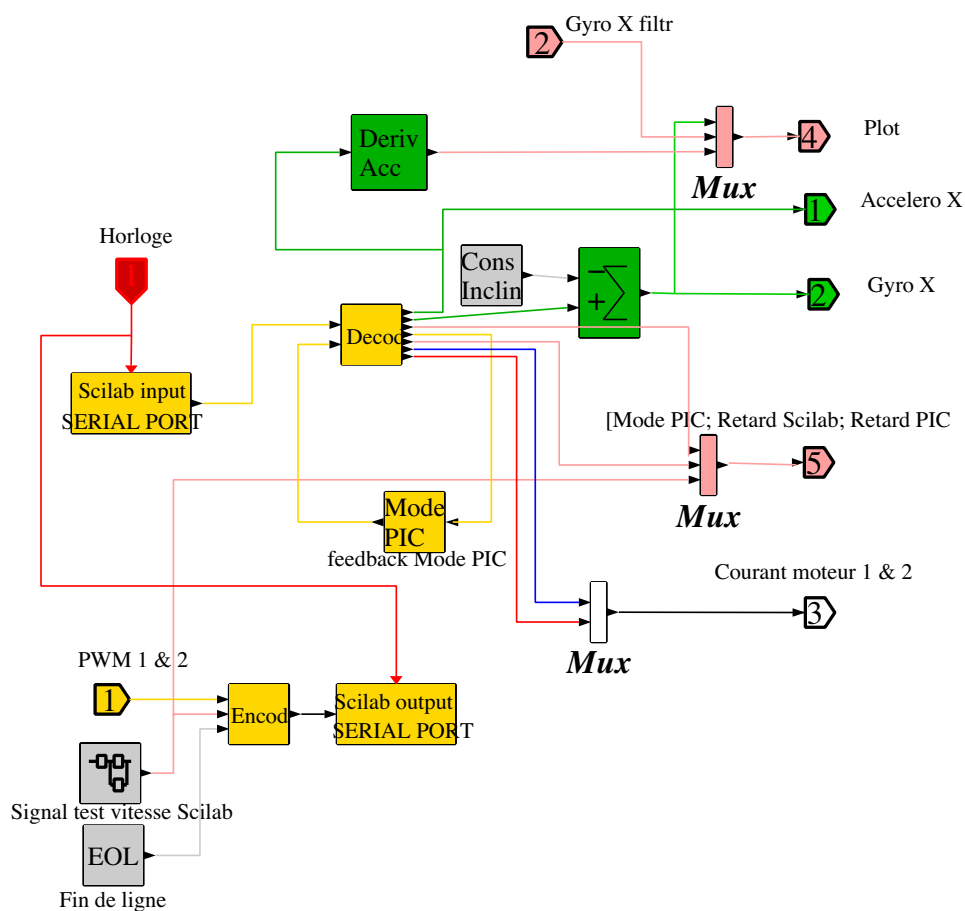


FIG. 48 – Super bloc pour la communication avec le PIC maître.

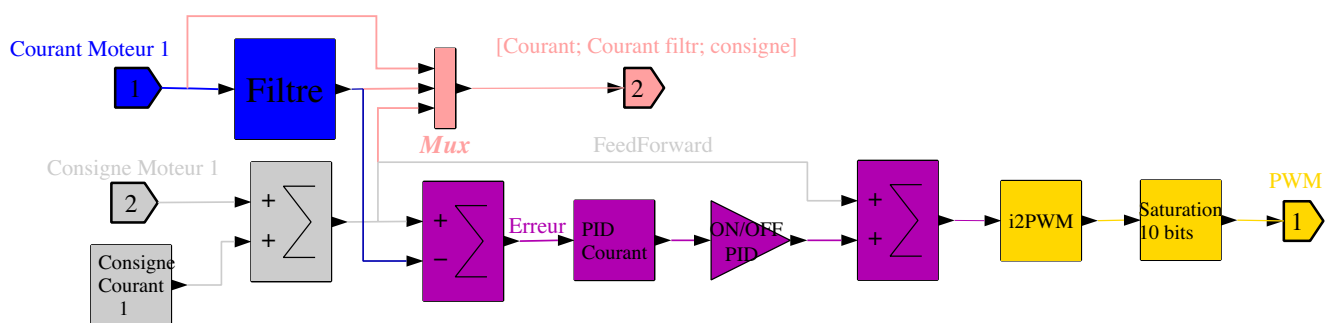


FIG. 49 – Super bloc régulant le moteur 1.

