

# Projet de diplôme Bachelor

## Mini quadricoptère pour missions d'observations



Etudiant:  
Florian Nicolier  
Département TIN  
Orientation Microtechnique

Professeur responsable  
Dr Lorenzo Zago  
Professeur département TIN

08.08.2012

# Remerciements

---

Dans un premier temps, je tiens à remercier mon professeur responsable, Monsieur Lorenzo Zago, pour ses conseils et sa disponibilité tout au long du travail de diplôme.

Je remercie également ma famille et mon amie Sophie Nuara pour leur soutien constant depuis de nombreuses années et pour les nombreuses relectures effectuées.

Un grand merci aux différents ateliers de mécanique et d'électronique pour leur disponibilité et leurs conseils avisés.

Pour finir, une pensée à mes collègues pour la bonne ambiance, les échanges et les bons moments passés ensemble durant ces années d'études.

# Résumé

---

L'objectif de ce travail de diplôme proposé par le docteur Zago était de concevoir et de tester un quadricoptère de taille minimale qui soit équipé d'une caméra vidéo. Dans un premier temps, une recherche documentaire sur ce type d'appareils, afin de comprendre l'entier de leur dynamique, était nécessaire et a été effectuée.

La totalité des composants et les matériaux utilisés ont dû être réfléchis afin de pouvoir être facilement trouvables dans le commerce sans trop de frais ni de difficultés.

La conception de bancs de test pour comparer les différents composants a permis de vérifier l'uniformité des comportements de composants de séries censés être identiques, et d'éliminer ceux dont les différences de fonctionnement étaient trop importantes.

Dans la phase finale du projet, des essais de vol ont été réalisés. Les problèmes mécaniques soulevés et réglés, et le software permettant le vol de l'appareil modifié pour obtenir un meilleur comportement de l'appareil et une possibilité de vol.

## Diplôme 2012

### *Mini-quadricoptère pour missions d'observation*

---

#### Résumé

Etude et expérimentation de petits robots volants destinés à des missions d'observation.

#### Cahier des charges

- Complément de formation sur les quadricoptères : aérodynamique, électromécanique, régulation, programmation sur microcontrôleur,
- Conception et construction d'un système de taille minimale compatible avec une caméra sans fil. Le système de commande sera basé sur un microcontrôleur MSP430,
- Essais avec, en particulier, divers types de capteurs inertiels, en air calme et turbulent (vent).
- Choix et configuration d'une microcaméra sans fils et de son optique. Transmission et traitement des images.
- Rapport de l'étude.

Le candidat :



Florian Nicolier

Le professeur responsable :



Lorenzo Zago

Le chef du département des  
Technologies Industrielles



Prof. Michel Etique

## Table des matières

1.	Introduction du sujet .....	1
2.	Modèles principaux disponibles sur le commerce .....	2
3.	Dynamique de vol des quadricoptères.....	5
3.1.	Déplacements dans l'espace et termes techniques.....	5
3.2.	Différences avec les hélicoptères usuels.....	6
3.3.	Compensation du couple de réaction .....	7
4.	Conception modèle douze pouces. ....	9
5.	Electronique embarquée et interfaces.....	11
5.1.	Carte microcontrôleur MSP 430.....	11
5.2.	Gyromètre pris du Wii-motion Plus .....	12
5.3.	Contrôleurs moteurs .....	12
5.4.	Caméra sans fil .....	13
6.	Puissance et commande de vol .....	15
6.1.	Télécommande et récepteur.....	15
6.2.	Contrôle du quadricoptère :.....	15
6.3.	Batterie.....	18
6.4.	Tera Term .....	18
6.4.1.	Calibration de l'appareil .....	19
6.4.2.	Fonctions existantes et utilisées.....	19
6.5.	Code Composer V4 .....	20
7.	Câblage de l'appareil .....	23
7.1.	Adaptation à faire sur la carte du contrôleur.....	23
7.2.	Adaptations à faire sur le gyromètre de la wiimote.....	24
7.3.	Modification des contrôleurs moteurs.....	24
7.4.	Explication des connections .....	25
7.5.	Signaux reçu et émis par le microcontrôleur .....	27
8.	Bancs de test couple « moteur-hélice » .....	28
8.1.	Banc à glissière et élastique .....	28
8.2.	Banc à balance.....	30
9.	Tests et mesures réalisés.....	32
9.1.	Premiers essais sur appareil monté .....	32
9.2.	Mesures effectuées à la sortie du microcontrôleur .....	33

9.2.1.	Durant la calibration.....	34
9.2.2.	Comportement du signal de sortie de la carte par rapport à la commande .....	34
9.2.3.	Vérification des comportements des moteurs.....	35
9.3.	Mesures des sorties contrôleurs moteurs.....	38
9.4.	Caractérisation des hélices.....	39
10.	Modifications du code .....	43
11.	Montage et essais réalisés.....	45
11.1.	Premiers essais de vol .....	45
11.2.	Deuxièmes essais de vol:.....	50
12.	Améliorations futures possibles .....	53
13.	Conclusion .....	54

## Table des illustrations

Figure 1 : 450 ARF Reely source : <a href="http://www.conrad.fr">http://www.conrad.fr</a> .....	2
Figure 2 : 650 ARF Reely source : <a href="http://www.conrad.fr">http://www.conrad.fr</a> .....	3
Figure 3 : A-R drone Parrot source : <a href="http://www.conrad.fr">http://www.conrad.fr</a> .....	4
Figure 4 : mouvement dans l'espace.....	5
Figure 5 : mécanique d'un rotor à pas variable source : <a href="http://forum.heli4.com">http://forum.heli4.com</a> .....	6
Figure 6 : principe de l'orientation angulaire du moteur .....	7
Figure 7 : principe des hélices contrarotatives source : <a href="http://www.rcgroups.com">http://www.rcgroups.com</a> .....	8
Figure 8 : Schéma bloc fonctionnement quadricoptère .....	9
Figure 9 : modélisation globale du quadricoptère .....	10
Figure 10 : carte microcontrôleur et adaptateur USB.....	11
Figure 11 : chip gyromètre Wii motion plus.....	12
Figure 12 : micro caméra et récepteur wifi.....	13
Figure 13 : câble de connexion vidéo-USB .....	14
Figure 14 : capture d'écran du signal vidéo .....	14
Figure 15 : rapport sortie télécommande et canal récepteur.....	15
Figure 16 : rapport télécommande, comportement en vol .....	17
Figure 17 : connexion à Tera Term.....	18
Figure 18 : IAR workbench et TI Code Composer .....	20
Figure 19 : interface de l'utilisateur code composer.....	20
Figure 20 : débogage programme .....	21
Figure 21 : configuration de la connexion de la carte .....	21
Figure 22 : envoi du programme .....	22
Figure 23 : modification de la carte MSP430 .....	23
Figure 24 : gyromètre Nintendo modifié .....	24
Figure 25 : connexion MSP430.....	25
Figure 26 : connexion gyromètre .....	25
Figure 27 : schéma de câblage global.....	26
Figure 28 : explication du PWM .....	27
Figure 29 : modélisation du banc à glissière .....	28
Figure 30 : statique du banc à glissière .....	29
Figure 31 : modélisation banc à balance.....	30
Figure 32 : statique complète du banc à balance .....	31
Figure 33 : statique simplifiée du banc à balance .....	31
Figure 34 : sortie en tension de la carte en fonction de la commande throttle: .....	35
Figure 35 : portance hélice 4x2.5 .....	39
Figure 36 : portance hélice 5x3 .....	40
Figure 37 : portance hélice 6x3 .....	41
Figure 38 : portance hélice 7x3.5 .....	42
Figure 39 : portance modifiée hélice 5x3.....	50
Figure 40 : amélioration carlingue avec tracé électronique .....	53

## Liste des tableaux

Tableau 1 : caractéristiques du 450 ARF Reely .....	2
Tableau 2 : caractéristiques du 650 ARF Reely .....	3
Tableau 3 : caractéristiques du A-R drone Parrot .....	4
Tableau 4 : rapport télécommande, comportement en vol .....	16
Tableau 5 : mesure de tension intégrée première carte seul <i>throttle</i> .....	33
Tableau 6 : mesure de tension intégrée seconde carte seul <i>throttle</i> .....	33
Tableau 7 : mesure de tension intégrée seconde carte seul <i>throttle</i> durant calibration .....	34
Tableau 8 : résultat comparaison des moteurs avec banc à glissière .....	36
Tableau 9 : correspondance passage trait/force hélice .....	37
Tableau 10 : résultat comparaison des moteurs avec banc à balance .....	37
Tableau 11 : résultats des tests des ESC.....	38
Tableau 12 : minimum et maximum des commandes [ticks] .....	43
Tableau 13 : modifications des valeurs palier extrêmes .....	43
Tableau 14 : effet des modifications de centre pulses.....	44

## 1. Introduction du sujet

La chaîne de développement des composants électroniques de plus en plus compacts, tout en restant fiables et efficaces, a fait apparaître des possibilités de conception de matériel électromécanique de très petite taille et pouvant être utilisé sans grande énergie. Ainsi, l'apparition sur le marché de capteurs, cartes de programmation, moteurs et systèmes électroniques pour **les** commander, produits en très grandes séries et donc très peu onéreux à l'achat, ont permis d'envisager la conception de produits jusqu'alors impossibles à réaliser à des prix abordables.

Utilisant l'entier de ces nouvelles miniaturisations de la technologie, une grande quantité de drones a été développée à des fins de divertissement ou d'observation. Alors que les premiers reprenaient simplement les mêmes principes que ceux qui avaient fait la gloire de leurs cousins à taille humaine, d'autres, comme les quadricoptères, ont tiré leur épingle du jeu en arborant des principes et des designs jusque-là encore inédits, qui sont devenus possibles par la réduction de la taille des appareils volants.

La simplicité mécanique de ces appareils, dont les déplacements qui sont assurés par de simples modifications relatives des régimes moteurs, ont permis de concevoir des appareils simples de montage et de compréhension de fonctionnement.

Dans cette optique, il nous est paru possible de créer notre propre quadricoptère pour mission d'observation, aidés pour la partie logicielle par des passionnés de l'informatique, à partir d'éléments de modélisme du commerce et de pièces esthétiques conçues par nos soins.

Les caractéristiques de ce type de drones sont intéressantes dans plusieurs domaines. En plus d'activités récréatives, la possibilité d'y ajouter facilement des fonctions supplémentaires peuvent en faire des outils professionnels, dans la surveillance de manifestations par exemple. C'est pourquoi il a été décidé de positionner, en plus de l'électronique nécessaire au vol de l'appareil, une caméra sans fil qui allie à la fois la légèreté et les caractéristiques optiques et vidéo minimale pour être utile.

## 2. Modèles principaux disponibles sur le commerce

Il existe sur le marché une certaine quantité de quadricoptères. Les trois modèles les plus vendus en Europe sont les suivants :

### *450 ARF Reely*



Figure 1 : 450 ARF Reely source : <http://www.conrad.fr>

Caractéristiques	
Désignation complète	Reely QuadroCopter 450 ARF
Diamètre des rotors	260 [mm]
Masse	670 [g]
Masse transportable	500 [g]
Dimensions	450x450x
Capteurs	Gyroscope et accéléromètre
Nombre de processeurs	2
Commande	Télécommande 4 canaux
Options supplémentaires	Éclairage des pieds par LED colorées
Prix	300-350 € suivant les versions

Tableau 1 : caractéristiques du 450 ARF Reely

Ce premier appareil se caractérise par un design ultra futuriste et des options esthétiques abordables et utiles telles qu'une coque externe supplémentaire pour la protection des hélices et l'éclairage coloré des pieds afin de pouvoir reconnaître l'avant de l'appareil, même lors d'un vol de nuit.

## 650 ARF Reely



Figure 2 : 650 ARF Reely source : <http://www.conrad.fr>

Caractéristiques	
Désignation complète	Reely QuadroCopter 650 ARF
Diamètre des rotors	305 [mm]
Masse	880 [g]
Masse transportable	2000 [g]
Dimension	650x650x285 [mm]
Capteurs	Gyroscope et accéléromètre
Nombre de processeurs	2
Commande	Télécommande 4 canaux
particularité	aucune
Prix	500 €

Tableau 2 : caractéristiques du 650 ARF Reely

Le 650 RAF est l'un des plus gros quadricoptères du marché grand public. Sa capacité au transport de matériel peut aller jusqu'à deux kilos et ouvre des perspectives intéressantes pour les professionnels du spectacle. Il devient en effet possible de survoler la foule avec un matériel vidéo de bonne qualité dans les environnements ouverts. Il demeure néanmoins assez encombrant et très cher à l'achat, surtout lorsqu'on sait que le prix de vente donné ne prend pas en compte la commande de l'appareil, ni des batteries rechargeable, également en option.

*A-R drone Parrot*



Figure 3 : A-R drone Parrot source : <http://www.conrad.fr>

Caractéristiques	
Désignation complète	Reely QuadroCopter 650 ARF
Diamètre des rotors	305 [mm]
Masse	420 [g]
Masse transportable	Pas prévu
Dimension	525x515x ?? [mm]
Capteurs	Accéléromètre 3axes Gyroscope MEMS XY Gyroscope MEMS Z
Nombre de processeurs	inconnu
Commande	IPhone, Ipod touch, Ipad
particularités	Blocage hélice en cas de choc Deux caméras embarquées (frontale et verticale)
Prix	300-350€ (avec ou sans arceaux sécurité)

Tableau 3 : caractéristiques du A-R drone Parrot

Cet appareil a fait énormément parler de lui lors de sa sortie. En effet, aucune connaissance en commande de drone ou en modélisme n'est réellement nécessaire pour le faire fonctionner correctement. Les nombreux capteurs présents dans l'appareil et le logiciel très performants lui permettent un vol complètement autonome en mode stationnaire.

Développé en parallèle à une application Apple, il est dès lors plus destiné à des clients qui possèdent déjà un appareil de la marque et intéressés par les gadgets, plus qu'à des amateurs ou à des professionnels de modélisme.

### 3. Dynamique de vol des quadricoptères

#### 3.1. Déplacements dans l'espace et termes techniques

Note : Afin de simplifier la visualisation dans l'espace des différents mouvements, un schéma d'avion est représenté. Il en va de même pour un hélicoptère ou un quadricoptère.

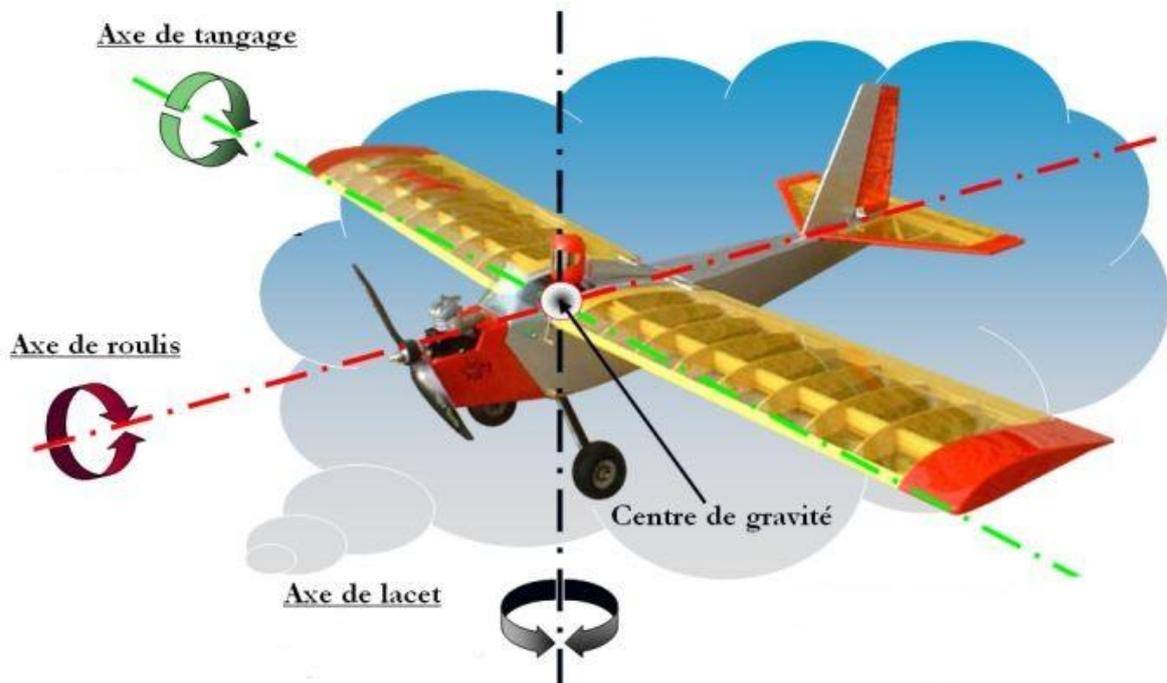


Figure 4 : mouvement dans l'espace

Comme il est possible de le voir sur la figure précédente, les trois axes principaux de rotation dans l'espace, autour desquels va tourner notre appareil, portent des noms particuliers qu'il est nécessaire de parfaitement maîtriser afin de comprendre le programme. En effet, toute la codification des mouvements est faite via ces termes.

De plus, comme le programme est fait en anglais, les termes sont transposés de la manière suivante :

roll	roulis
pitch	tangage
yaw	lacet

Sur les hélicoptères, le signal régissant la force verticale des pales est défini comme "*throttle*". Une valeur forte de ce signal ayant pour conséquence une montée rapide de l'appareil et une valeur minimale sa chute libre.

## 3.2. Différences avec les hélicoptères usuels

### *Gestion de la position verticale :*

Contrairement aux hélicoptères de taille normale ou de modélisme avancé, qui s'appuient sur un rotor principal à pas variable commandé mécaniquement afin de changer la portance des pales, les mini-quadricoptères utilisent quatre hélices à pas fixe commandées indépendamment. La modification de leur portance est assurée uniquement par changement de la vitesse de rotation.

La possibilité d'utiliser ce système beaucoup plus simple sur les modèles à taille réduite est due à la très faible inertie des hélices et de l'ensemble de l'appareil en mouvement. Il est alors possible de faire accélérer et ralentir rapidement angulairement les hélices en régulant le moteur et d'avoir un temps de réaction de l'appareil tout à fait satisfaisant.



Figure 5 : mécanique d'un rotor à pas variable source : <http://forum.heli4.com>

### *Déplacement dans le plan horizontal*

Comme il est également possible de le voir sur la figure 5, le déplacement des hélicoptères habituels dans le plan horizontal est assuré par un contrôle mécanique de l'inclinaison des pales du rotor principal. Ainsi, pour aller vers l'avant, l'appareil force les pales à adopter une inclinaison différente, et donc une plus grande portance, lorsque celle-ci passe à l'arrière de l'appareil tout en diminuant la portance, lorsqu'elle passe dans la partie avant. Ceci a pour effet de faire pencher l'appareil vers l'avant et par extension de le faire avancer. Le même principe est utilisé pour le déplacement vers la gauche, la droite et l'arrière, en faisant changer la position de portance maximale des pales.

Sur les quadricoptères, il est possible de faire des déplacements tant vers l'avant que latéralement selon le même principe. En forçant l'hélice située du côté où l'on veut se déplacer, à ralentir tout en faisant accélérer celle située du côté opposé, on crée un déséquilibre qui entraîne l'appareil dans la direction souhaitée. Les déplacements latéraux sont donc aussi faciles à gérer que les mouvements frontaux.

### 3.3. Compensation du couple de réaction

Tout comme sur les hélicoptères de tailles supérieures, un couple de réaction est créé sur le quadricoptère par chaque hélice, tendant l'appareil à tourner dans le sens inverse de rotation des hélices. Ce couple est compensé sur les hélicoptères de taille habituelle par un rotor de queue, qui en augmente également la maniabilité. De plus grands hélicoptères comportent deux hélices horizontales tournant en sens inverse, ce qui permet l'annulation de ce couple.

Sur les quadricoptères, ces deux moyens de contre-réaction sont également présents sous les formes suivantes :

#### *Orientation angulaire de deux hélices opposées*

En orientant deux hélices opposées avec un léger angle on crée une composante horizontale de la portée, ce qui entraîne un couple dans le sens voulu et compense donc le couple de réaction. Le problème est que le réglage de cet angle est assez délicat et dépend de chaque type d'hélice utilisé. Ceci peut entraîner une grande perte de temps en réglages minutieux.

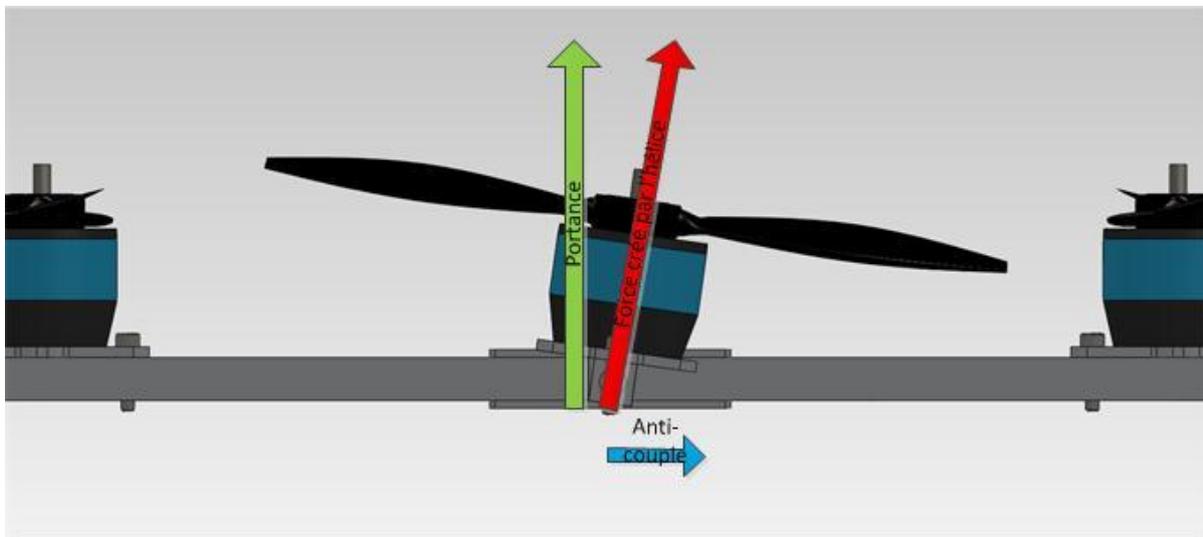


Figure 6 : principe de l'orientation angulaire du moteur

#### *Deux paires d'hélice en contre-rotation*

La seconde possibilité est de faire tourner une paire d'hélices opposées dans le sens horaire, et l'autre dans le sens antihoraire. Les couples créés s'annulent donc pour autant que les deux paires d'hélices aient des caractéristiques identiques. Dans le cas contraire, un couple résiduel apparaît et peut être compensé directement dans le programme.

Cette solution à l'avantage de permettre à la fois une conception plus simple de l'appareil, les quatre moteurs étant verticaux, et de pouvoir exploiter pleinement les capacités de portance des hélices. Le changement de sens de rotation des moteurs est assuré par un simple croisement de deux phases de sortie du contrôleur, le cycle alors inversé sur les bobines qui ont cette conséquence directe.

Le seul bémol apporté par cette solution vient de l'obligation d'obtenir des paires d'hélices identiques mais possédant une fois un pas à gauche et une fois un pas à droite, ce qui pourrait en cas d'utilisation d'hélices très spéciales, entraîner des coûts supplémentaires voire même l'impossibilité de commander des pièces standardisées.

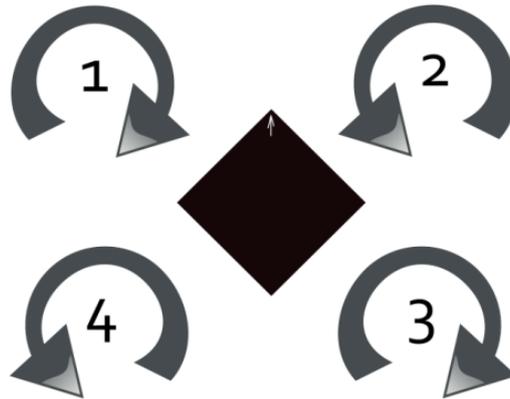


Figure 7 : principe des hélices contrarotatives source : <http://www.rcgroups.com>

### *Rotation autour de son axe*

Si on veut effectuer une rotation autour de l'axe du rotor principal avec un appareil usuel, il est nécessaire de gérer la vitesse de rotation du rotor de queue. Si le couple de compensation (cf. chapitre 3.2) était trop important ou trop faible, l'appareil se retrouverait à tourner autour de l'axe du rotor principal.

Pour ce type de déplacement, le quadricoptère perd un peu de sa simplicité face aux appareils classiques. Il faut en effet gérer les régimes des quatre moteurs simultanément afin de conserver une portance idéale. Deux moteurs doivent ralentir alors que les deux autres doivent accélérer et ce, quel que soit le mode de compensation choisi.

## 4. Conception modèle douze pouces.

Afin de pouvoir au mieux designer l'appareil, il est d'abord nécessaire de faire un schéma bloc des différents composants qui doivent y être insérés. Une fois seulement ce schéma accompli, la structure d'accueil des différents composants a pu être conçue.

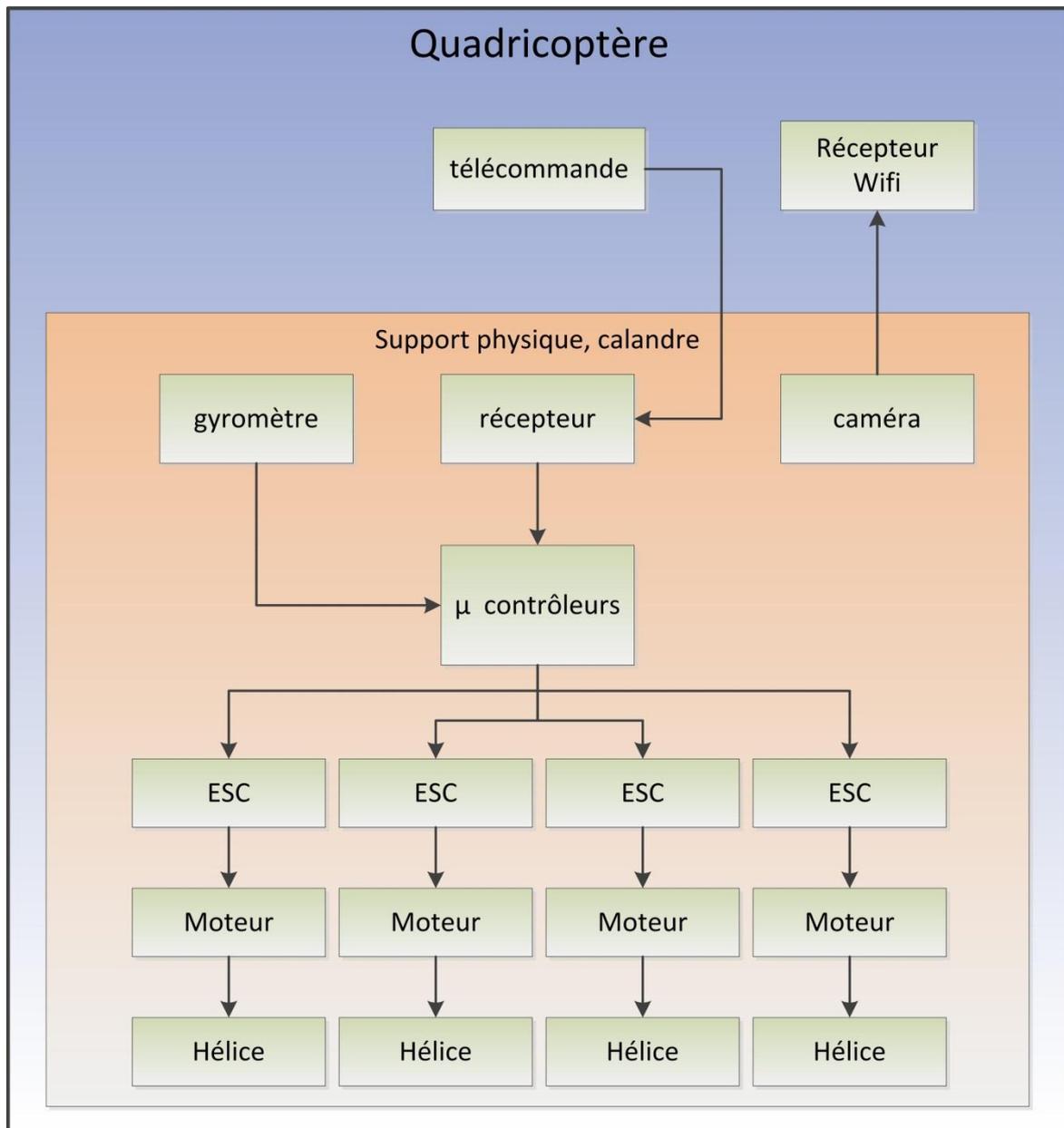


Figure 8 : Schéma bloc fonctionnement quadricoptère

ESC = Electronic Speed Controller (pour moteur brushless)

Une fois ces différents éléments pris en compte et leurs dimensions et masses connues, au minimum approximativement, il est possible de partir sur la conception de la carcasse de l'appareil qui doit supporter les différents efforts engendrés par l'appareil.

Le choix de design du modèle 12 pouces est alors porté sur une conception du cadre usiné dans des plaques en résine pour circuit imprimé. Ce matériau de type résine époxy est en effet à la fois léger et suffisamment résistant pour la totalité des contraintes naturelles que le quadricoptère va devoir subir. De plus, il est facilement usinable et trouvable sur le commerce.

Ainsi, deux pièces taillées dans ces plaques forment chacune des quatre pattes du quadricoptère. Cette configuration ouvre la possibilité de ranger les différents câbles entre les deux parties du pied et d'assurer une bonne immobilisation de ceux-ci. Dans une approche plus approfondie de l'appareil, il est également possible de s'affranchir du poids des câbles des commandes de moteur en traçant directement des pistes dans les pièces du carénage.

Les plaques centrales, destinées à accueillir l'entier de l'électronique, sont faites en POM, ce qui garantit une masse minimale et une rigidité suffisante à relativement faible coût. La bonne usinabilité de ce matériau autorise également de procéder à de multiples ouvertures dans les plaques, non seulement dans l'optique d'un gain de masse, mais également pour pouvoir faire passer un maximum de film à l'intérieur de l'appareil.

D'après les premières estimations de masse avec ce nouveau design, l'appareil devrait peser environ 270 g avec la batterie, ce qui demeure acceptable pour un appareil de cette dimension.

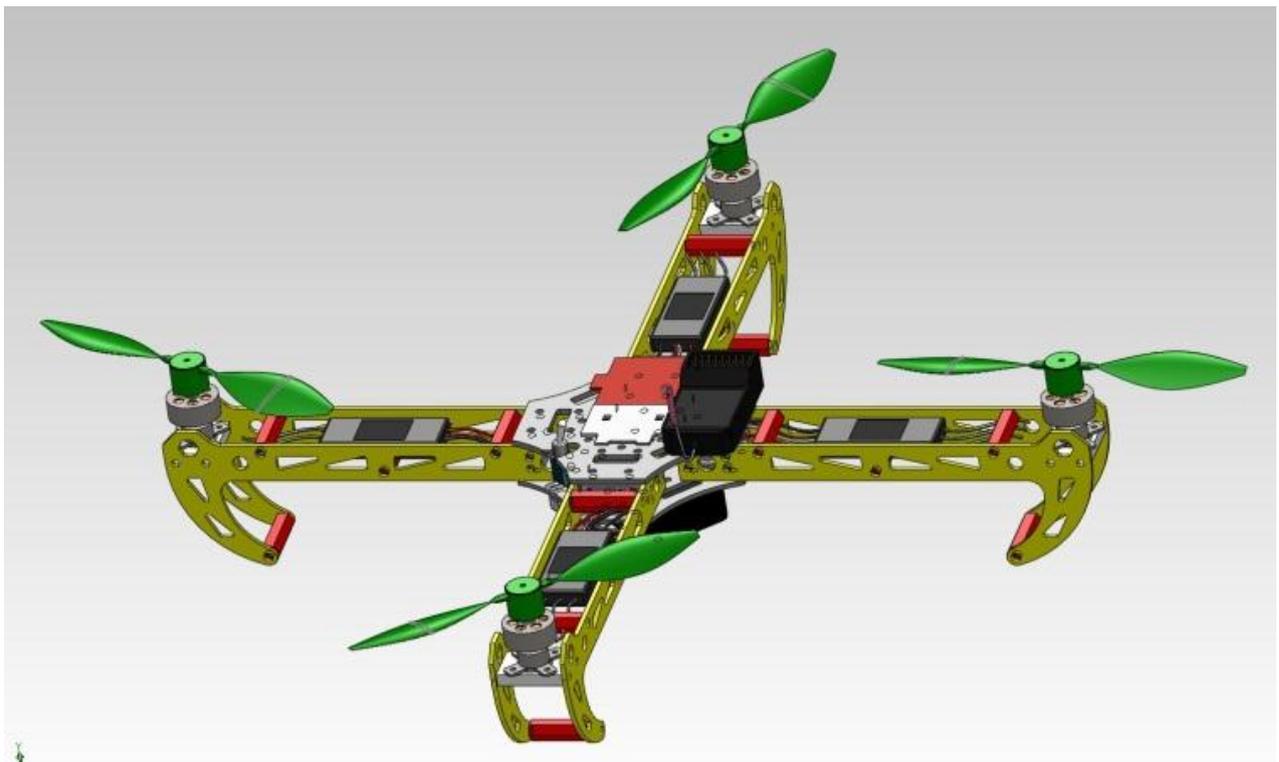


Figure 9 : modélisation globale du quadricoptère

## 5. Electronique embarquée et interfaces

L'entier de l'électronique embarquée du quadricoptère sont des composants facilement trouvables dans le commerce de programmation ou du modélisme et ce, afin de donner la possibilité à tout un chacun de pouvoir fabriquer et utiliser son propre modèle en s'appuyant sur les mêmes bases, sans que cela ne lui coûte beaucoup plus cher qu'un modèle du marché.

### 5.1. Carte microcontrôleur MSP 430

La carte de programmation choisie est la "eZ430-RF2500" de Texas instrument. Cette carte a la caractéristique de posséder un microcontrôleur de type MSP430F2274 qui est facilement programmable grâce à un adaptateur USB fourni.

Une antenne radio, disponible directement sur la carte réceptrice et gérée par la puce CC2500, pourrait également permettre d'économiser le récepteur radio auxiliaire livré avec la télécommande. Ceci permettrait un câblage légèrement simplifié, ainsi qu'un léger gain de masse globale de l'appareil.

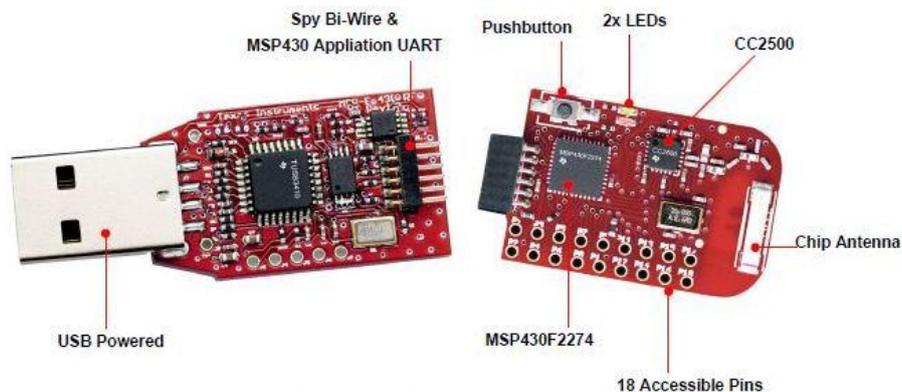


Figure 1. eZ430-RF2500

Figure 10 : carte microcontrôleur et adaptateur USB

Les LEDs verte et rouge situées sur la carte, permettent de vérifier le bon fonctionnement lors du transfert de programme, de la calibration et de l'allumage durant la calibration rapide de l'appareil.

Caractéristiques du microcontrôleur :

- 21 ports de développement disponibles
- Sortie en tension : 3.3 V
- Fréquence maximum opérationnelle : 16 Mhz
- Consommation maximale en mode actif : 390  $\mu$ A
- Gamme de température d'utilisation : -40°C à 85°C
- Alimentation supportée : de 1.8V à 3.6V

Caractéristique de la carte d'émission radio :

- Alimentation supportée : de 1.8 à 3.6V
- Consommation maximale de courant : 22mA
- Gamme de fréquence radio : de 2400 à 2483.5 Mhz
- Vitesse de transmission des données : de 1.2 à 500 kbps (programmable)

## 5.2. Gyromètre pris du Wii-motion Plus

La seconde génération des manettes de jeu associées à la console Wii de Nintendo a vu apparaître un composant très intéressant pour notre application ; un chip contenant un gyromètre trois axes. Ce composant prêt à être utilisé peut être acheté au détail chez différents fournisseurs et est relativement robuste.

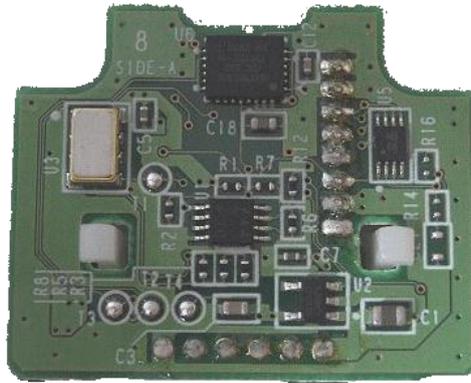


Figure 11 : chip gyromètre Wii motion plus

Contrairement à un gyroscope qui permet de connaître en tout temps la position angulaire autour de différents axes, le gyromètre permet de mesurer la vitesse de déplacement angulaire autour de ces axes. Cette particularité fait que si la stabilisation de l'appareil n'est pas assez rapide, la position angulaire de l'appareil risque de changer avec le temps et les différentes rotations et corrections effectuées. L'idéal serait alors d'intégrer ce signal afin de connaître la position angulaire de l'appareil en tout temps.

## 5.3. Contrôleurs moteurs

À l'instar des moteurs à courant continu qui ne nécessitent qu'une mise sous tension basique pour être opérationnels, les moteurs brushless nécessitent la maîtrise d'un signal de commande plus compliqué afin de générer un flux magnétique tournant à la bonne fréquence. Ce signal est créé entre les différentes bobines placées à l'intérieur du stator, en changeant la polarité des bobines. Il est possible d'attirer ou de repousser les aimants du rotor pour le faire passer en rotation.

La tension générée entre les phases est périodique. Son intensité ne varie pas avec la commande mais seule sa fréquence est modifiée afin de créer un champ tournant plus ou moins rapide et, par conséquent, la modification de la vitesse du moteur.

Durant la phase de calibration, le contrôleur moteur ou ESC (Electronic Speed Controller) demande le maximum du signal qu'il va recevoir ainsi que le minimum. Cela permet de générer l'entier des fréquences de rotation du moteur et ce, quelles que soient les télécommandes et programmes utilisés. Il est donc inutile de ne pas utiliser l'entier de la plage de la commande durant la calibration. Une sortie de cette plage n'ayant aucune influence sur l'évolution du comportement du moteur qui plafonne au maximum calibré.

## 5.4. Caméra sans fil

Dans l'optique de notre utilisation de cet appareil, une caméra sans fil fonctionnant sur wifi doit être ajoutée à l'appareil. Celle-ci doit pouvoir de préférence être alimentée directement par la batterie de l'appareil et être la plus légère possible pour ne pas trop augmenter la masse à transporter. De plus, une consommation de courant minimale est souhaitable pour ne pas faire baisser de trop l'autonomie de l'appareil et la portée de transmission doit être acceptable.

Au vu de tous ces éléments, la caméra suivante a été sélectionnée.



Figure 12 : micro caméra et récepteur wifi.

Descriptif :

- Micro caméra sans fil
- Capteur photographique CMOS
- Objectif "pinhole"
- Encombrement 20x20mm
- Puissance 10 mW
- Alimentation recommandée 8V
- Consommation électrique 80 mA
- Transmission 2.4GhZ
- Image 380 lignes

La portée de transmission donnée par le fabricant est de 100m maximum sans obstacles ni interférences. Dans le cas d'une utilisation en intérieur sans obstacle et peu d'interférences, la portée constatée est d'environ 25m. Le réseau wifi de l'école utilisant la même bande de fréquences, l'utilisation de cette caméra dans un des couloirs étroits en béton et acier comportant les routeurs wifi de l'étage entier, celle-ci descend à moins de deux mètres. En extérieur par contre la portée constatée dépasse effectivement les 50 mètres sans difficulté ce qui est suffisant pour notre application.

Sur les batteries à disposition, la caméra aurait une autonomie de 10heures. L'appareil en fonctionnement ayant une autonomie d'une vingtaine de minutes, la caméra ne réduit que de peu le temps de fonctionnement global du système.

### *Réception de la vidéo*

Afin de pouvoir recevoir la vidéo directement sur un ordinateur portable ne possédant pas de prise vidéo, il est nécessaire d'acquérir en plus un câble de conversion du signal, passant du format vidéo classique à des informations relayées par USB.



Figure 13 : câble de connexion vidéo-USB

Ce câble est fourni avec le logiciel associé GrabBee, permettant la lecture des informations vidéo en direct, leurs enregistrements et la capture d'images instantanées. Le câble est par contre incapable d'acquérir correctement le son de la caméra. Ceci ne pose pas de problème dans l'application au quadricoptère, le bruit des hélices étant de toute façon très important dans l'entourage direct de la caméra. La qualité de l'image, lorsque celle-ci n'est pas perturbée par les réseaux environnants ou des obstacles importants, est tout à fait suffisante pour des observations à une dizaine de mètres aux alentours.



Figure 14 : capture d'écran du signal vidéo

## 6. Puissance et commande de vol

### 6.1. Télécommande et récepteur

La commande utilisée est une commande classique 6 canaux fonctionnant avec des fréquences d'environ 2.4 GHz. Elle peut permettre la gestion de 6 moteurs simultanément, quatre par l'intermédiaire des sticks directionnels et deux via les potentiomètres. Dans notre application, nous utilisons cinq sorties : les quatre premières étant pour les informations directes du control de vol et la cinquième permet de régler le gain du signal du gyromètre.

L'utilisation de la même bande de fréquence que la caméra et les réseaux avoisinants ne posent par contre pas de problème pour l'utilisation de cette commande, car la calibration de ces fréquences est bien plus précise que celle requise pour la caméra de par l'importance de gestion de signaux différents dans tous les cas de vol.

### 6.2. Contrôle du quadricoptère :

#### *Correspondance télécommande-récepteur*

Actuellement, le contrôle de l'appareil se fait par l'intermédiaire du récepteur radio associé à la télécommande et indépendant du microcontrôleur. Ce récepteur reçoit les informations selon les correspondances suivantes :

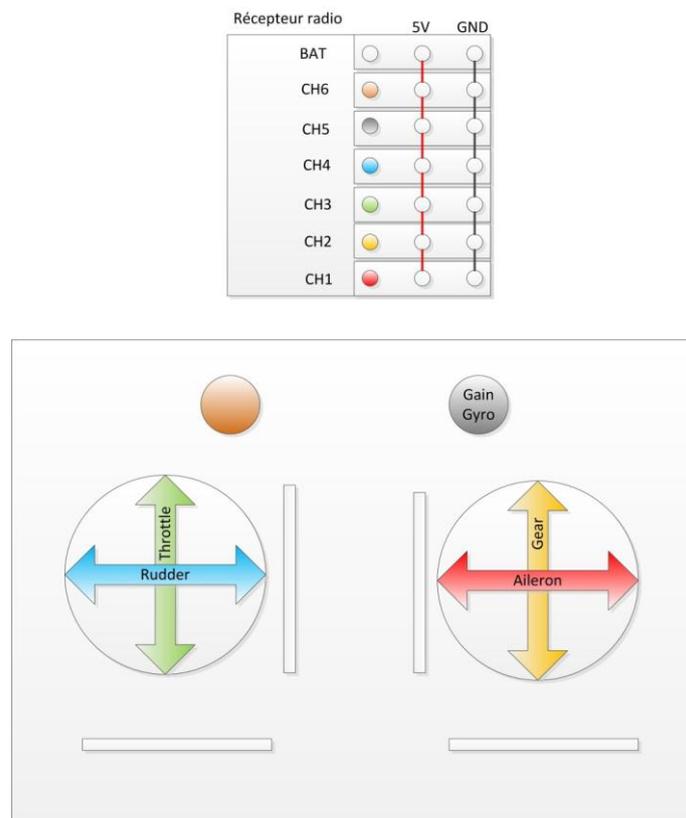


Figure 15 : rapport sortie télécommande et canal récepteur

### Correspondance télécommande-quadricoptère

Les réactions du quadricoptère aux différentes commandes sont les suivantes :

Commande		Réactions moteurs	Comportement appareil
Stick gauche	Gauche	Moteurs gauche et droite ralentissent Moteurs avant et arrière accélèrent	L'appareil tourne dans le sens horaire
	Droite	Moteurs gauche et droite accélèrent Moteurs avant et arrière ralentissent	L'appareil tourne dans le sens antihoraire
	Haut	Tous les moteurs accélèrent	Augmentation de la portance (monte, accélère la montée)
	Bas	Tous les moteurs ralentissent	Diminution de la portance (descend, accélère la descente)
Stick droite	Gauche	Moteur droite accélère Moteur gauche ralentit	Penche vers la gauche, se déplace à gauche
	Droite	Moteur droite ralentit Moteur gauche accélère	Penche vers la droite, se déplace à droite
	Haut	Moteur arrière accélère Moteur avant ralentit	Penche vers l'avant, avance
	Bas	Moteur avant accélère Moteur arrière ralentit	Penche vers l'arrière, recule
bouton droite (gris)	potentiomètre	aucun	Gain réaction variation d'angle en proportion du potentiomètre
Bouton gauche (brun)	potentiomètre	aucun	aucun

Tableau 4 : rapport télécommande, comportement en vol

Note : pour que les comportements pour la rotation autour de son axe soient conservés, il faut monter les hélices à pas à droite sur les moteurs gauche et droite et celles à pas à gauche sur les moteurs avant et arrière.

Les comportements détaillés dans le tableau précédent sont illustrés dans le schéma suivant :

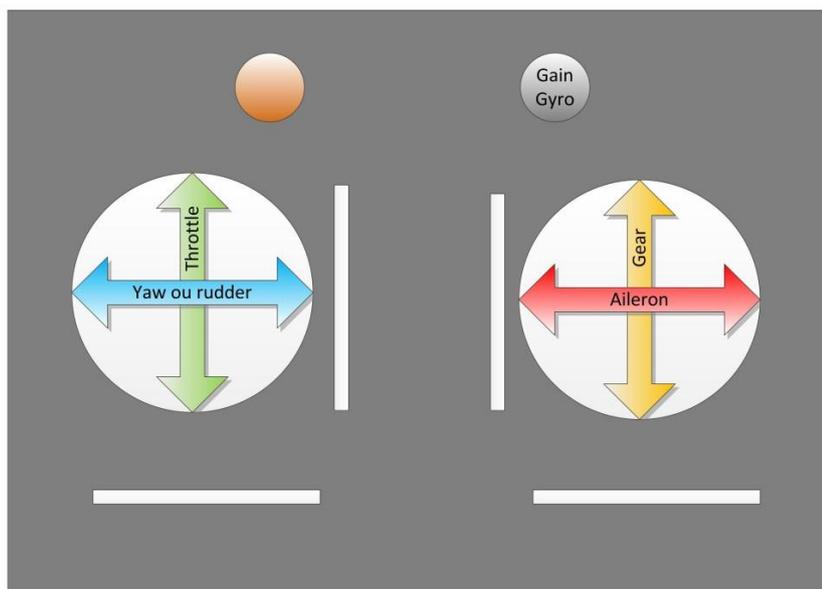
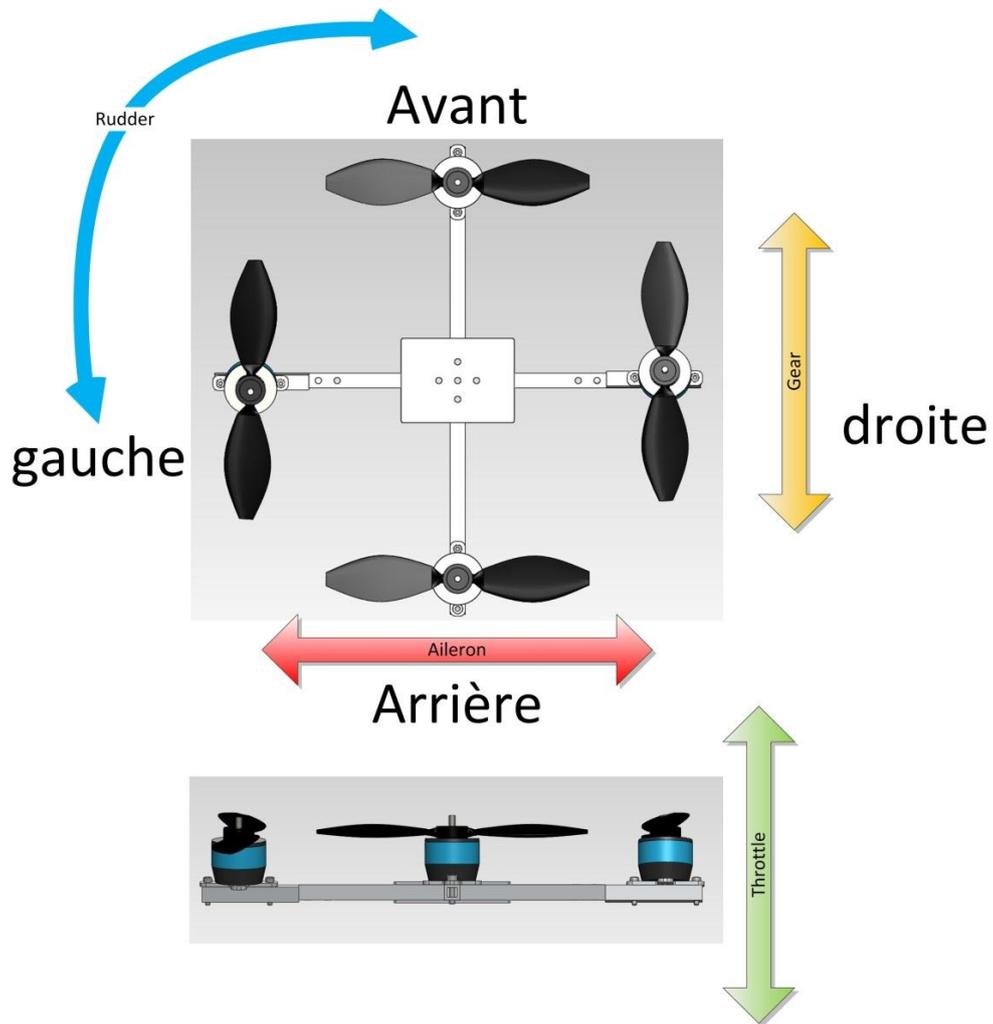


Figure 16 : rapport télécommande, comportement en vol

### 6.3. Batterie

La batterie utilisée est une batterie deux cellules Litium-Polymère d'une capacité de 800mAh et possédant une tension de sortie de 7.4 [V]. Ce type de batterie a comme caractéristique de pouvoir conserver une grande énergie tout en ayant une tension de sortie plus élevée et une masse plus faible que les autres technologies. Leur défaut principal est leur dangerosité. En effet, dans le cas d'un court-circuit, la batterie ne se contente pas de se décharger, mais a de forts risques de combustion. Il est alors indispensable d'être attentif à cela et d'être présent tout au long des cycles de charge et décharge des batteries. Le plus sûr est de mettre un sucre afin de séparer définitivement les deux pôles de la batterie.