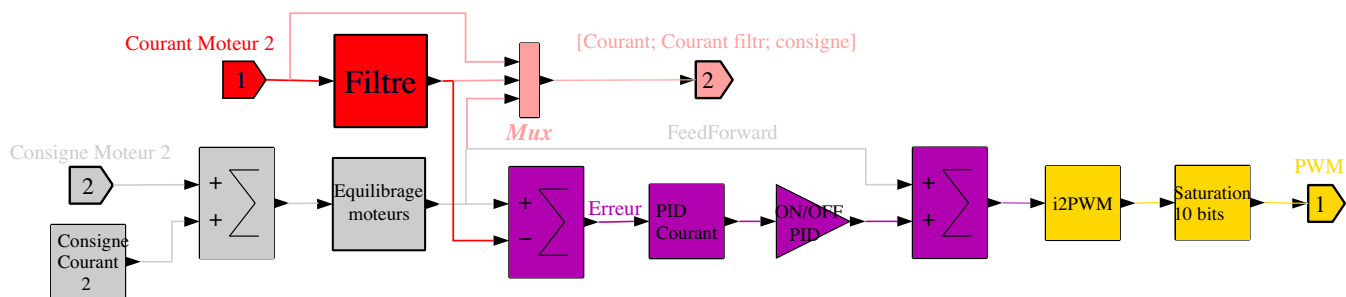


FIG. 50 – Super bloc régulant le moteur 2.



# Conclusion

Ce rapport a présenté l'évolution de l'étude et de la réalisation d'un hélicoptère à quatre hélices sur une période effective de travail d'environ quatre mois. Une partie du cahier des charges a été réalisée. La balançoire un axe a été faite assez complètement. Seules les préalables à la stabilisation deux axes (réalisation de l'alimentation 8.5V pour pouvoir alimenter les quatre moteurs, la programmation de la liaison I<sup>2</sup>C des deux PIC en cours de debogage) ont été faits. Par contre des essais de vols avec la balançoire un axe ont été commencés (la puissance des deux moteurs, en limite de puissance, empêche de mettre en oeuvre la régulation d'altitude mais le capteur fonctionne et l'information d'altitude est envoyée correctement au contrôleur).

Les retards dans la réalisation, en fait prévus, (puisque au départ le minimum annoncé était la réalisation de la balançoire) sont dus à la sous-estimation de la difficulté de faire une stabilisation de qualité de la balançoire un axe. Les difficultés sont multiples : – lenteur de la liaison série, – lenteur de Linux-Scicos pour faire du temps réel, – difficultés à obtenir un modèle fiable, – non linéarité du système, – perturbation électrique ou aérodynamique, – précision des capteurs, – dérive des capteurs, – difficulté de la programmation en assembleur des microcontrôleurs, – nécessité de commander en courant qui oblige à gérer plus d'entrées que prévues et à faire des boucles rapides.

Toutes ces difficultés ont ralenti le projet mais ont été très formatrices car elles font toucher du doigt les différences existantes entre une simulation d'un logiciel et la réalisation physique d'un prototype.

La construction de cet hélicoptère a fait appel à plusieurs spécialités de l'ingénierie à savoir : – la construction mécanique, – l'électronique, – l'informatique, – l'automatique. Ensemble de domaines beaucoup trop vaste pour être maîtrisé en peu de temps mais qu'un tel projet permet d'aborder de façon très agréable.

Ce projet va continuer d'évoluer, puisque pendant la période du stage des améliorations vont être apportées comme : – terminer la communication I<sup>2</sup>C entre les deux PIC, – finir de stabiliser l'hélicoptère complet, – apprendre la programmation des dsPIC, – embarquer l'asservissement de l'hélicoptère par un dsPIC, – utiliser des modules XBee pour la communication sans fil – et, pourquoi pas, remplacer les moteurs par des moteurs brushless.

L'aventure continue donc. Merci pour la création de la motivation!!!