### 6.4. Tera Term

Tera Term est un logiciel de simulation de terminal. Il permet l'échange d'informations via des ports séries simulés ou existants et une fenêtre de commande classique. Dans notre cas, cet échange se fait par une connexion USB. Lors du démarrage du programme, le type de connexion est directement demandé dans la fenêtre suivante :

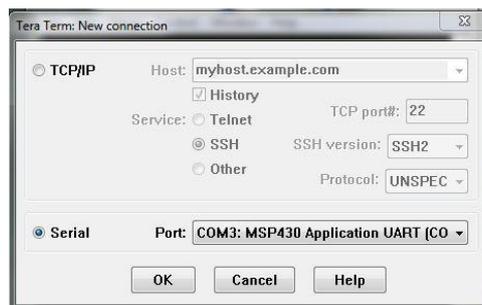


Figure 17 : connexion à Tera Term

Au vu de l'utilisation d'une carte connectée sur clef USB, la connexion série sera activée et il sera possible de la sélectionner. Si tel n'est pas le cas, il est nécessaire de quitter le logiciel, de débrancher et rebrancher la carte de programmation et de relancer le logiciel. Si le programme Code composer est ouvert, la possibilité de connexion sera présente mais ne parviendra pas à se faire. Il faudra donc quitter Code Composer.

Une fois la connexion établie, il est possible que les instructions données par l'utilisateur ne s'affichent pas dans la fenêtre de commande. Dans ce cas, il faut ouvrir le menu control -> terminal puis cocher l'option "local echo". Si cette manipulation est faite à chaque démarrage, il se peut que les instructions tapées par l'utilisateur s'affichent à double. Cela ne compromet en rien l'utilisation du logiciel ni la validité des commandes données, mais il serait préférable dans un souci de confort de supprimer l'option du "local echo".

Remarque : toutes les touches sont considérées par le logiciel comme faisant partie d'une instruction. En cas d'erreur de frappe et de suppression d'un caractère, la commande ne sera donc pas reconnue.

Dans notre cas, l'utilisation de ce logiciel est principalement faite lors de la calibration de l'appareil, qui s'effectue selon la marche à suivre expliquée ci-après.

#### 6.4.1. Calibration de l'appareil

- 1) Enlever les hélices de l'appareil pour des raisons de sécurité
- 2) Allumer la télécommande, le quadricoptère et Tera Term
- 3) Connecter la clef de programmation à la carte du contrôleur
- 4) Taper "cal\_on" et enter dans Tera Term (la LED verte devrait clignoter)
- 5) Taper "save" et enter
- 6) Enlever la clef de programmation et éteindre l'appareil
- 7) Mettre le *throttle* au maximum sur la télécommande
- 8) Allumer l'appareil. Les moteurs ne sont pas censés tourner
- 9) Attendre que les contrôleurs des moteurs fassent 2 BIP
- 10) Descendre le *throttle* sur la position la plus basse
- 11) Attendre d'entendre 2 BIP courts et un long.
- 12) Connecter la clef de programmation à la carte du contrôleur
- 13) Taper les commandes "cal\_off" enter, "save" enter.

#### 6.4.2. Fonctions existantes et utilisées

Les fonctions de contrôle et de calibration se trouvent dans le programme "cmd.c" et sont résumées ci-dessous :

Nom	Fonction
get_pulse (ou gp)	montre les différentes informations relatives au capteur et aux commandes des moteurs
cal_on	enclenche le mode de calibration de l'appareil
cal_off	déclenche le mode de calibration
arm	initialisation temporelle de l'appareil
save	sauve les différentes modifications effectuées dans la mémoire flash, nécessaire également lors de consignes de début et de fin de calibration
clear	remplace les valeurs des statistiques par des valeurs remplacées immédiatement lors de la remise en fonction de l'appareil. (Valeurs maximales possibles sur les minimums et vice-versa)

## 6.5. Code Composer V4

Habituellement, pour la programmation des MSP430, le logiciel d'IAR, IAR Embedded Workbench était utilisé et maîtrisé. Malheureusement, la version d'évaluation comportant une limite de la taille du code à 4 KB ne nous permet pas de l'utiliser dans cette application, le code étant légèrement plus important que cela. Dans un premier temps, une version complète d'évaluation du logiciel a été utilisée, mais les licences n'étant valables qu'un mois et impossible à renouveler et l'achat d'une licence globale beaucoup trop onéreuse, il a été nécessaire de trouver une autre solution.

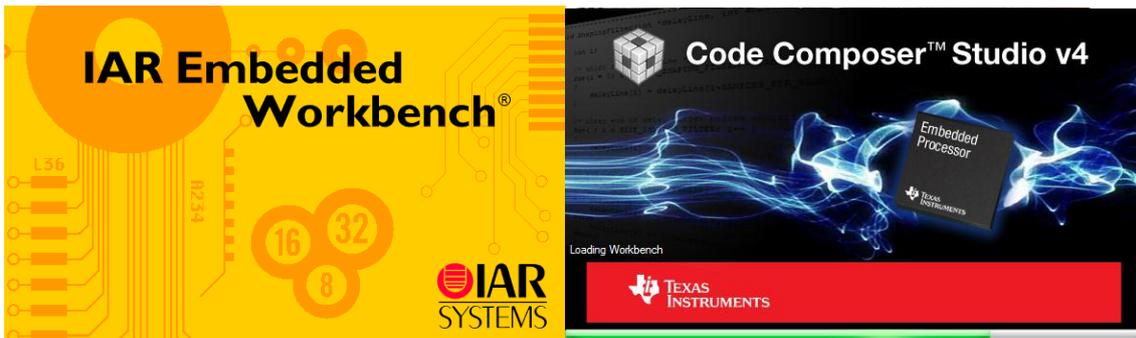


Figure 18 : IAR workbench et TI Code Composer

Il a donc été décidé d'utiliser le logiciel gratuitement fourni par Texas Instrument : Code Composer. Cette version du logiciel, bien qu'étant également une version d'évaluation, comporte une limite à la taille du code de 16 KB, ce qui est tout à fait suffisant dans notre application.

### Utilisation du logiciel :

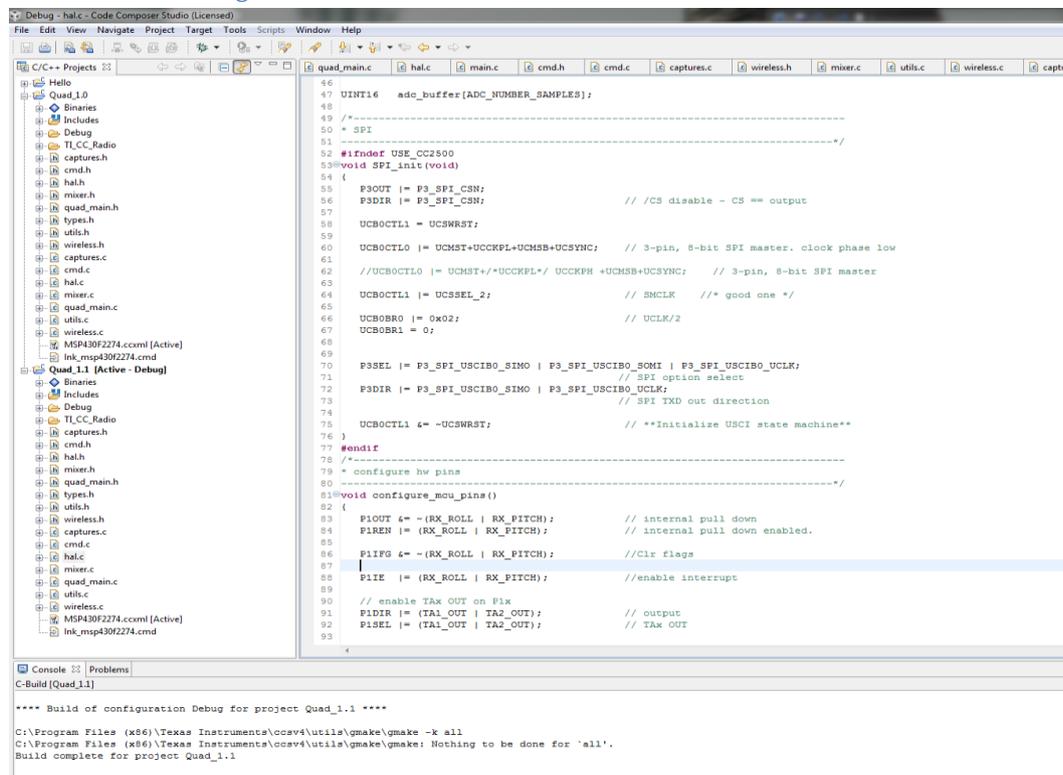


Figure 19 : interface de l'utilisateur code composer

L'interface d'utilisation de Code Composer se rapproche beaucoup de celle d'IAR Workbench. La transition entre ces deux logiciels est donc relativement aisée. Les différents projets en cours sont

résumés dans la partie gauche de l'écran, alors que la totalité de la partie droite est vouée à la gestion du code. Les informations disponibles en bas de la fenêtre concernent les éventuels bugs du code ou les différentes données de taille et avertissements programmés dans le code.

Pour vérifier la bonne mise en forme du code (débogage), il faut simplement aller dans l'onglet project -> rebuild active project.

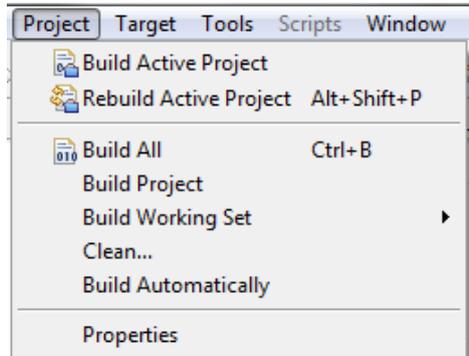


Figure 20 : débogage programme

L'envoi du projet sur la carte se déroule de la manière suivante : tout d'abord, il est nécessaire de configurer la cible vers laquelle le programme sera envoyé. Pour se faire, il faut aller dans l'onglet "Target -> New Target Configuration" ce qui donne la fenêtre suivante qu'il faut paramétrer comme montré.

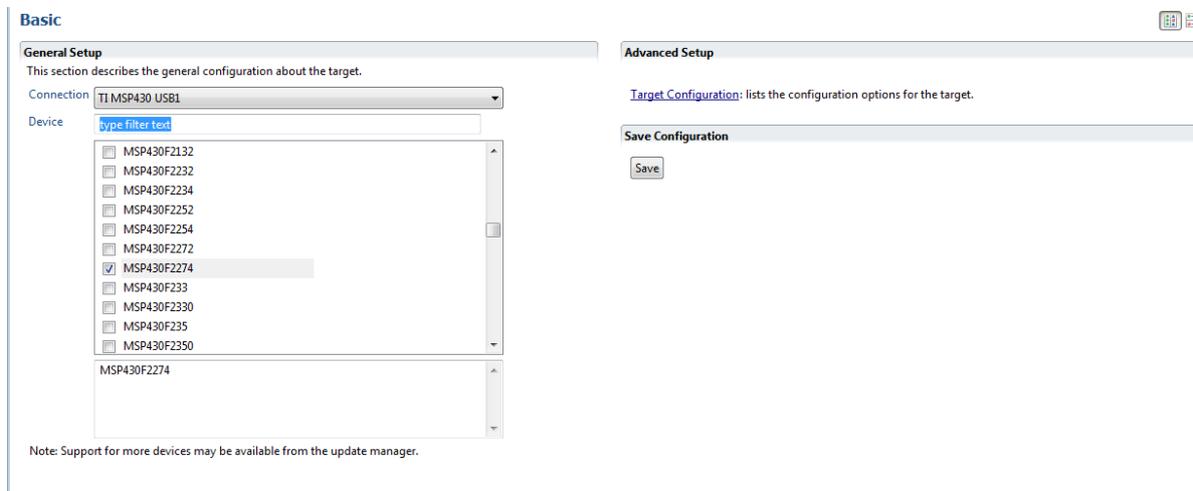


Figure 21 : configuration de la connexion de la carte

Cette configuration est indispensable au bon déroulement de l'envoi du programme. En effet, lors de l'envoi, le logiciel détecte le genre de carte à laquelle il est connecté et refuse l'envoi d'informations si la cible n'est pas correctement paramétrée.

De plus, le programme a besoin que l'on modifie les fichiers ".h" et ".cmd" propres à ce type de carte de commande et microcontrôleur. Pour se faire, il suffit de suivre la démarche suivante :

- Aller dans C:\Program Files (x86)\Texas Instruments\ccsv4\msp430\include
- Copier les fichiers msp430x22x4.h et msp430x22x4.cmd
- Coller les copies dans le même dossier et les renommer msp430F2274.h et .cmd

Le logiciel devrait alors reconnaître les fichiers et permettre le transfert de données.

Une fois cette configuration enregistrée, pour envoyer le programme sur le microcontrôleur, il faut connecter la carte au raccord USB, puis aller dans l'onglet Target -> Debug Active Project. Une fenêtre de contrôle expliquant les différentes étapes de chargement du programme s'ouvre alors. Une fois le chargement terminé, les informations de taille du programme et des données envoyées sont inscrites en bas de l'interface du programme.

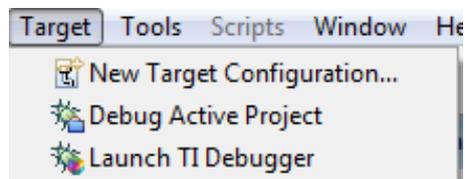


Figure 22 : envoi du programme

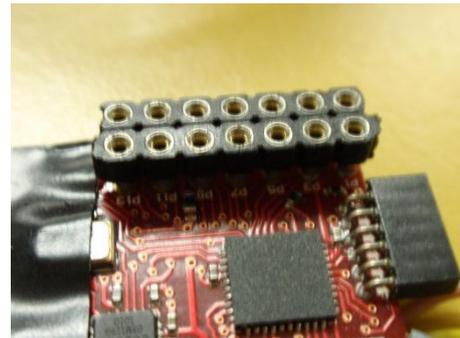
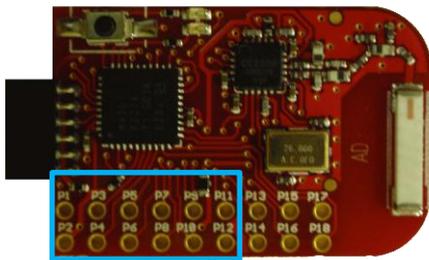
Une fois le programme chargé, il est nécessaire de déconnecter la carte de son alimentation, puis de la réalimenter afin que le programme se lance directement. La carte étant sinon en mode de réception de données.

## 7. Câblage de l'appareil

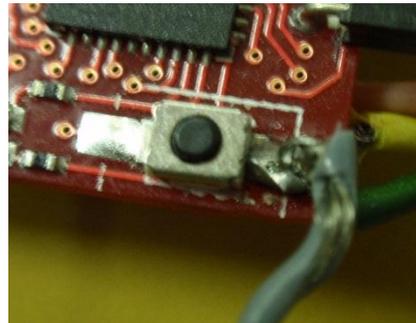
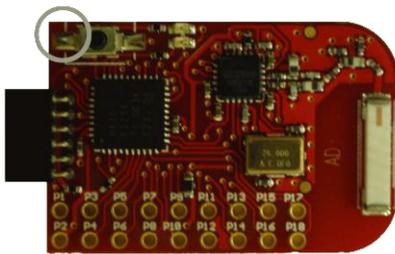
L'entier du câblage de l'appareil est prévu à la fois pour ne pas avoir de câbles pouvant se déconnecter aux deux extrémités, et ne pas avoir de composants reliés de façon permanente par des fils soudés aux deux extrémités, dans le but de pouvoir changer un composant défectueux sans avoir à dessouder des composants.

### 7.1. Adaptation à faire sur la carte du contrôleur

- 1) Ajout d'un bloc de connexion femelle sur les ports P1-P10



- 2) Brasure d'un câble sur la connexion du bouton - cf. figures



- 3) Brasure de trois câbles sur l'autre face de la carte - cf. figures

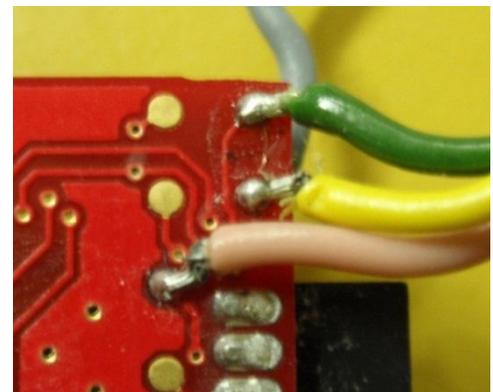


Figure 23 : modification de la carte MSP430

Longueur des câbles : env. 80mm

Extrémités non soudées des câbles : connectique mâle  $\varnothing$  0.6mm

## 7.2. Adaptations à faire sur le gyromètre de la wiimote

Il est nécessaire d'ajouter les câbles suivants sur la carte du gyromètre de la wiimote :

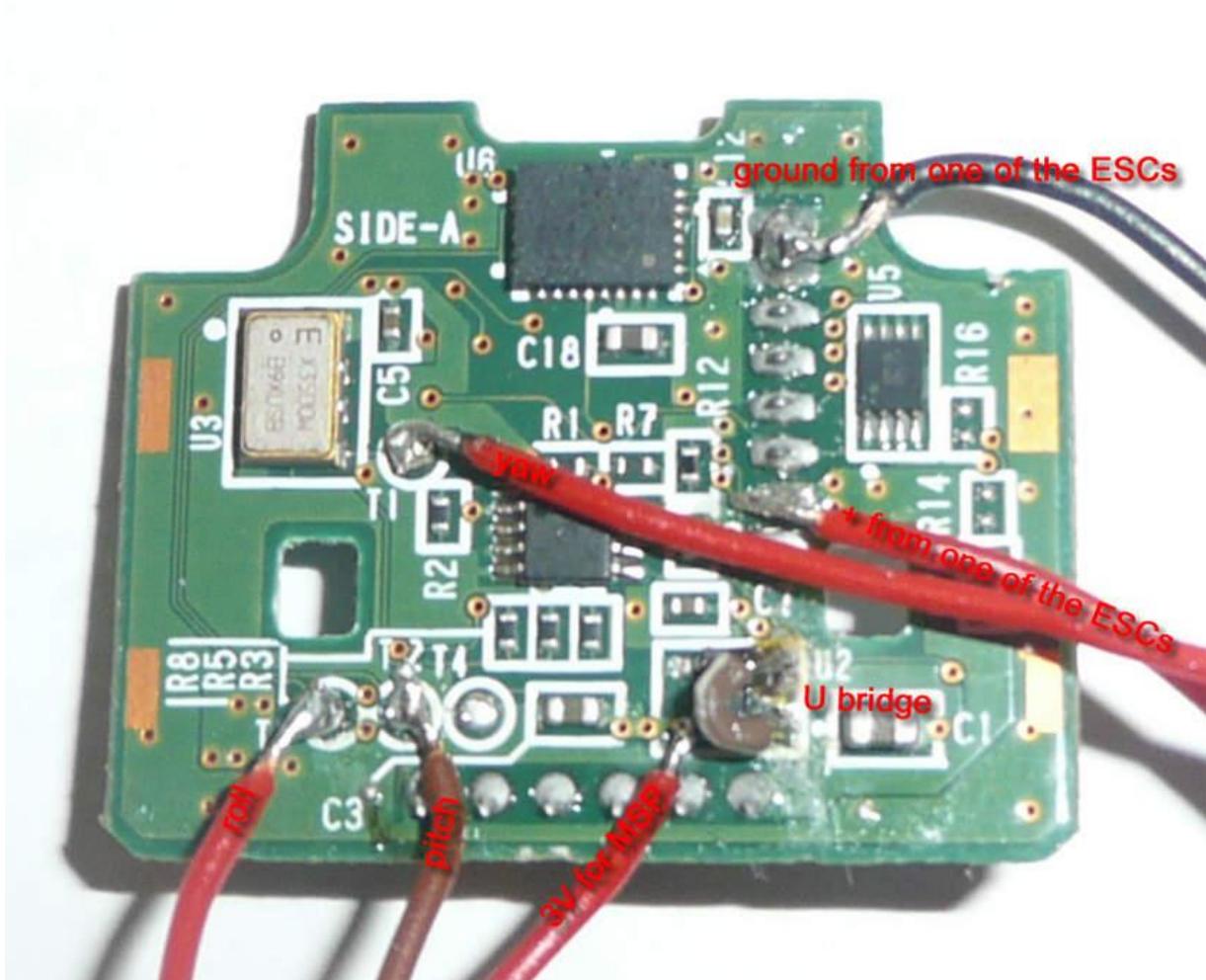


Figure 24 : gyromètre Nintendo modifié

- Les câbles "roll", "pitch", "yaw" pour la transmission des données utilisées dans la stabilisation du vol du gyromètre au microcontrôleur.
- Une des sorties 3V du gyromètre pour l'alimentation de la carte du MSP430
- Deux câbles pour l'alimentation directe de la carte tension de la batterie relayée par un des contrôleurs moteurs.

De plus, pour permettre au gyromètre d'alimenter la carte du microcontrôleur en 3V, il est nécessaire d'établir un pont entre deux pins. Toutes ces modifications sont montrées sur la figure ci-dessus.

## 7.3. Modification des contrôleurs moteurs

Les ESC doivent uniquement recevoir des connexions mâles sur leur câble de connexion moteur afin de permettre un câblage facile de ces derniers.

## 7.4. Explication des connexions

### Carte de contrôle

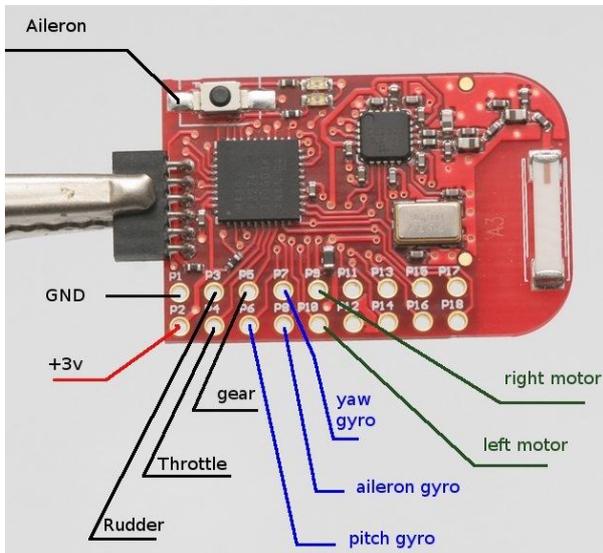


Figure 25 : connexion MSP430

### Gyromètre

Afin d'avoir un fonctionnement normal et une transmission correcte des données, le gyromètre doit être positionné bien à l'horizontal, orienté de manière à faire face à l'avant de l'appareil comme montré sur la figure ci-dessous :

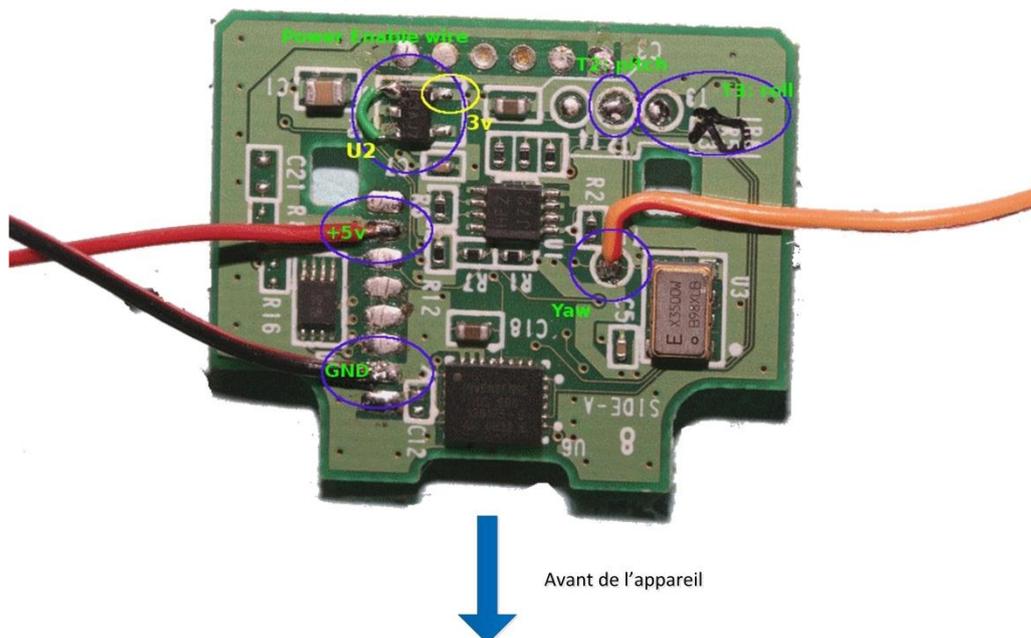


Figure 26 : connexion gyromètre

*Schéma global de câblage*

Le câblage total de l'appareil est schématisé ci-dessous et comprend l'entier des composants ; à savoir la carte de commande, le gyromètre, le récepteur radio de la télécommande, les contrôleurs moteurs et les moteurs.

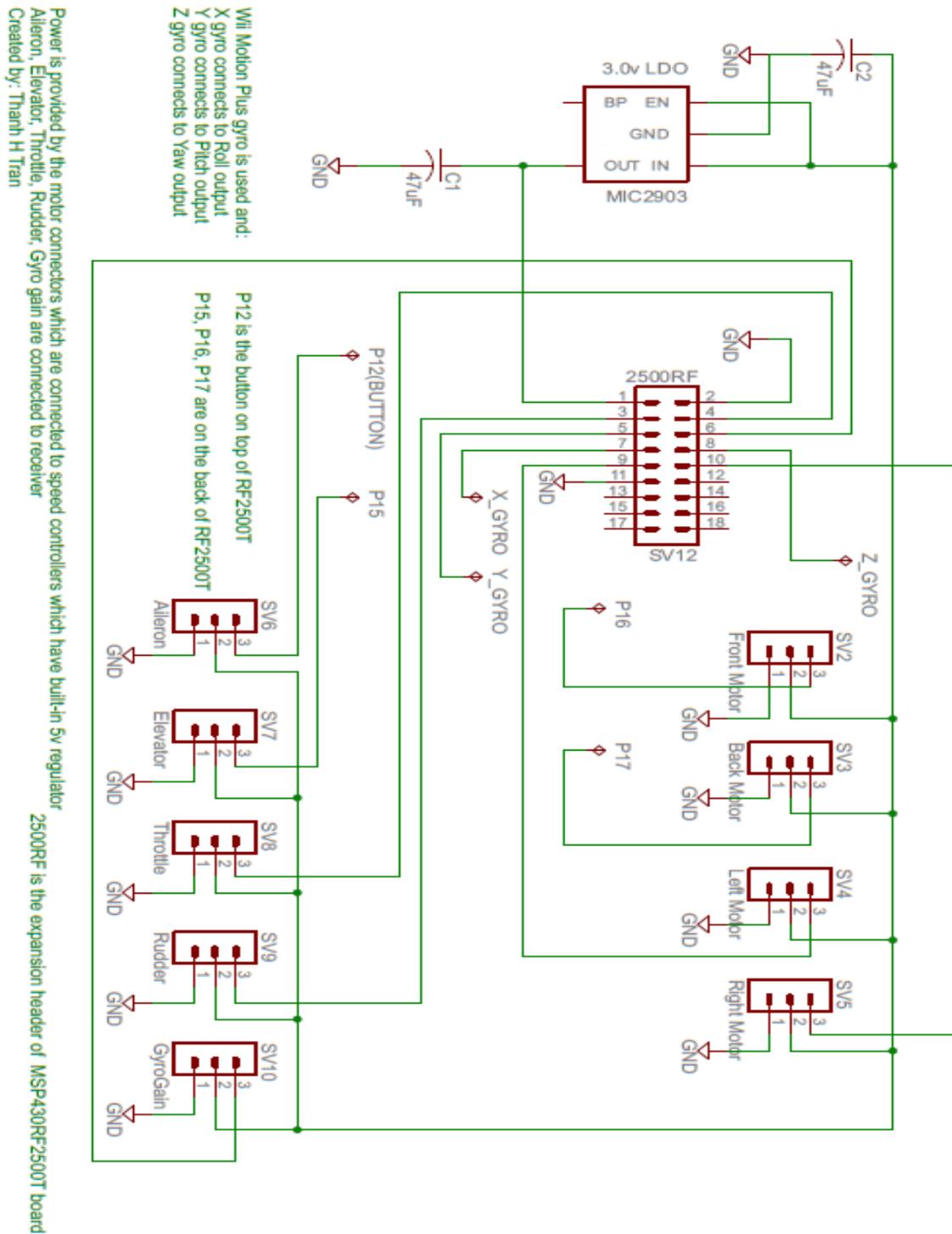


Figure 27 : schéma de câblage global

### Remarques pour le câblage:

- Les ESC sont alimentés en 7.4 Volts directement via la batterie sur les câbles de plus fortes sections
- Le signal de commande des ESC est transmis via le câble blanc.
- Les câbles noir et rouge à petite section des ESC ne sont pas forcés d'être connectés.
- Le récepteur de la télécommande est alimenté en 5 Volts via les câbles à faible section d'un des ESC le fil du signal doit donc être séparé des autres.
- Le gyromètre est alimenté par le récepteur de la télécommande, également en 5 Volts
- La carte de commande est alimentée par le gyromètre de la Wii en 3 Volts DC
- La caméra est également alimentée sur les 7.4V de la batterie

## 7.5. Signaux reçu et émis par le microcontrôleur

Le microcontrôleur reçoit les informations du gyromètre de la Wiimote en analogique et les différents canaux de la télécommande, et définit à l'aide du programme qu'il contient les signaux à appliquer à ses différentes sorties.

Dans ce cas-là, il émet un Pulse Width Modulation (PWM) avec un *duty-cycle* compris entre 20% et 35% et d'une amplitude entre 0V et 3.3V. Ce signal est alors traité par les unités de commande des moteurs qui agissent alors directement sur leur fréquence de rotation.

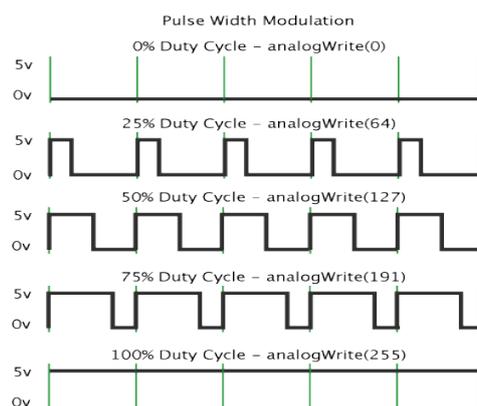


Figure 28 : explication du PWM

## 8. Bancs de test couple « moteur-hélice »

Dans le but de pouvoir tester et surtout comparer le comportement de la totalité des composants de l'appareil, il a été décidé de concevoir deux bancs de test en utilisant la propriété globale du système intéressante dans ce projet, la portance finale des hélices. En effet, il n'est pas indispensable que les divers composants aient exactement le même comportement, du moment que cela n'affecte pas trop le comportement des hélices et donc de l'appareil.

Ces bancs d'essai devraient en plus permettre d'avoir une bonne idée de la portance globale des différents types d'hélices.

### 8.1. Banc à glissière et élastique

Le premier banc d'essai s'appuie sur une position verticale de l'hélice, qui génère alors une poussée horizontale. L'entier du dispositif de maintien est monté sur une glissière et est retenu par un élastique, afin de pouvoir quantifier la poussée, en fonction du déplacement global horizontal de l'ensemble.

Ce dispositif nous donne directement de la force générée par l'ensemble hélice et moteur et permet une comparaison simple et rapide entre les différents moteurs à notre disposition. La grande faiblesse de ce banc réside en la difficulté de calibration, les forces en jeu étant du même ordre de grandeur que celui des forces de frottement. L'impossibilité de faire une mesure exactement identique avec des hélices plus grandes est également un problème. Le support tenant les hélices devrait être modifié. Il engendrerait alors des forces et moments indésirables supplémentaires.

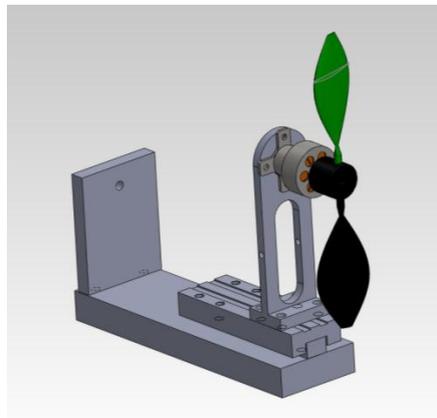


Figure 29 : modélisation du banc à glissière

### Analyse de la dynamique du banc

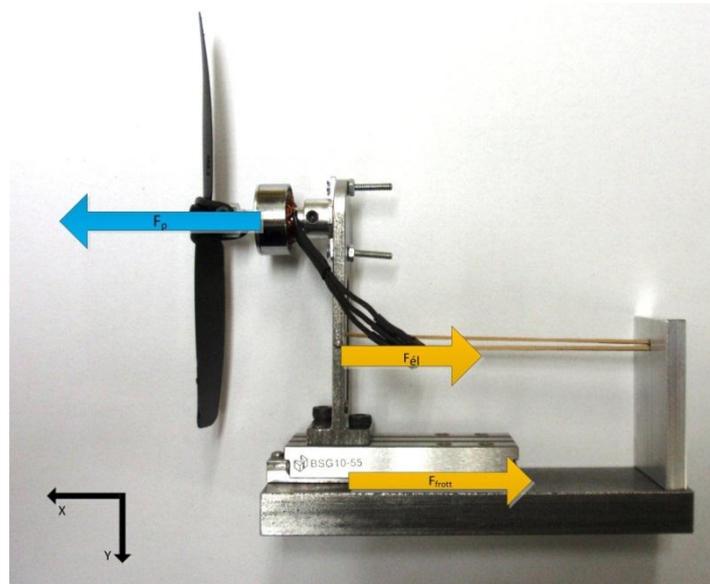


Figure 30 : statique du banc à glissière

Étant donné que ce banc est utilisé pour des mesures seulement lorsqu'il se stabilise avec une force constante donnée par l'hélice, la mesure se simplifie par un simple problème de statique.

En utilisant la troisième loi de Newton qui énonce que, dans tout dispositif statique, la somme de la totalité des forces agissant sur ce système est nulle, on obtient l'équation suivante :

$$\sum Fx = F_p - F_{él} - F_{frott} = 0$$

D'où l'on sort :

$$F_p = F_{él} + F_{frott}$$

$F_p$  = force de traction de l'hélice (portance)[N]

$F_{él}$  = force générée par l'élastique en cette position [N]

$F_{frott}$  = force de frottement interne à la glissière = 0.25 [N]

Les valeurs des forces de tension de l'élastique seront mesurées avec un dynamomètre en chaque point de repère (traits sur le banc d'essai).

Ces valeurs étant en Newton, et donc peu pratiques à utiliser dans un cas pratique de soulèvement de très petites masses, il est plus agréable de les transformer en grammes forces en passant par la valeur de l'accélération gravifique terrestre.

$$F_{pg} = \frac{F_p \cdot 1000}{g}$$

$F_p$  = force de traction de l'hélice (portance)[N]

$F_{pg}$  = portance en gramme force [g]

$g$  = accélération gravifique terrestre = 9.81 [m/s<sup>2</sup>]

Une fois ces calculs effectués, cela donne des valeurs de portance exploitables pour donner des objectifs de masse et de dynamique de vol à l'appareil final.

## 8.2. Banc à balance

Le deuxième banc conçu, donne directement une estimation en grammes de la masse soulevée, et ceci en prenant simplement en compte un facteur de correction émanant de sa géométrie. Ceci a pour avantage de donner la possibilité de prévoir une masse globale du support des moteurs, des composants et du carénage global de l'appareil. De plus ce banc ne nécessite aucune calibration pour autant que le contrepoids mis du côté de la balance soit suffisant. Une simple utilisation de la fonction de mise à zéro suffit pour avoir des valeurs cohérentes durant les essais.

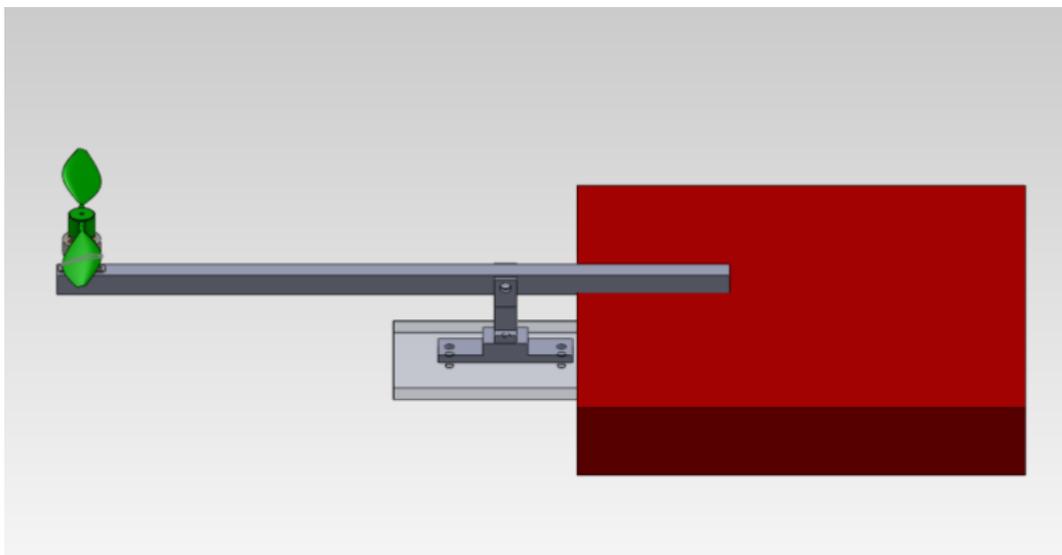


Figure 31 : modélisation banc à balance

Analyse de la dynamique du banc

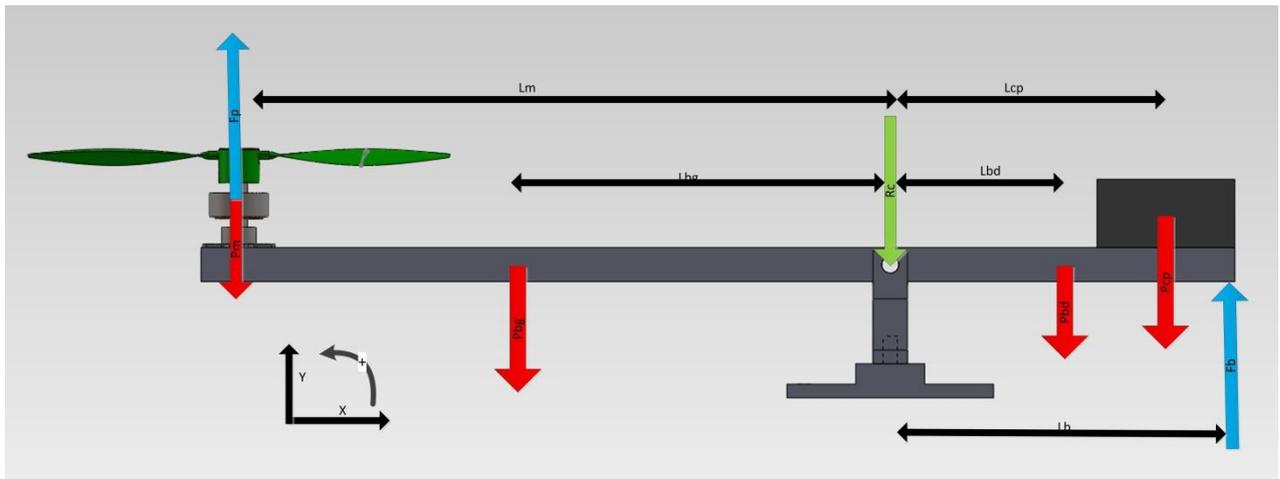


Figure 32 : statique complète du banc à balance

Le banc à balance a, au premier abord, une mise en statique et donc en équations, beaucoup plus compliquée que le premier banc étudié. Les masses et centre de gravités de chaque composant devant être pris en compte si l'on veut faire une analyse complète du système.

Néanmoins, la constance de la quasi-totalité des forces en présence et la possibilité de mettre la balance à zéro, même quand une certaine masse  $y$  est appliquée, permet de supprimer toutes les forces en rouge sur le schéma précédent, soit les forces constantes. Ce qui donne le système statique suivant, qui est beaucoup plus facile à gérer.

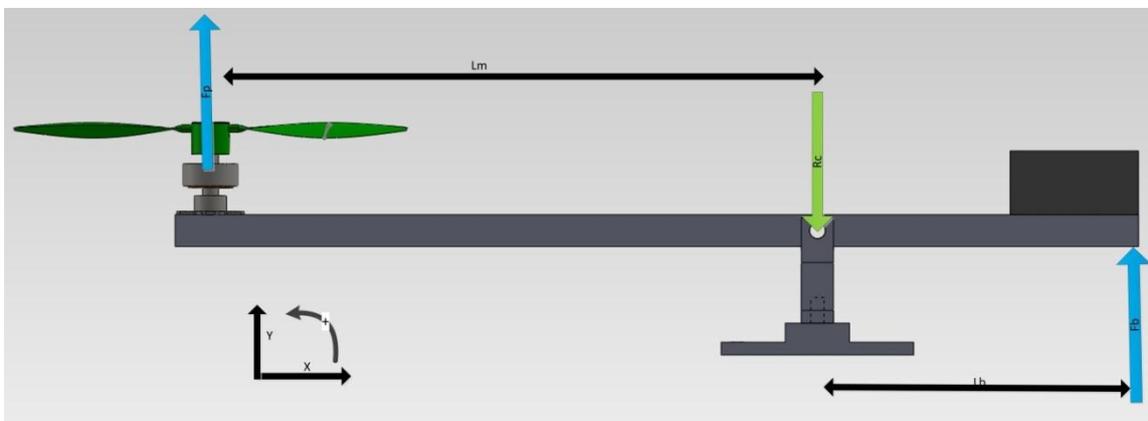


Figure 33 : statique simplifiée du banc à balance

Dans cette configuration, les seules valeurs à connaître sont donc les distances entre les points d'application des forces et le centre de rotation, ainsi que la force au point d'appui sur la balance, donnée directement par l'affichage.

La force de réaction au point de pivotement peut être ignorée en faisant la somme des moments autour de ce point.

Ce qui donne comme équation :

$$\sum M_C = L_b \cdot F_b - L_m \cdot F_p = 0$$

On obtient donc la portance réelle (en gramme force) :

$$F_p = \frac{L_b \cdot F_b}{L_m}$$

Fp = force de traction de l'hélice (portance)[g] Fb = Force donnée par la balance [g] Lb = longueur centre rotation-balance [mm] Lm = longueur centre rotation-moteur [mm]
---

Dans un souci de simplicité et de confort de calcul, les valeurs de Lm et Lb ont été choisies dans un rapport de 2:1. Ceci a pour effet de donner une équation finale très simple :

$$F_p = \frac{F_b}{2}$$

## 9. Tests et mesures réalisés

### 9.1. Premiers essais sur appareil monté

Les tout premiers essais ont été réalisés avec le premier prototype entièrement monté et après une calibration. Ceci optimise les chances de résultats probants :

Durant cette phase de recherche de compréhension, les éléments suivants ont été mis en évidence :

- La télécommande doit impérativement être allumée avant l'appareil, afin que le récepteur reçoive des consignes dès son allumage. Sinon, le récepteur ne comprend pas les informations qu'il reçoit.
- Il n'est pas nécessaire de calibrer l'appareil à chaque allumage. La calibration devient nécessaire lorsque le gyromètre a perdu le fil ou s'il y a de grandes distensions dans le fonctionnement de l'appareil.
- Les moteurs ne commencent pas à tourner tous en même temps. L'ordre de mise en mouvement est par contre relativement aléatoire et très proche, si ce n'est le moteur gauche qui se met à tourner en premier systématiquement. Ceci fait penser que la dynamique des moteurs et des signaux changent légèrement dans le temps. L'ordre le plus courant des départs en rotation est le suivant :

gauche      avant      droite      arrière

En constatant que les moteurs ne tournaient pas à même régime, quand bien même ils recevaient les mêmes informations du récepteur de la télécommande, il est apparu qu'il était nécessaire de vérifier tous les composants et sorties indépendamment.

## 9.2. Mesures effectuées à la sortie du microcontrôleur

Les signaux des sorties du microcontrôleur étant toujours du même format et compris entre les mêmes maximum et minimum, il n'est pas nécessaire de faire toutes les mesures à l'aide d'un oscilloscope. Seule la vérification de la tension maximum le requiert. Par la suite, une mesure à l'aide d'un simple voltmètre permet d'obtenir des valeurs significatives. La tension donnée par ces appareils est en réalité une tension moyenne constatée sur le temps de mesure.

### Première carte

En premier lieu, une série de mesures sur les quatre sorties moteurs du microcontrôleur a été effectuée afin de pouvoir identifier un éventuel problème venant de la carte ou du programme en lui-même. Il a été décidé de faire les mesures en quatre positions de la commande du *throttle* différentes et éloignées, afin d'avoir une sortie théoriquement identique sur les quatre moteurs. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

première carte				
sortie \ tension intégrée [mV]	base	milieu	test 3	test 4
port 9 (right)	677	861	955	1051
port 10 (left)	727	908	1003	1100
port 16 (front)	672	854	949	1046
port 17 (back)	665	847	942	1037

Tableau 5 : mesure de tension intégrée première carte seul *throttle*

En faisant ces mesures, il est apparu de façon certaine qu'il y avait déjà un problème au niveau de la sortie du microcontrôleur. La sortie du port 10 est systématiquement supérieure de 50mV aux trois autres. Ces différences pouvant venir à la fois du microcontrôleur ou du programme, il a été nécessaire de procéder au câblage complet d'un second contrôleur, afin de pouvoir exclure ou confirmer cette possibilité. Ceci prenant passablement de temps, les tests sur les autres composants ont été effectués en faisant très attention aux différents paramètres régissant leurs réactions.

### Seconde carte

Une série de mesure a donc été effectuée sur la seconde carte câblée.

Deuxième carte				
sortie \ tension intégrée [mV]	base	milieu	test 3	test 4
port 9 (right)	670	824	933	1130
port 10 (left)	710	870	972	1172
port 16 (front)	664	825	928	1123
port 17 (back)	672	827	635	1130

Tableau 6 : mesure de tension intégrée seconde carte seul *throttle*

Lors de ces mesures, il a été constaté que la différence de tension intégrée sur le port 10 réapparaissait avec une amplitude légèrement moindre mais néanmoins suffisante pour être dérangeante durant les phases de tentatives de vol. La piste de la carte défectueuse étant écartée, il est apparu que le problème venait probablement de la télécommande ou du soft lui-même, et plus particulièrement des opérations effectuées dans le "mixer.c".

### 9.2.1. Durant la calibration

Dans le but de confirmer cette hypothèse, une troisième série de mesures a été réalisée durant la phase de calibration de l'appareil. Les sorties ne prenant alors en compte que la valeur du throttle, les quatre sorties devraient avoir exactement la même intensité intégrée et donc le même *duty-cycle*. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

deuxième carte durant calibration				
sortie \ tension intégrée [mV]	base	milieu	test 3	test 4
port 9 (right)	699	822	980	1150
port 10 (left)	699	822	980	1150
port 16 (front)	695	820	980	1149
port 17 (back)	695	820	980	1150

Tableau 7 : mesure de tension intégrée seconde carte seul *throttle* durant calibration

Il est apparu très clairement après cette mesure que le problème venait des différentes opérations effectuées sur les valeurs des signaux reçus de la télécommande et du Wiimotion ou sur les valeurs reçues de la part de ces composants sur lesquelles il n'est pas possible d'avoir une influence.