# Bibliographie

## Références

### Page web

- [1] L'évolution de ce projet peut être suivie sur la page web :  
<http://quentin.quadrat.free.fr/index-fr.html>

### Les autres projets hélicoptères à quatre hélices

- [2] <http://forum.xbird.org/>  
L'indispensable forum en français où tous les passionnés d'hélicoptères 4 hélices viennent pour partager leur connaissance.
- [3] <http://perso.wanadoo.fr/grzflier/>  
Site en français sur la construction d'un draganflyer. Il donne les caractéristiques du matériel électronique et mécanique. L'inconvénient est qu'il donne aucune explication concernant la réalisation du circuit électronique et du modèle physique.
- [4] <http://www.irccyn.ec-nantes.fr/hebergement/Robvolint/>  
Projet français sur la construction d'un hélicoptère à quatre hélices intelligent pour le vol à l'intérieur de bâtiments où l'accès est inaccessible par des humains (accidenté, contaminé). Ce projet est réalisé par des partenaires tels que l'INRIA, le CNRS, le CEA, ...
- [5] <http://homepages.paradise.net.nz/jameskea/>  
Site en anglais montrant un projet abouti d'hélicoptère. La photo de la couverture de ce rapport provient de ce site.
- [6] <http://perso.orange.fr/pjdag/nico/index.html>  
Un autre projet français de plateforme volante (non fini). Des explications très claires y sont données sur l'électronique, la programmation des dsPIC (en C), la mécanique.
- [7] <http://asl.epfl.ch/research/projects/VtolIndoorFlying/indoorFlying.php>
- [8] <http://asl.epfl.ch/member.php?SCIPER=149618>  
Projet étudié et réalisé par des élèves et des professeurs de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- [9] Samir Bouabdallah, Pierpaolo Murrieri, Roland Siegwart, *Design and Control of an Indoor Micro Quadrotor*
- [10] Samir Bouabdallah, *PID vs. LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor*,  
Ce sont les documents importants pour la modélisation physique et la stabilisation d'un hélicoptère. On peut les télécharger respectivement sur :  
– <http://asl.epfl.ch/aslInternalWeb/ASL/publications/uploadedFiles/325.pdf>  
– <http://asl.epfl.ch/aslInternalWeb/ASL/publications/uploadedFiles/330.pdf>
- [11] Pierre-Olivier Latour, *Computer based control system for a model helicopter*, 2002.
- [12] André Noth, *Synthèse et implémentation d'un contrôleur pour Micro Hélicoptère à 4 rotors*, Février 2004.

- [13] Marc Kunze, *Hélicoptère indoor*, Février 2003.  
Documents réalisés par des élèves de l'APFL (le meilleur est le premier de la liste).  
On peut les télécharger respectivement sur :  
– <http://asl.epfl.ch/research/projects/VtolIndoorFlying/rapports/rapportLatour.pdf>  
– <http://asl.epfl.ch/research/projects/VtolIndoorFlying/rapports/rapportNoth.pdf>  
– <http://asl.epfl.ch/research/projects/VtolIndoorFlying/rapports/rapportKunze.pdf>
- [14] <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?s=05bcbf26fe1c60ab6f128e5e38fc88c5&t=297067&pp=15>  
Forum anglais, où le concepteur explique comment il a construit son hélicoptère.  
Cet hélicoptère est de petite taille et il n'est pas très stable. Il doit être stabilisé avec la télécommande.
- [15] Site du Draganflyer : <http://www.rctoys.com/draganflyer5.php>
- [16] Site de l'Engager : <http://hobby.keyence.co.jp/english/saucer.html>
- [17] Site de l'X-UFO : <http://www.firebox.com/?dir=firebox&action=product&pid=1024>
- [18] Site des microdrones : <http://www.microdrones.com/>
- [19] Site des tribelles : <http://ovirc.free.fr/Tribelle.php>  
Sites commerciaux où l'on peut acheter son hélicoptère radio-commandé. Les microdrones sont sûrement les plus belles plateformes volantes mais aussi les plus chères. Les tribelles sont des hélicoptères à trois hélices.
- [20] <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=394375>  
Faire voler une soucoupe volante est également possible. « *I want to believe* »