### 9.2.2. Comportement du signal de sortie de la carte par rapport à la commande

Après plusieurs séries de mesures à la sortie de la carte, il est apparu que la tension de sortie, et donc la taille du *duty-cycle* dans des conditions de commandes identiques, dépend de facteurs tels que l'état de la batterie de l'appareil alimentant le récepteur ou l'état de la batterie de la télécommande. Il est donc possible, à très peu de temps d'intervalle et après calibration, d'obtenir des signaux de sorties légèrement différents.

Pour comprendre le comportement des ESC, il est donc nécessaire de comprendre comment évoluent les signaux qu'ils reçoivent en fonction de la commande appliquée sur la télécommande. Pour ce faire, il a été nécessaire de faire les mesures durant la phase de calibration afin d'être certain qu'aucun autre facteur, tel que les vibrations de la table transmises au gyromètre ou les éventuels décalages de signaux émanant de la télécommande, ne prétérite la qualité des mesures.

Les tensions relevées dans le graphique suivant sont toujours les tensions intégrées par le multimètre.

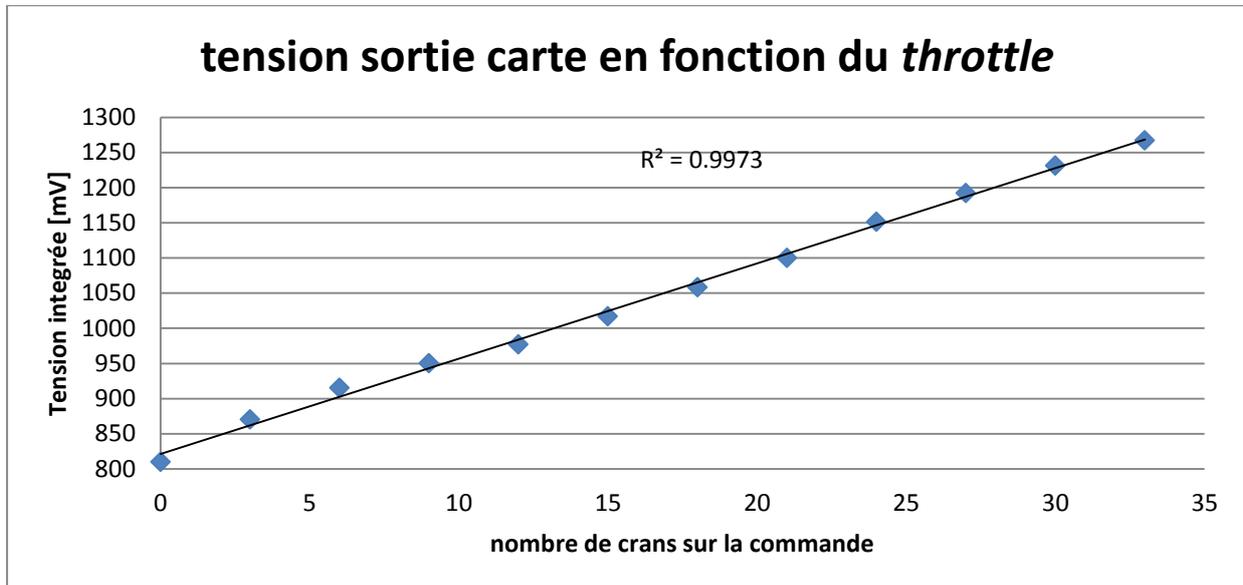


Figure 34 : sortie en tension de la carte en fonction de la commande throttle:

Comme il est possible de voir sur le graphique, l'évolution du *duty-cycle* est linéaire avec la montée de la commande. Cette linéarité est vérifiée par le facteur  $R^2$  qui, dans le cas où les points donnés sont réellement sur une seule droite, vaut 1. La valeur de 0.997 est alors excellente au vu des imprécisions possibles de mesures au voltmètre.

La vitesse de rotation des moteurs étant directement commandée par ce signal, elle évolue également de façon linéaire avec la commande. Cet aspect est très pratique dans la commande de moteur brushless pour des véhicules à roues par exemple, leur vitesse étant dictée uniquement par la vitesse des moteurs. Par contre, en ce qui concerne les appareils volants, la portance produite par les hélices n'est pas directement proportionnelle à la vitesse de rotation. Cet aspect est alors moins important.

### 9.2.3. Vérification des comportements des moteurs

Afin de vérifier que les différents moteurs ont les mêmes caractéristiques dans des situations identiques, une série de mesures a été réalisée en utilisant les deux bancs à disposition. L'utilisation des deux bancs permet à la fois d'avoir une idée raisonnable des forces mises en jeu, et de vérifier la cohérence des mesures obtenues selon les deux méthodes. Les caractéristiques à proprement parler des moteurs n'étant pas ce qui nous intéresse, seule la force générée par l'hélice dans les situations a été mesurée, et ce dans les conditions suivantes :

- Un seul contrôleur a été utilisé pour l'ensemble des essais.
- Une seule hélice a également été utilisée.
- Les moteurs ont tous été branchés sur la même sortie.
- Les essais ont tous été effectués avec une seule mise sous tension de l'appareil.
- Une calibration a été faite avant l'essai.

### Sur banc d'essai à glissière

La procédure de mesure sur le banc à glissière est la suivante :

- Allumer l'appareil avec le premier moteur monté sur le banc et câblé.
- Mettre le banc en position arrière (aligné sur le premier trait) et ajouter l'hélice.
- Vérifier que le câblage n'empêche pas, ni ne facilite le déplacement du chariot.
- Augmenter la vitesse de rotation du moteur cran par cran sur la commande du *throttle*.
- Attendre que le chariot arrête de se déplacer et augmenter le *throttle* d'un cran.
- Relever le nombre de crans à chaque passage d'un nouveau trait.

Les résultats obtenus avec les sept moteurs sont résumés dans le tableau ci-dessous :

passage \ "clic"	mot 1	mot 2	mot 3	mot 4	mot 5	mot 6	mot 7
2e trait	8	4	5	8	6	5	3
3e trait	13	14	13	13	15	15	14
4e trait	18	17	18	18	18	19	17
5e trait	23	22	23	23	23	23	21
6e trait	27	26	27	27	26	26	25
7e trait	29	29	30	29	28	28	27
8e trait	31	30	31	31	30	30	29
9e trait	32	32	32	32	32	32	32
10e trait							

Tableau 8 : résultat comparaison des moteurs avec banc à glissière

Note : La différence de crans entre les essais, au passage du deuxième trait, est très importante. Cette partie de la mesure devient statistiquement inutilisable.

En analysant les résultats obtenus avec ce premier banc, il apparaît que les moteurs ont des comportements très proches lorsqu'ils reçoivent la même commande. Le nombre de crans utiles au dépassement des traits est identique ou ne diffère que d'un incrément. De plus, la possibilité d'une erreur durant le comptage des crans est tout à fait possible, que cela soit en passant deux crans sans le sentir où en comptant un cran qui n'est réellement pas passé.

Cela indique que l'utilisation d'aucun des moteurs n'a à être écartée et que le comportement de l'appareil en vol ne sera pas dérangé par un moteur ayant un comportement très différent.

Ce banc d'essai donne donc directement une possibilité de comparaison de comportements entre les moteurs. Il est pourtant nécessaire de faire un test plus précis avec un dynamomètre pour avoir une idée de la force réellement générée par l'hélice sur le système.

Les tests réalisés avec le dynamomètre permettent de mettre en avant les forces qui doivent être mises en œuvre pour dépasser chaque trait.

trait	force [N]	éq. Masse [g]
2e trait	0.25	30
3e trait	0.3	18.5
4e trait	0.35	36
5e trait	0.4	41
6e trait	0.5	51
7e trait	0.6	61
8e trait	0.65	66
9e trait	0.75	76
10e trait	0.8	82

Tableau 9 : correspondance passage trait/force hélice

Ces mesures indiquent que la portance maximale de ces hélices est d'environ 75 grammes, mais le nombre de calculs pour arriver à ces estimations étant très important, une imprécision est quasiment inévitable.

#### Sur banc d'essai à balance

La procédure de mesure sur le banc à balance est la suivante :

- Allumer l'appareil avec le premier moteur monté sur le banc et câblé.
- Mettre la balance à zéro.
- Vérifier que le câblage ne change pas la dynamique des mesures.
- Augmenter le *throttle* de 3 crans.
- Relever la valeur de masse donnée par la balance.
- Répéter l'opération jusqu'au maximum (33 crans).

Les résultats obtenus pour les 7 moteurs sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Crans \ grammes	mot 1	mot 2	mot 3	mot 4	mot 5	mot 6	mot 7
3 crans	0	0	0	0	0	1	0
6 crans	8	8	8	10	8	10	8
9 crans	22	22	21	22	22	22	21
12 crans	33	35	33	36	34	35	33
15 crans	46	47	46	49	47	48	45
18 crans	56	58	58	60	58	57	56
21 crans	68	72	68	72	68	69	70
24 crans	83	87	86	89	85	83	87
27 crans	100	105	101	106	103	102	104
30 crans	118	123	118	122	120	119	123
32 crans	133	136	135	138	134	135	135

Tableau 10 : résultat comparaison des moteurs avec banc à balance

Notes: Les grammes notés dans le tableau sont ceux directement relevés sur la balance. La comparaison seule des comportements des moteurs est intéressante à cette étape. La valeur "0" à la première ligne indique que le moteur commence à tourner à ce moment mais qu'aucune portance n'est mesurée.

Les valeurs obtenues avec cette expérimentation concordent tout à fait avec celles obtenues avec le premier banc de mesures. Les moteurs sont toujours quasiment identiques (à 2% maximum d'écart) et les forces constatées sont du même ordre de grandeur, aux mêmes positions de commande.

### 9.3. Mesures des sorties contrôleurs moteurs

Afin de vérifier que les différents contrôleurs moteurs donnent les mêmes instructions aux moteurs avec le même signal reçu, une série de mesures a été effectuée. Le signal de sortie des contrôleurs moteurs varie en fréquence en fonction du signal d'entrée qu'il reçoit (PWM). Mais comme il est relativement délicat d'analyser son évolution en détail, même à l'aide d'un oscilloscope, il a été décidé de faire les mesures directement sur la portance générée par une hélice montée. Ces mesures ont été faites à l'aide du banc à balance, dont les résultats sont plus réguliers et précis que le banc à glissière, et dans les conditions suivantes :

- Un seul moteur a été utilisé pour l'ensemble des essais.
- Une seule hélice a également été utilisée.
- Les contrôleurs ont tous été branchés sur la même sortie.
- Les essais ont tous été effectués avec une seule mise sous tension de l'appareil.
- Une calibration a été faite avant l'essai.

La méthode de mesure est la même que pour caractériser les moteurs. Seuls le changement de contrôleur et la conservation du même moteur durant tout l'essai changent.

Résultats du test :

contrôleur	1	2	3	4
3 crans	1	0	0	0
6 crans	9	10	8	8
9 crans	22	21	20	21
12 crans	35	35	36	35
15 crans	48	46	49	49
18 crans	62	59	63	60
21 crans	73	69	74	73
24 crans	91	86	93	93
27 crans	109	104	112	113
30 crans	129	126	134	134
32 crans	145	141	146	148

Tableau 11 : résultats des tests des ESC

Ces résultats montrent encore une fois qu'avec le même signal d'entrée après la même calibration, les différents contrôleurs moteurs possèdent les mêmes caractéristiques. Seul le second donne une portance légèrement plus faible, mais de seulement 3% environ, ce qui est gérable par la suite par le programme.

Après avoir testé tous les composants séparément avec, à chaque fois, le reste de la ligne de commande identique, il est à présent claire que le problème constaté vient soit des composants dont on ne peut pas régler ou comparer le comportement (gyromètre ou récepteur de la commande), soit

du programme en lui-même. Il sera donc nécessaire de procéder à certaines modifications basiques dans le programme, pour obtenir un comportement de vol acceptable.

## 9.4. Caractérisation des hélices

Pour pouvoir poser des objectifs de masses raisonnables. Il est nécessaire de procéder à des essais sur toutes les hélices à disposition, pour connaître leur portance maximum dans notre utilisation (vol stationnaire privilégié). Ces essais ont été effectués avec le banc à balance au vu de la qualité des résultats précédemment obtenus. D'après les estimations faites, l'appareil ne devrait pas dépasser les 75% de la masse totale maximale possible, afin de conserver une bonne dynamique de vol.

Chaque type d'hélices a été testé au minimum 3 fois afin d'avoir une idée précise de leur portance et de l'incertitude sur les mesures effectuées.

Les résultats ainsi obtenus et exploités pour les différentes hélices donnent les valeurs suivantes :

### *Hélice 4 pouces pas de 2.5*

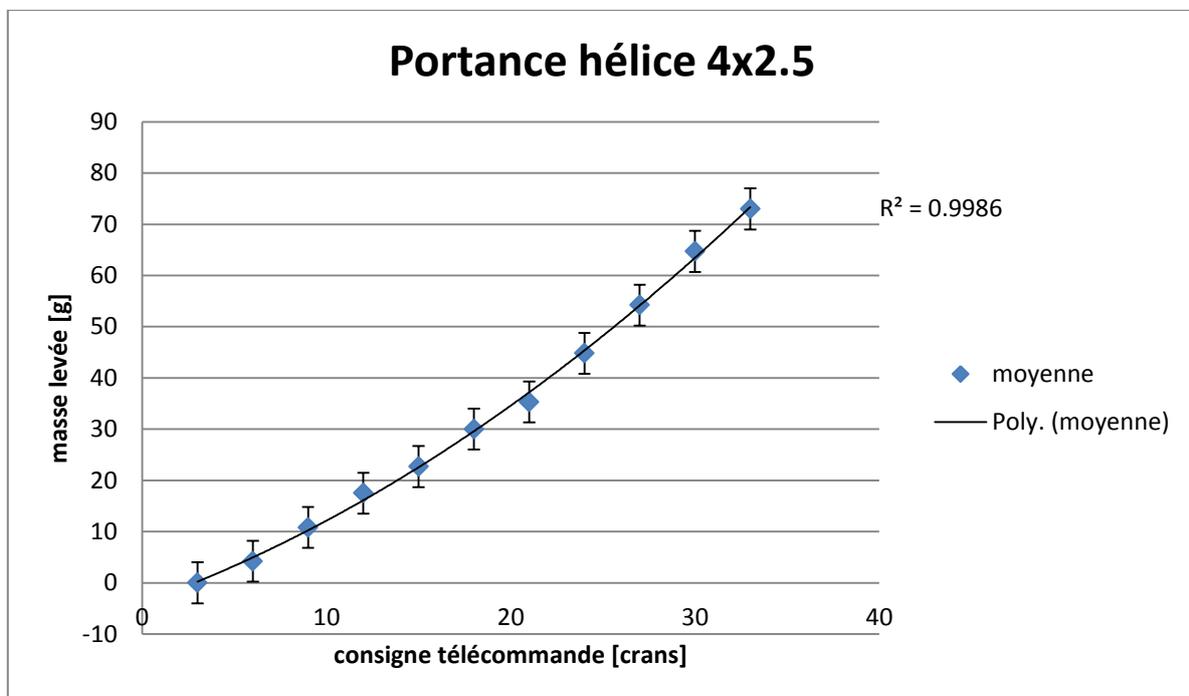


Figure 35 : portance hélice 4x2.5

Le graphique montre très clairement que la portance évolue de manière quadratique, du moins dans une plage d'utilisation réaliste. Ceci n'est pas surprenant au vu du fait que la grande majorité des règles aérodynamiques varient en fonction du carré de la vitesse et que celle-ci varie linéairement grâce aux ESC.

Avec ces hélices, une masse totale de 300 grammes pourrait être soulevée. Dans l'absolu, cela suffirait à faire voler le quadricoptère. Malheureusement, la dynamique de vol serait très fortement diminuée, les vitesses de déplacement très faible et le temps de réaction aux changements d'instructions beaucoup trop lent.

Le poids maximal pour pouvoir utiliser ces hélices dans de bonnes conditions ne devrait donc pas dépasser les 210 grammes, d'après le critère défini précédemment.

*Hélice 5 pouces pas de 3*

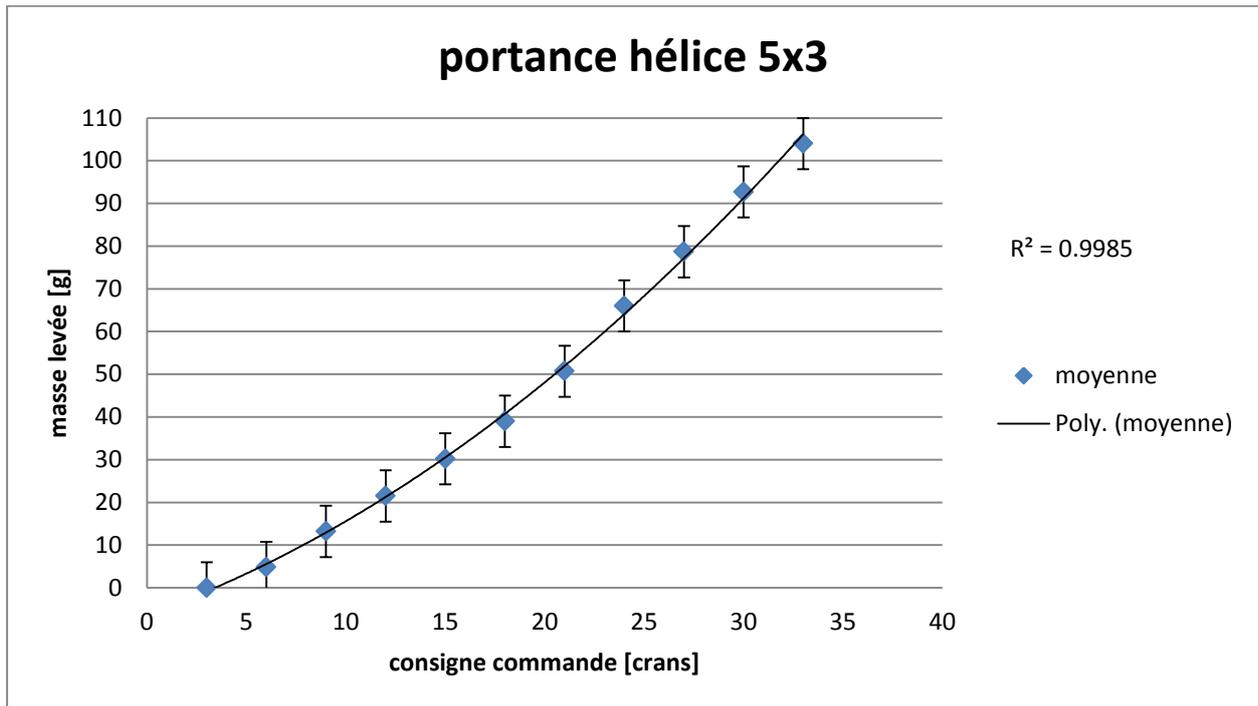


Figure 36 : portance hélice 5x3

Avec une hélice de catégorie supérieure, les gains de masse possible à soulever sont de 30 grammes par hélice, ce qui fait que l'appareil au complet peut se permettre d'avoir une masse avoisinant les 300 grammes tout en conservant une dynamique de vol correcte.

Cette hélice se présente donc comme potentiellement utilisable avec notre appareil.

### Hélice 6 pouces pas de 3

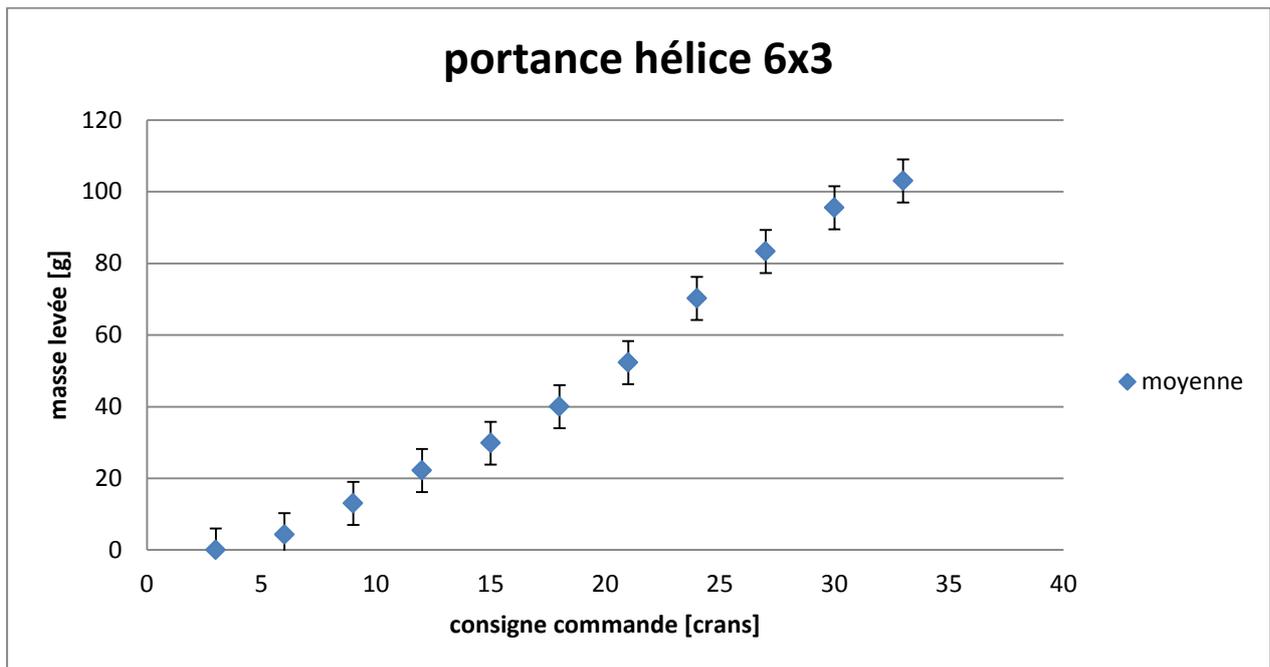


Figure 37 : portance hélice 6x3

Le comportement de cette hélice diffère des deux premières hélices testées. En effet, après une augmentation quadratique sur la première partie, la vitesse d'augmentation de la masse levée diminue sensiblement dès que l'on passe un certain régime. De par ce fait, la portance maximale de cette hélice ne dépasse pas celle de l'hélice de 5 pouces.

En regardant la géométrie de l'hélice de plus près, on s'aperçoit qu'elle diffère de celles des premières hélices : les angles d'attaque à l'air sont différents. De plus, l'extrémité des hélices de ce type est quasiment à plat par rapport à leur rotation, ce qui n'entraîne aucune portance supplémentaire. Il est par contre tout à fait plausible que, lors de déplacements de ces hélices dans l'air, une portance supplémentaire soit créée de par l'orientation de l'hélice par rapport au vent apparent. Ce type d'hélice s'adresse donc plutôt au vol d'un appareil tel qu'un avion qu'à celui d'un hélicoptère dont l'atout principal est le vol stationnaire.

Ce changement de comportement peut également s'expliquer par le décrochement de l'hélice qui engendre alors plus de traînée pour moins de portance, ce qui peut entraîner le décrochement du moteur brushless et par conséquent une vitesse de rotation limitée. Cette théorie n'a par contre pas pu être vérifiée, vu qu'aucun moyen de mesurer la vitesse de rotation du moteur n'était à disposition.

### Hélice 7 pouces pas de 3.5

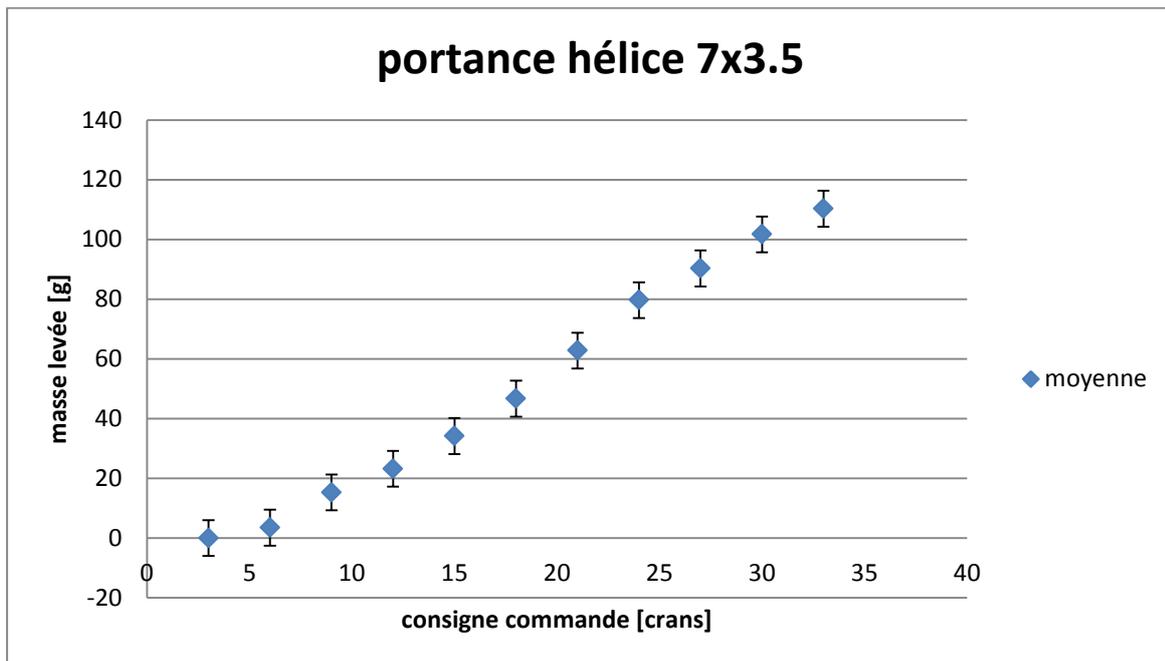


Figure 38 : portance hélice 7x3.5

Avec cette hélice, tout comme avec la précédente, la portance n'évolue plus de manière quadratique après un certain seuil et ce pour les mêmes raisons.

Un très faible gain de masse par rapport à l'hélice de 5 pouces est réalisé (environ 10 grammes par hélice) mais cela ne justifie en aucun cas l'utilisation d'hélices de ces dimensions qui risquent en plus d'avoir un temps de réaction aux changements de commandes beaucoup plus long.

Après avoir testé les différentes hélices, le choix du deuxième type d'hélice a été fait. L'appareil au complet ne devra donc en aucun cas dépasser les 300 grammes une fois complètement monté et câblé. Cette valeur fixée de manière moins arbitraire que lors de la conception première du modèle 12 pouces, il est alors possible de monter l'appareil dans des conditions possibles à l'obtention d'une masse suffisamment faible sans pour autant mettre de côté les fonctionnalités et caractéristiques mécaniques souhaitées à la base.

## 10. Modifications du code

Pour pallier aux différents problèmes de différences de dynamiques entre les moteurs, il a été nécessaire de procéder à quelques modifications dans le programme de base afin de pouvoir rendre la commande utilisable, voir optimale.

### *Simplification commande*

La commande "get\_pulse" est très utilisée durant la phase de développement, une commande "gp" faisant la même chose a donc été ajoutée dans le *cmd.c*

```
if (strcmp(cmd_str, "get_pulse") == 0 || strcmp(cmd_str, "gp") == 0)
    show_info();
```

### *Correspondance avec télécommande*

Le premier problème rencontré était que certaines des commandes spéciales, engendrées par la télécommande en mettant un des sticks dans une des positions extrêmes non usuelles pendant le vol, n'étaient pas reconnues par la carte. Notre commande n'arrivant pas à atteindre ces différents extrêmes. Il a alors été utile de modifier ces paramètres dans le "quad\_main.c"

Pour connaître les valeurs à implémenter dans le programme, les valeurs maximales et minimales ont été définies en mettant les sticks de la commande en position extrême puis en faisant un "get\_pulse".

Les valeurs maximales en minimales sont expliquées dans le tableau suivant :

commande	rudder	aileron	throttle	gear
minimum	1098	1170	1102	1160
maximum	1890	1890	1875	1825

Tableau 12 : minimum et maximum des commandes [ticks]

Les valeurs limites alors décidées sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Position	Valeurs de base		modifications	
S G B G	Thr < 1000	Rud < 1300	Thr <1130	Rud < 1130
S G B D	Thr < 1000	Rud > 1700	Thr <1130	Rud > 1800

Tableau 13 : modifications des valeurs palier extrêmes

Explications: S G B G => Stick Gauche position en Bas à Gauche

Une fois le programme utilisable avec notre télécommande, il a été possible de procéder aux différents tests expliqués précédemment afin de constater et comprendre les autres problèmes éventuels.

### *Comportement des hélices*

Le second problème lié à l'exploitation des données de la télécommande par le soft a donc été le celui de la sur-rotation du moteur gauche de l'appareil. Pour parer à ce problème deux solutions étaient envisageables. La première était de simplement ajouter un offset négatif à la suite de la ligne de calcul de la commande du moteur gauche.

Par exemple:

```
*a1 = thr-(ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL) + yaw - (INT16)(roll_gyro_rate)-50;
```

Cette solution c'est très vite avérée très peu fiable, et les modifications affectaient étrangement plusieurs moteurs. Une autre façon de modifier le comportement des moteurs a donc dû être trouvée. Cette solution consiste en une modification des valeurs centrales des commandes de la manette. En effet, si le moteur gauche tourne trop vite, il suffit de donner comme indication à l'appareil de virer à gauche (cf. tableau 4). Ainsi le moteur gauche ralentira de lui-même.

Le problème que pose cette solution est la variation de fréquence des deux moteurs opposés. Il faut donc par la suite, une fois que les moteurs gauche et droite ont le même comportement, ajouter d'autres offsets pour compenser les différents comportements liés.

Il a donc été décidé de créer trois valeurs centrales au lieu d'une seule en leur attribuant des valeurs propres et facilement modifiables dans le "mixer.h" , et ce de la manière suivante :

```
#define RUD_CENTER_PULSE_VAL          1510
#define PIT_CENTER_PULSE_VAL          1495
#define AIL_CENTER_PULSE_VAL          1515
```

Puis de modifier le programme "mixer.c" afin de tenir compte des valeurs centrales ainsi programmées :

À la ligne 123

```
yaw =rud + copter_config_data.yaw_subtrim - RUD_CENTER_PULSE_VAL +
yaw_gyro_rate;
```

Aux lignes 136 à 139

```
*fr = thr - (pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL) - yaw + (INT16) (pitch_gyro_rate);
*bk = thr + (pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL) - yaw - (INT16) (pitch_gyro_rate);
*al = thr - (ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL) + yaw - (INT16) (roll_gyro_rate);
*ar = thr + (ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL) + yaw + (INT16) (roll_gyro_rate);
```

En faisant ces modifications, un réglage très fin des différents comportements des moteurs est possible. Il faut par contre prendre le temps de modifier chacune des valeurs des pulses centraux un à un et de vérifier les effets de chacune des modifications. De plus, il est indispensable de commencer par modifier la valeur posant le plus de problèmes, une trop grande modification d'un des paramètres handicapant véritablement les possibilités de commandes. Il est également impossible de déterminer avec précision de combien modifier ces valeurs. Seules des essais successifs permettent une bonne dynamique, ce qui prend beaucoup de temps mais peut en valoir la peine si ces réglages sont bons et constants.

Les comportements des moteurs suivant la modification des variables est résumée dans le tableau ci-dessous :

modification	augmentation	
	YAW_CENTER_PULSE	avant et arrière plus vite
PIT_CENTER_PULSE	arrière moins vite avant plus vite	aucun effet gauche et droite
AIL_CENTER_PULSE	aucun effet avant arrière	gauche moins vite et droite plus vite

Tableau 14 : effet des modifications de centre pulses

Après ces modifications, les comportements moteurs semblent suffisamment similaires pour permettre des essais de vol le montage et le câblage de l'appareil ont pu être entamés.

## 11. Montages et essais réalisés

Lors du premier montage, il a été constaté que le nombre de vis utilisé dans l'assemblage était très important, pas moins de 64, et qu'un grand gain de masse était possible rien qu'en échangeant les vis en acier classique contre des vis en nylon. En effet, rien que cette modification fait économiser une masse de plus de 30 grammes. Soit un gain de masse de 10% qui n'est de loin pas négligeable dans notre application.

Il a été décidé de monter la caméra et la batterie, soit les deux éléments dont la masse est importante, le plus proche possible du centre de l'appareil et sous celui-ci afin de garantir une position du centre de gravité la plus centrée possible. Les chances de faire voler l'appareil sans grands besoins de régulation sont dès lors grandement augmentées.

Pour que la réaction de l'appareil en rotation autour de son axe coïncide avec les commandes expliquées précédemment (tableau 4), il faut que les hélices à pas à gauche soient montées sur les moteurs avant et arrière de l'appareil. Les sens de rotation des hélices, pour qu'elles portent en effet l'appareil, sont horaire pour les hélices à pas à droite et antihoraire pour les hélices à pas à gauche. La vérification du sens de rotation des moteurs avant la fixation des hélices permet d'éviter des essais inutiles.

Une fois complètement monté et câblé, l'appareil atteint une masse de 253 grammes, ce qui est inférieure de 20 grammes à notre première estimation, et inférieur de plus de 40 grammes à la limite fixée pour utiliser les hélices de cinq pouces. Le cahier des charges défini, suite aux différents tests, est alors respecté.

La majorité des fils suffisamment longs sont dissimulés dans l'appareil afin de conserver une certaine esthétique. Cela ne va cependant pas sans difficulté pour positionner le plateau du haut sans pincer aucun câble. De plus, les câbles étant alors inaccessibles, il est indispensable de vérifier plusieurs fois les connexions, voir même de faire un test de fonctionnement avant de visser ledit plateau.

Après le câblage de base des différents éléments, la position des différents sucres a été déterminée afin d'obtenir un équilibrage satisfaisant de l'appareil. La position de la batterie est à déterminer au cas par cas. Les deux vis positionnées sous celle-ci permettent de la bloquer en une position acceptable et de régler la position du centre de gravité.

L'entier de l'alimentation est réglé par un interrupteur à bascule qui dépasse sur le dessus de l'appareil. Ceci permet de pouvoir laisser la batterie connectée même lors de longues périodes sans utilisation de l'appareil, sans perdre d'autonomie pour autant. Le sucre connecté à la batterie permet une meilleure connexion sans risque de court-circuit potentiellement dangereux.

### 11.1. Premiers essais de vol

Lors du premier essai de vol, il a été constaté que les hélices étaient montées sur les faux moteurs. Ceci entraîne inévitablement la rotation rapide de l'appareil sur lui-même et ce, même avant le décollage, et les compensations apportées par la commande amplifiait le phénomène. Ce premier problème a alors été réglé et de nouveaux essais ont pu être réalisés. Lors de ces essais, l'appareil a continué à tourner dans le sens horaire, ce qui indique un problème de symétrie de couples entre les deux types d'hélices. Malheureusement, les vibrations de l'appareil ont fini par faire tomber certaines goupilles, qui tiennent le moteur gauche, ce qui rend le vol impossible avant réparations.

Après ces quelques essais, l'appareil a commencé à se comporter de manière imprévisible. La batterie commençait déjà à faiblir de façon importante. L'autonomie s'est alors révélée bien inférieure à celle prévue qui était de 20 minutes. Un test d'autonomie a alors été effectué, donnant comme résultat un temps de fonctionnement d'une quinzaine de minutes au maximum.

Une fois ces modifications effectuées, et sans changer aucun paramètre, il est apparu que l'appareil peut changer radicalement de comportement entre deux mises sous tension. Et cela, que la batterie soit pleinement chargée ou non. Des modifications du comportement des moteurs et donc de l'appareil ont même pu être constatés, juste en mettant le *throttle* en position maximale et en le redescendant. Les modifications dans le programme ont été efficaces vu que plus aucun moteur ne se met à tourner beaucoup trop rapidement de façon systématique, mais des erreurs et comportements non attendus se produisent dès lors de façon aléatoire. Il a néanmoins été possible de faire fonctionner l'appareil de façon convenable une seconde fois, afin de tester les comportements des différentes sorties lors de réglages itératifs à l'aide des *trims* de la télécommande. Les résultats sont très encourageants et sont résumés dans l'annexe V. Ils montrent bien qu'avec des hélices à caractéristiques identiques et une bonne gestion des informations de façon constante, le vol de l'appareil dans de bonnes conditions est possible.

Des tests comparatifs de portance entre les deux types d'hélices à disposition ont été effectués et il apparaît que celles avec un pas à droite ont une portance inférieure de l'ordre de 5% par rapport à celles à pas à gauche, ce qui par conséquent provoque inévitablement un couple plus important entraînant l'appareil dans le sens contraire de leur rotation. De plus, les hélices à pas à droite génèrent des vibrations importantes lorsqu'elles tournent à haute vitesse, ce qui peut handicaper de manière significative la stabilité en vol. En observant les fixations des hélices, il est apparu que les hélices posant problème ne sont pas conçues exactement de la même manière. La partie venant prendre appui sur le support est moins haute, ce qui engendre que le serrage avec le joint élastique n'est pas suffisant et que l'hélice s'adapte au flux d'air qu'elle subit au lieu de l'inverse. Des élastiques plus courts doivent donc être utilisés pour fixer ces hélices. Les vibrations n'ayant alors pas été diminuées à équivalence des hélices à pas à gauche, il a fallu supprimer les traces des éjecteurs du moule d'injection dans lequel les hélices ont été fabriquées. Une fois ces modifications effectuées, les vibrations se sont atténuées pour atteindre la même intensité sur les deux types d'hélices.

La dernière observation faite durant les tentatives de vol est que, bien que les contrôleurs des moteurs soient efficaces, il serait plus agréable pour le pilotage d'avoir une courbe de vitesse des hélices en fonction de la commande beaucoup plus prompte à monter jusqu'à la valeur de décollage de l'appareil, soit en une dizaine de crans au lieu des 25 actuellement nécessaires, puis de monter selon une pente plus faible jusqu'à la portance maximale. Il serait alors possible de piloter l'appareil de manière deux fois plus sensible tout en augmentant les chances d'avoir un cran où l'appareil prend son vol stationnaire.

Ces modifications de comportement sont possibles de deux manières. La première possibilité serait de remanier le programme de commande des sorties de la carte des microcontrôleurs, afin de ne plus envoyer un signal linéaire, mais répondant aux attentes mentionnées plus haut. Des contrôleurs moteurs fabriqués et programmés spécialement pour cette application pourraient également être utilisés afin de supprimer toute la zone de la commande du *throttle* actuellement inutile au vu de la masse à soulever.

*Essai de modification du programme en conséquence:*

Premièrement, il a été nécessaire de connaître la valeur du *throttle* qui engendre la poussée utile au soulèvement de l'appareil. En partant du principe que le *throttle* évolue de manière linéaire entre 1100 et 1875 (cf. annexe III) en fonction de la commande et que la portance désirée est connue, soit un peu plus de 60 grammes, il est possible de définir à l'aide du graphique de portance (figure 36) le nombre de crans théorique équivalent à cette portance. Et, par une règle de trois, la commande à donner au moteur.

$$Thr_v = Thr_{min} + \frac{Thr_{max} - Thr_{min}}{nbm_c} \cdot nb_c$$

$Thr_v = throttle$  pour l'envol [ticks]  
 $Thr_{max} = throttle$  maximum [ticks]  
 $Thr_{min} = throttle$  minimum [ticks]  
 $Nbm_c =$  nombre de crans au maximum [1]  
 $Nbc =$  nombre de crans voulus [1]

La portance de 60 grammes désirée étant atteinte après environ 23 crans, une simple règle de trois suffit à définir la valeur à transmettre au moteur si la linéarité se confirme.

Ce qui donne:

$$Thr_v = 1100 + \frac{1875 - 1100}{33} \cdot 23 \cong 1640$$

D'après ce calcul, la portance à 1640 ticks devrait atteindre environ les 60 grammes

Pour faire ce test, le programme a été modifié de la façon suivante:

```

if (thr < 1200)
{
*fr = thr - (pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL) - yaw + (INT16) (pitch_gyro_rate);
*bk = thr + (pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL) - yaw - (INT16) (pitch_gyro_rate);
*al = thr - (ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL) + yaw - (INT16) (roll_gyro_rate);
*ar = thr + (ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL) + yaw + (INT16) (roll_gyro_rate);
}

else
{
thrl = 1640;

*fr = thr - (pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL) - yaw + (INT16) (pitch_gyro_rate);
*bk = thr + (pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL) - yaw - (INT16) (pitch_gyro_rate);
*al = thr - (ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL) + yaw - (INT16) (roll_gyro_rate);
*ar = thrl;
}
  
```

Il est bon de noter que, dans le mixer, les appellations al et ar désignent respectivement les moteurs droite et gauche et non l'inverse. Les tests de portance en fonction du *throttle* étant faits sur l'aile gauche, c'est la valeur donnée sur le "ar" qui doit être connue et gérée. La commande `get_pulse` a elle été modifiée pour donner les bonnes informations : "Lt" et "Rt" indiquent bien gauche et droite.

La première partie est indispensable pour que, lors de l'allumage, on puisse mettre en fonction les moteurs. Les ESC demandent effectivement de recevoir en même temps que l'allumage la valeur minimale du *throttle*.

La seconde partie donne une consigne, et donc une vitesse, constante au moteur gauche. Ceci permet de vérifier la portance générée par cette commande précise avec le banc de test.

Avec cette configuration, la valeur affichée par la balance est de 124g ce qui donne une portance effective de 62g et donc exactement celle voulue pour le décollage. Afin d'avoir une marge, une valeur palier de 1500 est déterminée, cette valeur sera ensuite additionnée d'un *throttle* supplémentaire calculé de manière adéquate ce qui devrait donner une portance de 50g environ dès le mouvement rapide des moteurs. La valeur limite de 1200 ticks donne comme résultat que le moteur obtient cette portance après seulement 4 crans.

Une fois que les valeurs limites ont été déterminées, le programme a été modifié afin que la totalité des moteurs reçoivent à nouveau la même consigne, mais cette fois le *throttle* utile est calculé de la manière suivante :

$$Thr_u = p + (thr - thr_{min}) \cdot \frac{thr_{max} - p}{thr_{max} - thr_{min}}$$

$Thr_{max}$  = *throttle* maximum [ticks] = 1875  
 $Thr_{min}$  = *throttle* minimum [ticks] = 1100  
 $Thr$  = *throttle* donné par la commande [ticks]  
 $Thr_u$  = *throttle* après modification [ticks]  
 $P$  = valeurs du palier [ticks]

Comme les divisions sont extrêmement lourdes à effectuer pour le microcontrôleur, la valeur donnée par la fraction est calculée une fois pour toute, puis multipliée par  $2^8$ . Cette multiplication permet d'obtenir une bonne précision des résultats de calculs. Le nombre ainsi obtenu est appelé *factor*. Le nouveau est alors calculé comme suit :

$$factor = \frac{(thr_{max} - p) \cdot 256}{thr_{max} - thr_{min}} = \frac{(1875 - 1500) \cdot 256}{1875 - 1100} \cong 142 [1]$$

$$Thr_u = p + \frac{(thr - thr_{min}) \cdot factor}{2^8}$$

La division par 256 est faite par décalage de bit. Cette opération a l'avantage de prendre beaucoup moins de temps qu'une division.

Le code est donc finalement modifié comme suit :

Définition des nouvelles variables :

```
// define thruttle max et min, palier and factor
// the factor is an int calculated so: (thr_max-palier)/(thr_max-
thr_min)*256
UINT16 thrmin = 1100;
UINT16 thrmax = 1875;
UINT16 factor = 124;
UINT16 palier = 1500;
UINT16 thru;
```

Modification des valeurs données au moteur :

```
if (thr < 1200)
{
*fr = thr - (pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL) - yaw + (INT16) (pitch_gyro_rate);
*bk = thr + (pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL) - yaw - (INT16) (pitch_gyro_rate);
*al = thr - (ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL) + yaw - (INT16) (roll_gyro_rate);
*ar = thr + (ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL) + yaw + (INT16) (roll_gyro_rate);
}

else
{
thru = palier + (((UINT32) (thr-thrmin)*factor)>>8);

*fr = thru - (pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL) - yaw + (INT16) (pitch_gyro_rate);
*bk = thru + (pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL) - yaw - (INT16) (pitch_gyro_rate);
*al = thru - (ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL) + yaw - (INT16) (roll_gyro_rate);
*ar = thru + (ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL) + yaw + (INT16) (roll_gyro_rate);
}
```

La dernière modification apportée au programme est l'ajout d'un *delay* lors de la commande spéciale qui éteint les moteurs et refait une mise à zéro du gyromètre. Durant cette phase, les moteurs avant et arrière n'étaient pas arrêtés durant la calibration, ce qui fait que les vibrations de l'appareil sont transmises au gyromètre et cela compromet l'exactitude de la mise à zéro.

Le code dans le main.c est changé de la manière suivante :

```
// left stick left-down most
// disconnect all motors and calibrate gyro again
if ((thr_pulse <= 1130) && (rud_pulse < 1130))
{
    off_green_led();
    mixer_flags |= MIXER_DISC_INPUT_ON;

    __delay_cycles(5000);

    //mixer_flags &= ~(MIXER_IS_ARMED); // is_armed = 0;
    find_gyro_neutral_values(); // calibrate gyro again
}
```

Toutes ces modifications devraient avoir des effets positifs sur le comportement en vol de l'appareil et sur la finesse des commandes.

## 11.2. Deuxièmes essais de vol

Durant les deuxièmes essais de vol, l'appareil ne tournait plus sur lui-même, la seule modification des élastiques et un coup de lime ayant suffi à régler le problème d'instabilité des hélices à pas à droite.

La sensibilité des commandes autour du point d'envol de l'appareil permet un meilleur contrôle du moment du décollage et de la force de portance exercée par les hélices. Les résultats d'un test sur une hélice avec le banc à balance sont résumés ci-après.

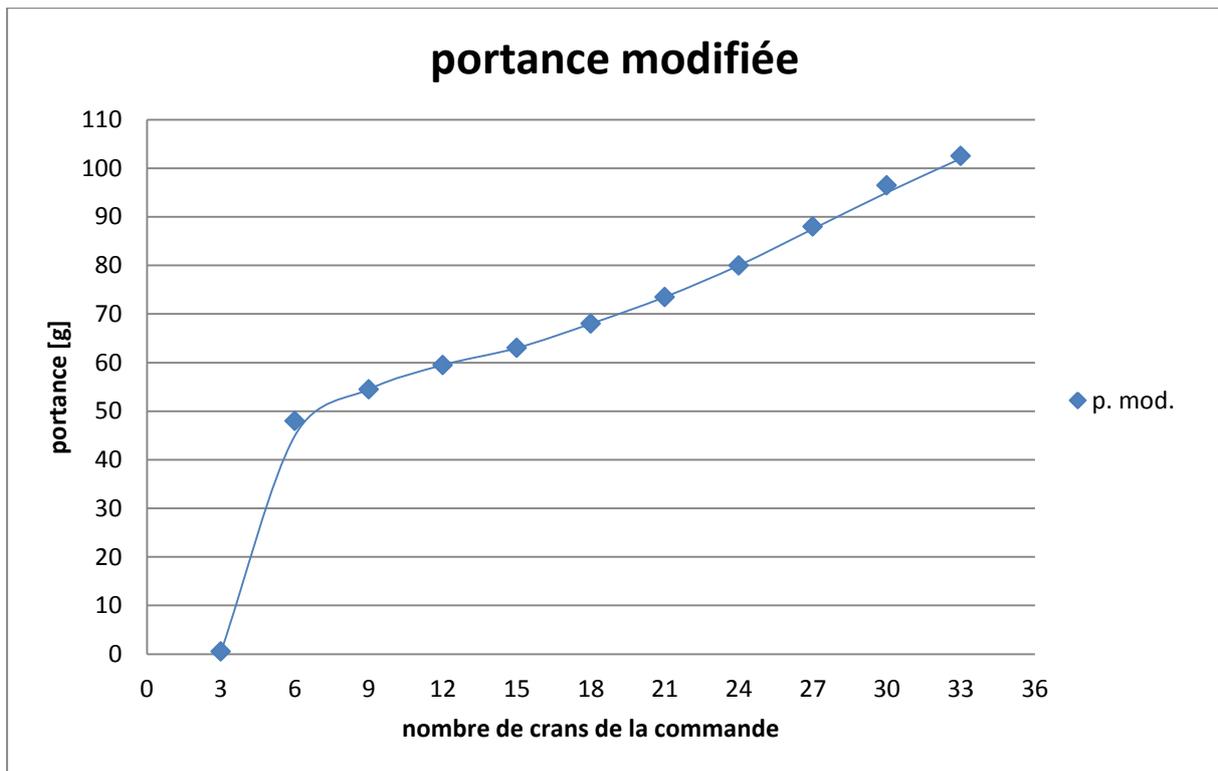


Figure 39 : portance modifiée hélice 5x3

Avec les modifications du programme, la portance pour le décollage est atteinte après seulement 15 crans, contre 25 précédemment. Ceci permet d'avoir une dizaine de crans à disposition pour la descente de l'appareil, et également un tiers de la course pour la commande de montée. Le défaut de cette nouvelle programmation est que si on passe sous les 4 crans nécessaires pour le changement de comportement de moteurs, les hélices ne génèrent subitement plus de portance et l'appareil se retrouve alors en chute libre.