## Logiciels utilisés

- [21] La page principale de Scilab : <http://www-rocq.inria.fr/synder/>  
Scilab est un logiciel libre pour le calcul scientifique, c'est un interpréteur de langage manipulant des objets mathématiques typés dynamiquement. Il inclut de nombreuses fonctions spécialisées pour le calcul numérique organisées sous forme de bibliothèques ou de boîtes à outils qui couvrent des domaines tels que la simulation, l'optimisation, et le traitement du signal et du contrôle.
- [22] La page principale de Scicos : <http://www.scicos.org/>  
Une des boîtes à outils les plus importantes de Scilab est Scicos. C'est un éditeur graphique de bloc diagrammes permettant de modéliser et de simuler des systèmes dynamiques. Il est particulièrement utilisé pour modéliser des systèmes où des composants temps-continu et temps-discret sont inter-connectés.
- [23] La page principale de SynDEx : <http://www-rocq.inria.fr/synder/>  
SynDEx est un logiciel de CAO mettant en oeuvre la méthodologie Adéquation Algorithme Architecture (AAA) pour le prototypage rapide et l'optimisation de la mise en oeuvre d'applications distribuées temps réel embarquées. A partir d'un algorithme et d'une architecture donnés sous forme de graphe SynDEx génère une implémentation distribuée de l'algorithme en macro-code m4.
- [24] La page principale de KTechlab : <http://ktechlab.org/>
- [25] La page principale de Qucs : <http://qucs.sourceforge.net/screenshots.html>  
KTechlab et Qucs sont des simulateurs de circuits intégrés.



## Documentation des logiciels

- [26] Stephen L. Campbell, Jean-Philippe Chancelier and Ramine Nikoukhah, *Modeling and Simulation in Scilab/Scicos*, Springer, 2005.  
Ce livre (en Anglais) est un tutoriel sur l'utilisation de Scilab et de Scicos et s'attarde sur ses outils de simulation et de modélisation.
- [27] Ce livre (en Français) pourvoie un autre tutoriel sur l'utilisation de Scilab et de Scicos en plus simple mais il date un peu.
- [28] Thierry Grandpierre, Christophe Lavarenne, Yves Sorel, *Modèle d'exécutif distribué temps réel SynDEx*, INRIA, 1998.  
Ce document s'adresse aux concepteurs d'applications distribuées temps réel embarquées, qui désirent optimiser l'implantation de leurs algorithmes de commande et de traitement du signal et des images sur des architectures multiprocesseurs. Il s'adresse ensuite plus particulièrement aux utilisateurs du logiciel SynDEx qui supporte la méthodologie AAA.
- [29] Yves Sorel, *Génération automatique d'exécutifs distribués temps réel embarqués optimisés pour SoC*  
Génération automatique d'exécutifs avec le logiciel SynDEx.

## Cours sur l'automatique

- [30] Pierre Faure et Michel Depeyrot, *Eléments d'automatique*, Dunod, 1974.  
Livre sur l'automatique, complet mais assez dur pour débiter.
- [31] Karl Johan Åström *Control System Design* ME155A.  
Karl Johan est un personnage important dans l'histoire de l'automatique. Ses cours sont téléchargeables sur son site <http://www.control.lth.se/~kja/> Ils sont complets et très biens pour débiter l'automatique (Lecture Note 1).
- [32]
- [33] Application Notes 905 de Microchip sur la structure des moteurs à balais.

## Cours sur les microcontrôleurs PIC et sur l'électronique

- [34] <http://www.abcelectronique.com/bigonoff/>  
Le site de Bigonoff contenant tous les cours INDISPENSABLES et gratuits pour maîtriser la programmation assembleur des PIC de Microchip (16F84, 16F876, 16F877, 16F87x(A), 18Fxx8). Un grand merci pour Bigonoff.
- [35] <http://www.microchip.com/>  
Microchip fournissent de la documentation technique gratuite (*Application Notes*) sur des domaines variés (contrôle d'un moteur, programmation PIC, ...)
- [36] <http://thomas.cremel.free.fr/wiki/wikiread.php?LaFaq> FAQ concernant les problèmes les plus fréquemment rencontrés en robotique et électronique (niveau débutant).
- [37] <http://www.jdm.homepage.dk/newpic.htm>  
Schéma électronique du programmeur JDM permettant de flasher un PIC.
- [38] <http://perso.orange.fr/e-lektronik/LEKTRONIK/C8.htm>
- [39] <http://etronics.free.fr/dossiers/analog/analog50/ampliop.htm>

- [40] <http://licencer.free.fr/AOP.html>  
Cours sur les AOP.
- [41] <http://www.masoner.net/articles/async.html>
- [42] [http://www.aurel32.net/elec/port\\_serie.php](http://www.aurel32.net/elec/port_serie.php)
- [43] <http://www.easysw.com/~mike/serial/serial.html>  
Programmation Linux du port série.

### **Autres**

- [44] Page web des moteurs à courant continu de Graupner :  
<http://shop.graupner.de/webuERP/servlet/AA?wgr=821>
- [45] Page web des moteurs à courant continu de GWS :  
<http://www.gws.com.tw/english/product/powersystem/edp.htm>