Durant ces essais, l'appareil avait par contre tendance à se pencher d'un côté au moment du décollage. Ensuite il se stabilise dans cette position et ne revient pas à l'horizontal, ce qui a pour conséquence un vol rectiligne jusqu'à ce que l'on réduise la portance et qu'il se pose. Le principal problème est alors que cette direction change de façon aléatoire entre les différents essais effectués. Ce n'est donc pas un simple problème de centre de masse décalé ou de comportement constant d'une hélice ou d'un moteur.

Il a également été constaté que si un gain trop important est donné au gyromètre, celui-ci diminue beaucoup trop les fréquences de rotation des moteurs et donc l'appareil ne peut carrément plus s'envoler.

Divers essais ont menés à trouver une position du potentiomètre qui génère des réactions suffisante aux modifications du vol, sans pour autant enlever trop de force à l'appareil. Comme cette position est en dessous de la moitié, des valeurs de gains différentes ont été programmées.

La valeur du gain est calculée à l'origine de la manière suivante :

```
gain_val = tx_gain_pulse - TX_GAIN_OFFSET;
```

Avec un pulse compris entre 1000 et 1900, et un offset de 900 la valeur du gain est comprise entre 100 et 1000.

Cette ligne est alors modifiée comme suit :

```
gain_val = (tx_gain_pulse >> 1) - TX_GAIN_OFFSET;
```

Avec le même pulse mais cette fois un offset de 200, la valeur est bel et bien comprise entre 300 et 750, ce qui est exactement le but recherché vu que l'amplitude entre les gains extrême est bien de moitié par rapport au programme de base et que le gain désiré se trouve environ au milieu de la course du potentiomètre.

Le comportement des moteurs varie également suivant les commandes données auparavant à l'appareil. Une consigne avec le stick gauche agit correctement sur le moteur, mais lors du retour en position centrale de ce dernier les moteurs ne retrouvent pas exactement la même consigne. Cela entraîne également des difficultés pour contrôler l'appareil de manière efficace.

Des tests ont alors été effectués sur la commande de la manière suivante:

- 1) Mise du *throttle* en position minimale.
- 2) Allumage de la télécommande.
- 3) Prise des valeurs des ticks des différentes commandes.
- 4) Déplacement d'un stick à la fois vers un maximum ou un minimum puis retour au centre.
- 5) Reprise de la valeur des trois commandes perçues par le contrôleur.

Durant ces mesures, (résumées dans l'annexe IV) il est apparu que les valeurs mises pour les *center-pulse* afin d'avoir un départ simultané des moteurs n'étaient pas les valeurs transmises par la télécommande. Des valeurs plus proches des valeurs centrales établies par ces essais ont été mises dans le programme pour optimiser le comportement. Comme on peut le constater, les différences entre les valeurs sont plus importantes que prévues lors des premières modifications, mais leurs positions relatives restent la même. On a donc comme valeurs centrales:

```
#define RUD_CENTER_PULSE_VAL      1518  
#define PIT_CENTER_PULSE_VAL      1473  
#define AIL_CENTER_PULSE_VAL      1523
```

De plus, en constatant que les valeurs transmises lors du retour au centre de la commande peuvent varier d'un peu plus de 10ticks par rapport à la valeur centrale, une valeur de commande est substituée au calcul direct de l'attribution de consignes des moteurs. Cette commande est calculée dès le début du mixer puis, si l'écart à la valeur centrale est inférieur à 20 ticks, la commande est mise à zéro, dans les autre cas elle conserve l'instruction donnée par l'utilisateur. Le programme prend donc la forme suivante :

```
INT32 ail_cmd = ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL;
INT32 pit_cmd = pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL;
INT32 rud_cmd = rud - RUD_CENTER_PULSE_VAL;

if (ail_cmd < 20 && ail_cmd > -20)
    ail_cmd = 0;

if (pit_cmd < 20 && pit_cmd > -20)
    pit_cmd = 0;

if (rud_cmd < 20 && rud_cmd > -20)
    rud_cmd = 0;

(...)

yaw = rud_cmd + copter_config_data.yaw_subtrim + yaw_gyro_rate;

(...)

if (thr < 1200)
{
    *fr = thr - (pit_cmd) - yaw + (INT16) (pitch_gyro_rate);
    *bk = thr + (pit_cmd) - yaw - (INT16) (pitch_gyro_rate);
    *al = thr - (ail_cmd) + yaw - (INT16) (roll_gyro_rate);
    *ar = thr + (ail_cmd) + yaw + (INT16) (roll_gyro_rate);
}

else
{
    thru = palier + (((UINT32) (thr-thrmin)*factor)>>8);

    *fr = thru - (pit_cmd) - yaw + (INT16) (pitch_gyro_rate);
    *bk = thru + (pit_cmd) - yaw - (INT16) (pitch_gyro_rate);
    *al = thru - (ail_cmd) + yaw - (INT16) (roll_gyro_rate);
    *ar = thru + (ail_cmd) + yaw + (INT16) (roll_gyro_rate);
}
```

Cette modification permet de contourner les variations de signal de la télécommande et ainsi d'avoir un comportement beaucoup plus similaire des moteurs lorsque le *throttle* seul est actionné, et après des manipulations à l'aide de la commande.

## 12. Améliorations futures possibles

Dans un éventuel développement de l'appareil, il serait possible dans un premier temps de démonter entièrement le récepteur radio afin de le réduire à ses composants primaires. De plus la plaque supérieure de l'appareil pourrait également être faite en PCB afin de pouvoir définir des tracés électriques directement sur l'appareil et se passer des câbles externes. Ceci aurait pour effet d'assurer une bonne connexion entre les différents éléments et de simplifier grandement le montage et le câblage de l'appareil, les cartes venant directement se fixer sur des points précis et prédéterminés.

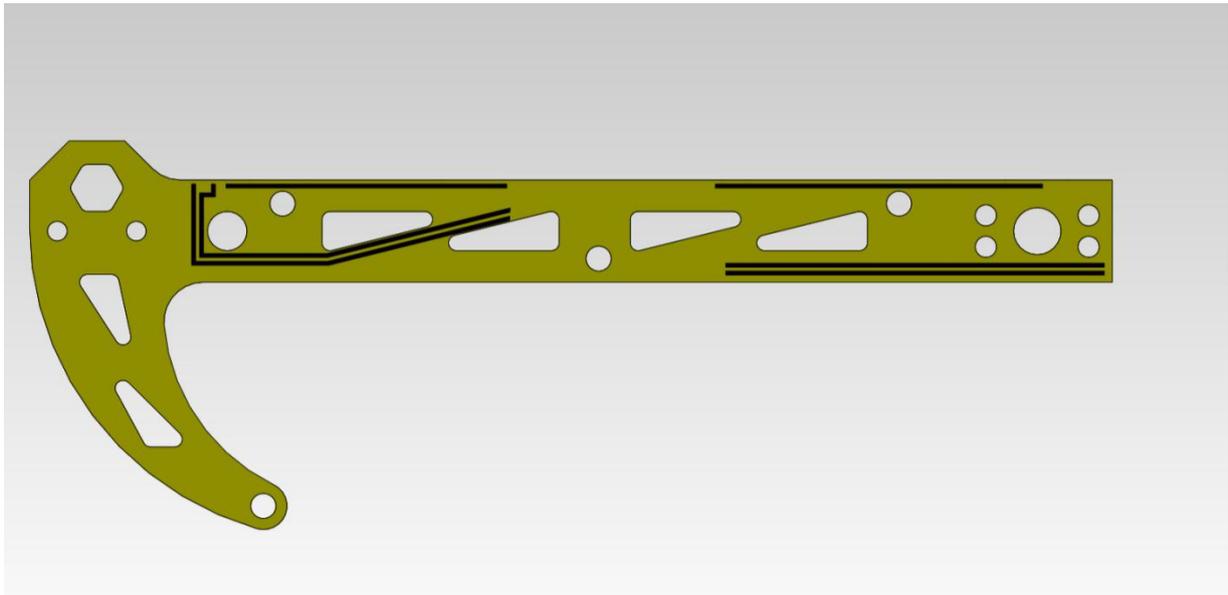


Figure 40 : amélioration carlingue avec tracé électronique

Un autre positionnement de la caméra est également envisageable par la suite pour autant que les comportements des différents moteurs puissent être gérés plus précisément et sur l'entier de leur plage de fonctionnement. Un positionnement à l'avant de l'appareil entre les deux parties de la calandre donnerait une bien meilleure vue de l'orientation de l'appareil ainsi qu'un moyen rapide d'en identifier l'avant tout en restant esthétique.

## 13. Conclusion

Ce travail a permis de démontrer la délicatesse de la conception d'un appareil volant de ces dimensions et du software qui le contrôle. Dans cette étude, la moindre imperfection d'assemblage ou de contrôle des composants élimine directement les possibilités de vol d'un tel appareil.

La complexité a surtout résidé dans la pluridisciplinarité du projet, qui comporte à la fois de la conception mécanique, de la compréhension de fonctionnement de composants électroniques et électromécaniques, et de la programmation sur MSP430. L'entier de ces éléments doit être maîtrisé afin de pouvoir comprendre et paramétrer le vol du quadricoptère.

Bien que l'appareil ne vol par encore comme on aurait pu l'espérer en voyant ses concurrents de la grande distribution, de grands progrès ont été réalisés dans la compréhension des problèmes apparaissant au départ au travers des tests réalisés. La défaillance ou l'imperfection de certains composants électroniques a pu être écartée, et les problèmes venant des éléments non modifiables de l'appareil, tels que la télécommande et l'évolution de la portance des hélices ont pu être contournés grâce à la modification du software de l'appareil.

Durant les tests, il est apparu qu'avec ce type d'appareil ayant une masse très faible, le moindre déséquilibre de la structure ou des forces en présence acquièrent une très grande influence sur l'appareil. Celui-ci ne subit effectivement quasiment aucune force de frottement, alors qu'il est en vol et à vitesse peu élevée. Ainsi, rien que la position des fils de connexion situés sous l'appareil peut avoir une influence.

Il est également apparu que même en prenant des éléments courants du commerce de modélisation, il est impossible de rivaliser avec les appareils produits en grandes séries au niveau du prix global de l'appareil. En effet, en prenant l'exemple de l'AR-drone, il apparait que notre appareil est non seulement presque aussi cher (plus de 250 francs rien que pour les composants), mais possède également des caractéristiques bien moins intéressantes au niveau de la dynamique et des commandes de vol. Ce problème est néanmoins totalement compensé par la satisfaction que procure la création d'un tel appareil, de la modélisation à la programmation en passant par le choix des composants, ainsi que celle qui suit les premiers instants de vol du drone.

Yverdon-les-Bains, le 08 août 2012

Florian Nicolier

# Annexe I : aide-mémoire quadricoptère

---

## *Chargement des batteries*

- Toujours utiliser la housse de protection LIPO-SAFE
- Alimenter le G.T power en 12V DC
- NE JAMAIS court-circuiter la batterie sinon risque de prendre feu
- Allumer le G.T power, vérifier "charg 2cells", 0.8A et appuyer longtemps sur "start"
- Une fois chargement finis (sonnerie) appuyer longtemps sur stop et éteindre l'alimentation
- TOUJOURS rester dans la pièce pendant le chargement!!! (env. une heure)

## *Montage*

- Monter les hélices à pas à gauche sur les moteurs avant et arrière
- Sens de rotation des hélices à pas à gauche = horaire
- Positionner le gyro à plat côté de la carte "pas droit" vers l'avant
- Vérifier que tous les composants soient reliés à une seule et même terre.
- Un seul des câbles noir des ESC peut être connecté à la terre, les deux étant relié dans tous les cas dans le chip. Sinon vérifier que les deux se trouvent bien au même potentiel.
- La batterie alimente les ESC en 7.4V, un d'entre eux alimente le récepteur de la télécommande en 5V qui alimente le gyromètre également en 5V. Ce dernier alimente la carte programmable en 3V.

## *Programme*

- Dans le mixer, les moteurs gauche et droit sont inversés.
- Dans le get\_pulse, ce problème a été corrigé

## *Utilisation*

- Allumer en premier la télécommande puis l'appareil, l'inverse pour éteindre
- Après allumage, pour relancer les moteurs, stick gauche en bas à droite puis au centre
- Pour éteindre les moteurs et refaire une prise de zéro du gyro, stick gauche en bas à gauche

## Annexe II : Infos get\_pulse

---

### #get\_pulse

```
-----
ail pulse = 01509           // valeur commande aileron actuelle "tick"
pit pulse = 01482           // valeur commande pitch actuelle "tick"
thr pulse = 01095           // valeur commande throttle actuelle "tick"
rud pulse = 01492           // valeur commande rudder actuelle "tick"
gain pulse= 00994           // valeur commande gain gyro actuelle "tick"
-----
adc ail = 02292
adc pit = 02194
adc yaw = 02220
ail gyro = 02289            // valeur actuelle gyro aileron
pit gyro = 02190            // valeur actuelle gyro pitch
yaw gyro = 02218            // valeur actuelle gyro yaw
--
Fr Motor = 01118            // valeur actuelle "tick" moteur avant
Bk Motor = 01112            // valeur actuelle "tick" moteur arrière
Lt Motor = 01083            // valeur actuelle "tick" moteur gauche
Rt Motor = 01115            // valeur actuelle "tick" moteur droit
---
x gyro: 02275 – 02311       // valeur min-max gyro roll
y gyro: 02167 – 02221       // valeur min-max gyro pitch
z gyro: 02210 – 02230       // valeur min-max gyro yaw

m1: 01068 – 01894           // valeurs min-max "tick" moteur avant
m2: 01067 – 01871           // valeurs min-max "tick" moteur gauche
m3: 01090 – 01895           // valeurs min-max "tick" moteur arrière
m4: 01082 – 01872           // valeurs min-max "tick" moteur droit
---
mixer flag = 00004
gyro gain = 00094           // gain donné au gyro
```

## Annexe III : linéarité *throttle*

---

Les valeurs des ticks ont été obtenues en faisant un *get\_pulse* à chaque position de télécommande.

crans	ticks
0	1105
3	1181
6	1242
9	1318
12	1386
15	1464
18	1524
21	1597
24	1677
27	1746
30	1816
33	1877

Les tensions ont été relevées au Voltmètre directement sur la sortie de la carte.

crans	tension
0	810
3	870
6	915
9	950
12	977
15	1017
18	1058
21	1100
24	1151
27	1192
30	1231
33	1267

## Annexe IV : stabilité commande centrale

commande	all	min d	max d	min d	max d	min d	max d	min l	max l	min l	max l	min l	max l
ail	1523	1520	1522	1522	1524	1524	1524	1523	1522	1520	1522	1521	1521
pit	1482	1456	1487	1458	1488	1457	1488	1468	1474	1474	1476	1472	1477
rud	1515	1515	1518	1521	1523	1522	1521	1521	1523	1523	1523	1523	1521

Explications: All = allumage Max d et min d = après minimum et maximum, retour doux Max l et min l = après minimum et maximum, retour lâché

après différent allumages (positionné au centre):

essai	1	2	3	4	5	centre
ail	1522	1523	1524	1522	1524	1523
pit	1481	1482	1465	1466	1473	1473
rud	1517	1520	1518	1519	1518	1518

## Annexe V : mesures brutes tests hélices

crans \ g balance	4x2.5			5x3		
	essai 1	essai 2	essai 3	essai 1	essai 2	essai 3
3	0	0	0	0	0	0
6	9	10	6	12	8	9
9	23	21	21	28	27	24
12	37	34	34	43	44	42
15	44	46	46	60	61	60
18	61	60	59	79	79	76
21	71	70	71	101	103	100
24	91	88	90	131	133	132
27	110	107	108	157	158	157
30	129	130	129	185	185	186
33	145	147	146	207	210	207

crans \ g balance	6x3			7x3.5		
	essai 1	essai 2	essai 3	essai 1	essai 2	essai 3
3	0	0	0	0	0	0
6	8	10	8	6	8	7
9	26	29	23	30	31	31
12	43	47	43	47	46	46
15	60	60	59	68	69	68
18	82	78	80	91	95	94
21	105	100	109	124	127	126
24	141	134	146	158	159	161
27	168	163	169	179	182	181
30	195	190	188	203	204	203
33	210	206	202	218	222	222

## Annexe VI : essais de portance monté

4 moteurs, même hélice (pas à gauche)				
crans \ g balance	avant	gauche	arrière	droite
3	3	4	5	4
6	15	16	18	16
9	33	34	36	36
12	49	51	52	50
15	72	70	71	69
18	88	93	90	89
21	118	116	115	114
24	146	147	149	146
27	174	171	175	168
30	198	195	197	197
33	208	205	208	208

même moteur (gauche) différentes hélices				
Clic \ g balance	1 p gauche	2 p gauche	1 p droite	2 p droite
3	4	3	6	3
6	16	13	19	21
9	34	28	36	37
12	51	45	49	50
15	70	64	64	65
18	93	81	90	87
21	116	115	113	111
24	147	144	139	136
27	171	170	161	158
30	195	194	184	182
33	205	208	199	198

## Annexe VII : références des composants

Composant	Modèle (N° fournisseur)	Fournisseur	Qté
Télécommande	FS-CT6B	Fly Sky	1
Récepteur	FS-R6B	Fly sky	(1)
Gyromètre	-	Nintendo	(1)
Carte de commande	eZ430-RF2500	Texas Instrument	1(1)
Contrôle moteurs	Turnigy Plush 6A (TR-6A)	Hobby King	2(4)
Contrôle moteurs	Hobbyking SS Series (HK-SS10A)	Hobby King	8
Batterie 800mAh 2cells	Zippy flightmax (Z8002S20C)	Hobby King	2
Moteur Ø14	Hextronik 5gram (HXM1400-2000)	Hobby King	4
Moteur Ø18	Micro Brushless Outrunner (1811-2000)	Hobby King	3(4)
Moteur Ø18 plat	AX 1304N 2100kv (AX-1304N2100)	Hobby King	5
Hélices 3 pouces g	Hélice pas fixe 3x2 (H3011A)	Hobby King	6
Hélices 3 pouces d	Hélice pas fixe 3x2 (H3012A)	Hobby King	6
Hélices 4 pouces g	Hélice pas fixe 4x2.5 (H4011A)	Hobby King	8
Hélices 4 pouces d	Hélice pas fixe 4x2.5R (H4012A)	Hobby King	8
Hélices 5 pouces g	Hélice pas fixe 5x3 (H5011A)	Hobby King	5(2)
Hélices 5 pouces d	Hélice pas fixe 5x3 R (H5012A)	Hobby King	3(2)
Hélices 6 pouces g	Hélice pas fixe 6x3 (H6011A)	Hobby King	5
Hélices 7 pouces g	Hélice pas fixe 7x3.5 (H7011A)	Hobby King	5
Hélices 7 pouces d	Hélice pas fixe 7x3.5 R (H7012A)	Hobby King	5
Chargeur batterie	G.T. power A8 (GT-A8)	Hobby king	1
Interrupteur coudé	Commutateur à bascule (2A11-N2F2H9AE)	Distrelec	4(1)
Plaque PCB	Carte circuit imprimé simple face (458028)	Distrelec	3(4)
Visserie Nylon M2.5x6	Vis M2.5x6 tête fendue (050 0206 000 02)	Skiffy	Env. 200
Caméra	micro Caméra sans fil CMOS 380 (ZT-811T)	camera-espion.com	(1)
Câble vidéo	Grabby Câble PC USB (USB2)	camera-espion.com	1
Sac protection lipo	(83P-LiPo-GUARD-25x33cm-BAG)	Hobbypartz	1

Les quantités marquées entre parenthèses sont celles actuellement montée sur l'appareil alors que les sans parenthèse sont celles restant en stock.

## Annexe VIII : extrait du main.c modifié

---

```
void process_stick_input_commands()
{
    static UINT16 ticks = 0;

    // left stick left-down most
    // disconnect all motors and calibrate gyro again
    if ((thr_pulse <= 1150) &&
        (rud_pulse < 1320))
    {
        off_green_led();
        mixer_flags |= MIXER_DISC_INPUT_ON;

        //mixer_flags &= ~(MIXER_IS_ARMED);    // is_armed = 0;
        find_gyro_neutral_values();    // calibrate gyro again
    }

    // left stick right-down most.
    // reconnect all motors
    if ((thr_pulse <= 1150) &&
        (rud_pulse > 1670))
    {
        on_green_led();
        mixer_flags &= ~MIXER_DISC_INPUT_ON;
    }

    // left stick: left down corner + right stick right up corner: save the
    stats
    if ((thr_pulse <= 1150) && (rud_pulse < 1320) &&
        (ail_pulse > 1600) && (pit_pulse > 1600))
    {
        // protection mechanism to prevent continuous flash writing
        // when user keeps holding the sticks at the correct positions.
        // only allow flash write once per 30 seconds.
        // this function is being called every 5ms (depending on
TMR_A_PERIOD)
        if (ticks == 0)
        {
            write_flash(FLASH_CONFIG_ADDR,
                        (char*)&copter_config_data,
sizeof(copter_config_data));
            ticks = 6000;    // about 30 seconds with 5ms tick
        }
    }
    //release the flash write protection mechanism by counting down on
writes
    if (ticks > 0) ticks--;
    /*
    // left stick: left down corner + right stick left up corner: clear the
    stats
    if ((thr_pulse <= 1150) && (rud_pulse < 1320) &&
        (ail_pulse < 1400) && (pit_pulse > 1600))
    {
        clear_stats();
    }
    */
}
```

---

# Annexe IX: extraits mixer et cmd modifié

---

## Mixer.h

```
// some constants that deal with radio signal
// #define CENTER_PULSE_VAL          1520          // Futaba / Hitec system
#define CENTER_PULSE_VAL          1500          // Other radios
#define RUD_CENTER_PULSE_VAL      1518
#define PIT_CENTER_PULSE_VAL      1473
#define AIL_CENTER_PULSE_VAL      1523
```

(...)

```
#define TX_GAIN_OFFSET            (200)
```

## Mixer.c

(Dès ligne 52)

```
// define thruttle max and min, palier and factor
// the factor is an unsigned int calculated so: (thr_max-palier)/(thr_max-
thr_min)*256
UINT16 thrmin = 1100;
UINT16 thrmax = 1875;
UINT16 factor = 124;
UINT16 palier = 1500;
UINT16 thru;
```

(...)

(Dès ligne 87)

```
INT32 ail_cmd = ail - AIL_CENTER_PULSE_VAL;
INT32 pit_cmd = pit - PIT_CENTER_PULSE_VAL;
INT32 rud_cmd = rud - RUD_CENTER_PULSE_VAL;

if (ail_cmd < 20 && ail_cmd > -20)
    ail_cmd = 0;

if (pit_cmd < 20 && pit_cmd > -20)
    pit_cmd = 0;

if (rud_cmd < 20 && rud_cmd > -20)
    rud_cmd = 0;
```

(...)

(Dès ligne 109)

```
// Add tx_gain_pulse to a number to get the desired gain value
gain_val = (tx_gain_pulse >> 1) - TX_GAIN_OFFSET;
```

(...)

(Dès ligne 159)

```
if (thr < 1200)
{
    *fr = thr - (pit_cmd) - yaw + (INT16) (pitch_gyro_rate);
    *bk = thr + (pit_cmd) - yaw - (INT16) (pitch_gyro_rate);
    *al = thr - (ail_cmd) + yaw - (INT16) (roll_gyro_rate);
    *ar = thr + (ail_cmd) + yaw + (INT16) (roll_gyro_rate);
}

else
{
    thru = palier + (((UINT32) (thr-thrmin)*factor)>>8);

    *fr = thru - (pit_cmd) - yaw + (INT16) (pitch_gyro_rate);
    *bk = thru + (pit_cmd) - yaw - (INT16) (pitch_gyro_rate);
    *al = thru - (ail_cmd) + yaw - (INT16) (roll_gyro_rate);
    *ar = thru + (ail_cmd) + yaw + (INT16) (roll_gyro_rate);
}
```

*Cmd.c*

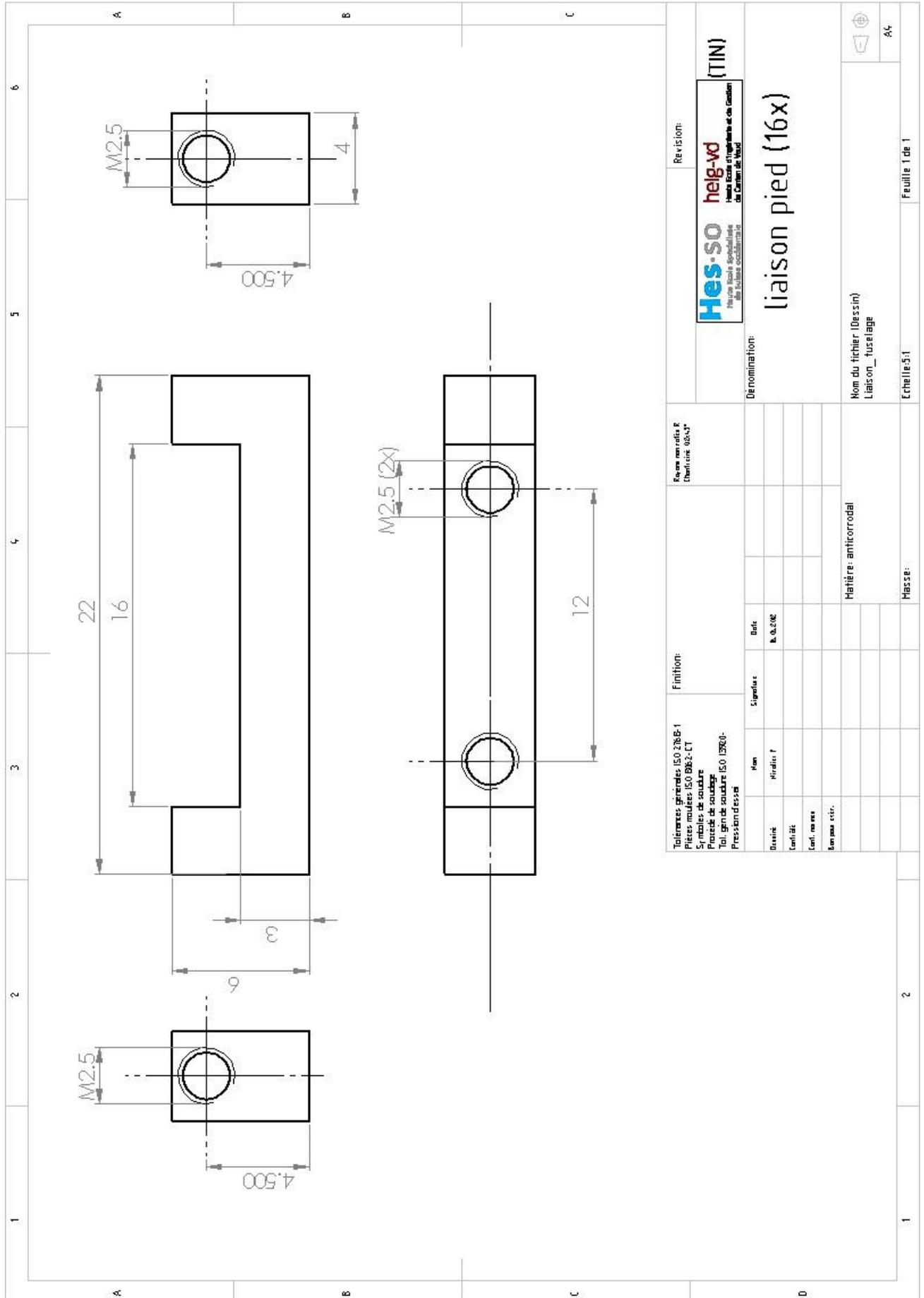
(dans show\_info avant dernière ligne)

```
tx_string("\n\rgyro gain=",15);printU16((tx_gain_pulse<< 1)-TX_GAIN_OFFSET)
```

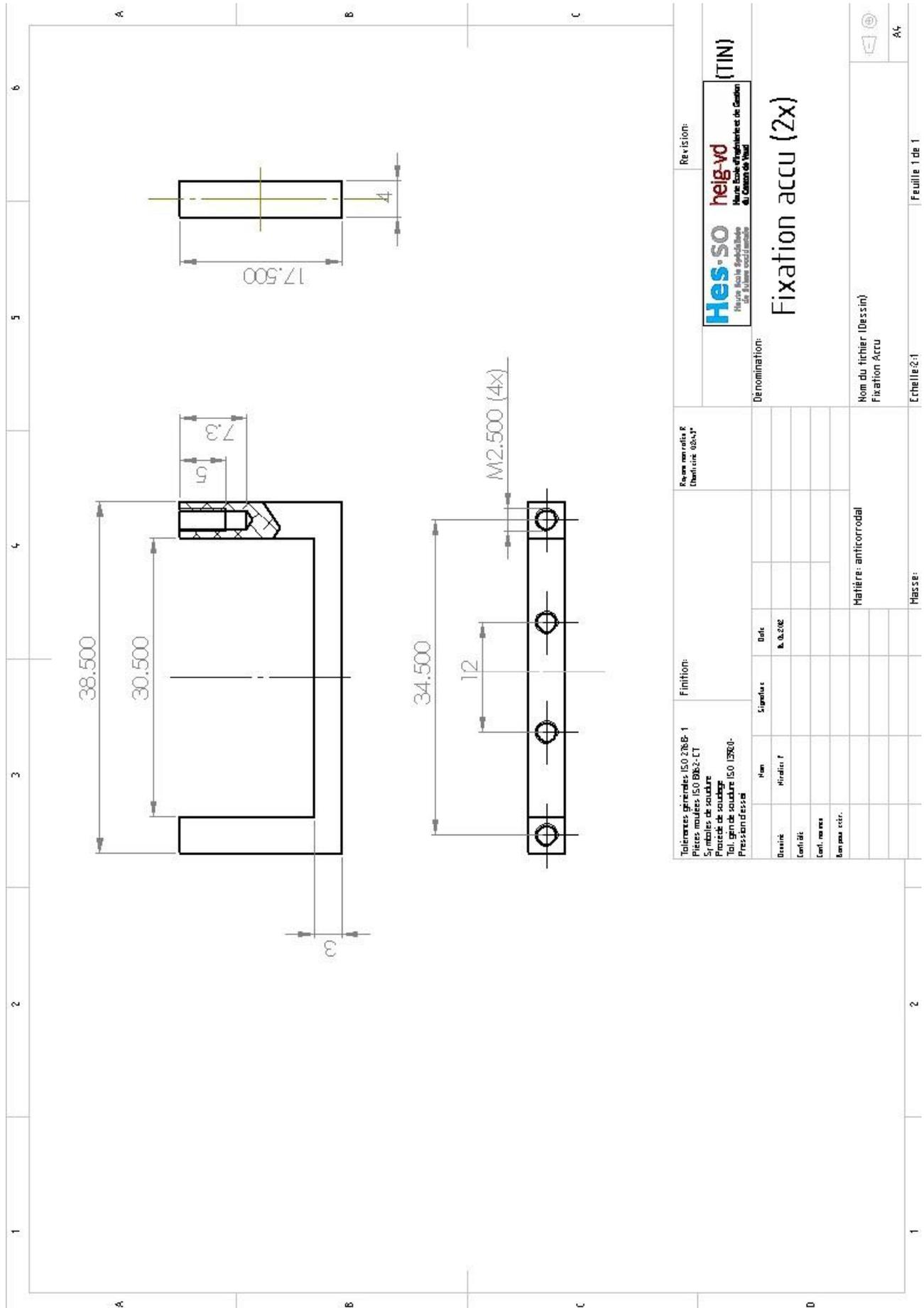








<b>Tolérances générales ISO 2768-1</b> Pièces moulées ISO 2832-CT Symboles de soudure Procédé de soudure Tol. gén. de soudure ISO 15601- Pression d'essai		Finition: R. 0.200		Revenir au rôle R Définition: 08-11*		Revisions: heig- <b>vd</b> Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (TIN)	
Dessiné Conformité Contr. matière Ben pour vérif.	Nom Miralini, F	Signatures	Date 08.08.2012	Dénomination: <b>liaison pied (16x)</b>			
Matière: anticorrosionnel				Nom du fichier (Dessin) Liaison_tuselage			
Masse:				Echelle: 5:1			
1				2			



**Hes-so heig-vd**  
Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion  
du Canton de Vaud

Revision:

(TIN)

Denomination:  
**Fixation accu (2x)**

Revue matérielle R

Dessiné: 08.04.12

Finition:

Tolérances géométriques ISO 2768-1  
Pièces moulées ISO 2768-2  
Serrures de soudure  
Précision de soudure  
Tolérances de soudure ISO 2768-3  
Précision d'essai

Matériau: anticorrosion

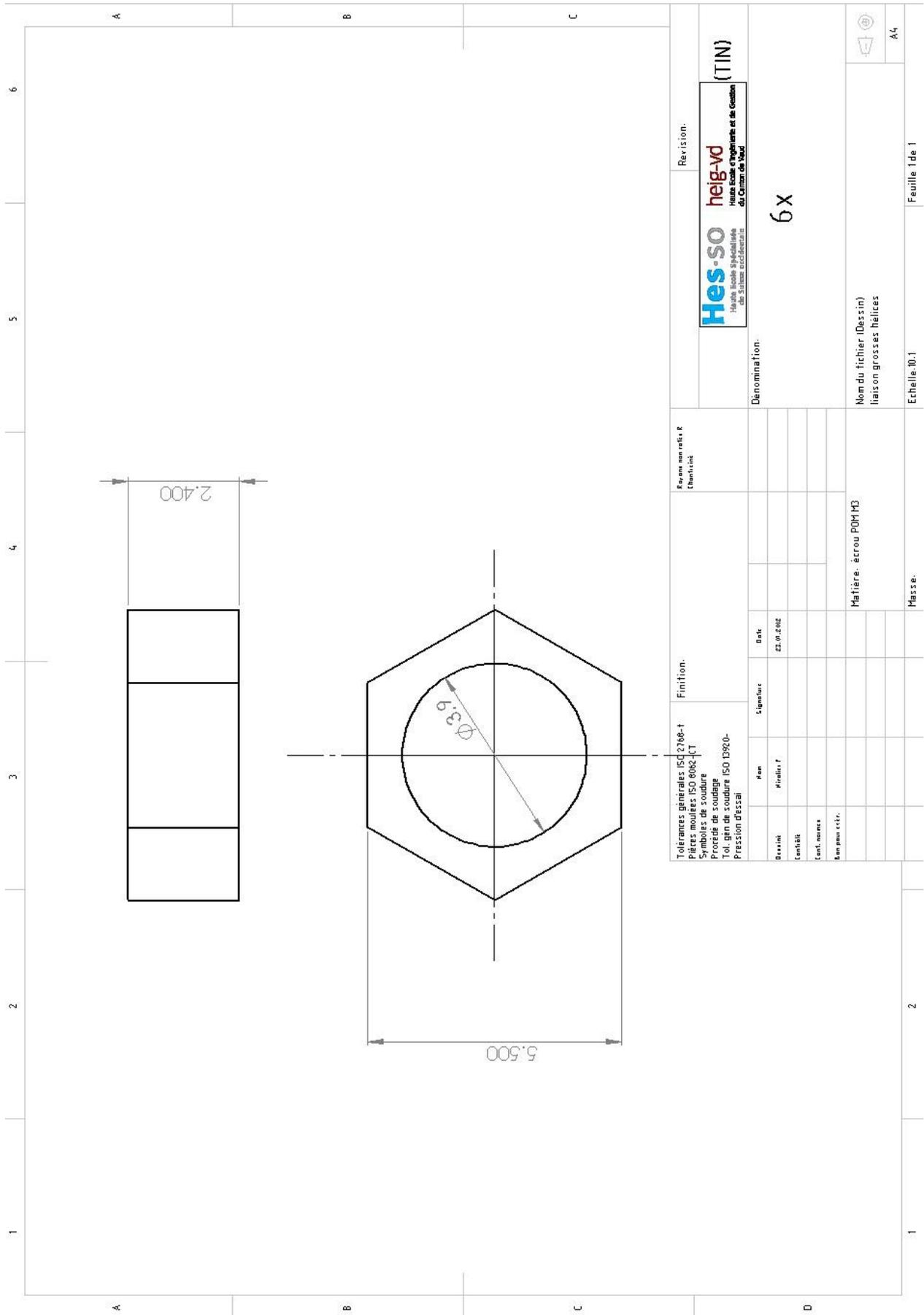
Matériau: anticorrosion

Date:

08.04.12

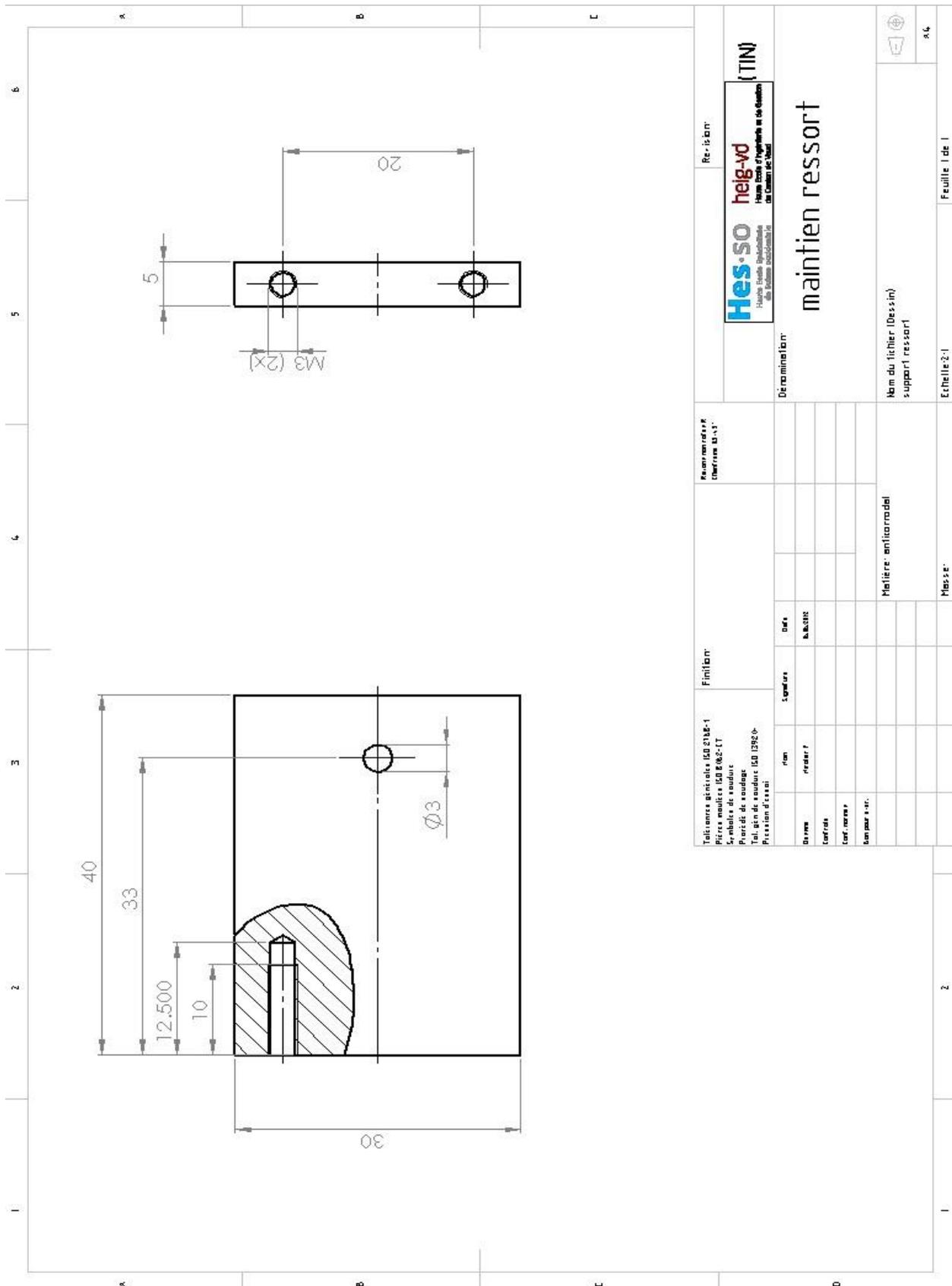
Signature:

Matériau: anticorrosion

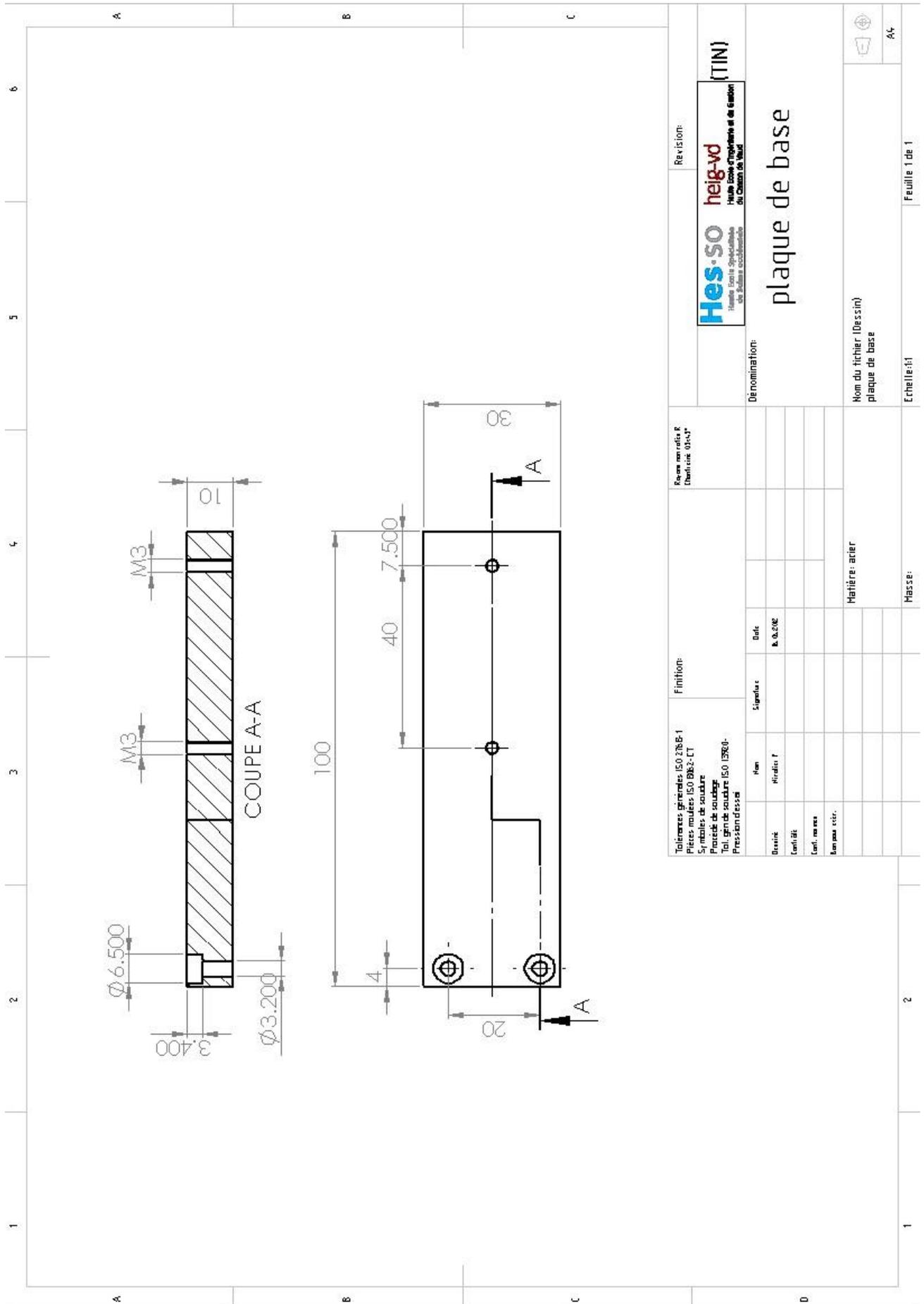


Tolérances générales ISO 2768-t Pièces moulées ISO 6082-CT Symboles de soudure Priorité de soudage Tol. géom de soudure ISO 13920- Pression d'essai		Finition:		Revenir aux cotes R (chiusi int)		Revision:	
Dessiné:		Signé:		Date: 25.01.2012		Hes-so heig-vd Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (TIN)	
Contrôlé:		Matière: acrou POMM3		Dénomination:		6x	
Contrôle:		Masse:		Echelle: 10:1		Feuille 1 de 1	
Autre:		Nom du fichier: (Dessin) liaison grosses hélices		A4		(TIN)	

# Annexe XI : plans Banc à glissière

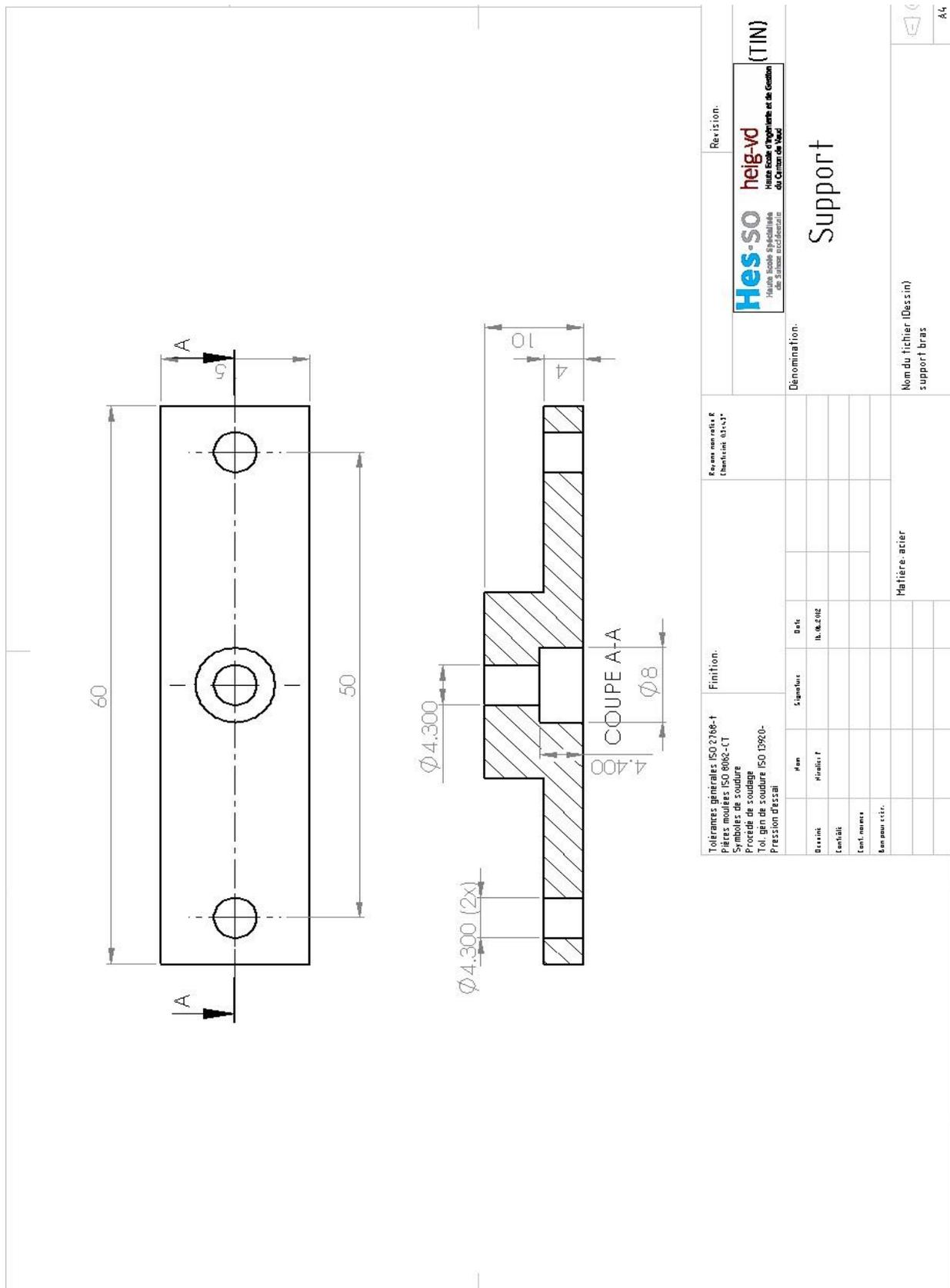




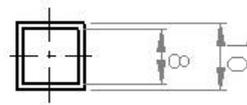


<p>Tolérances géométriques ISO 17878-1 Pièces moulées ISO 1983-11 Symboles de soudure Procédés de soudage Tol. géom. soudure ISO 13700- Pression d'essai</p>		<p>Revue non cotée R Dessinateur 034-V</p>		<p>Revision: <b>Hes-so heig-vd</b> Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (TIN)</p>	
<p>Finition:</p>		<p>Dénomination: <b>plaque de base</b></p>		<p>Nom du tichier (Dessin): plaque de base</p>	
<p>Matériau: acier</p>		<p>Échelle: 1:1</p>		<p>Feuille 1 de 1</p>	
<p>Masses:</p>		<p>Échelle: 1:1</p>		<p>Feuille 1 de 1</p>	

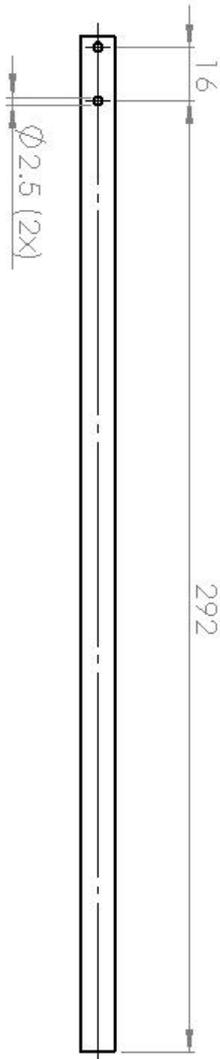
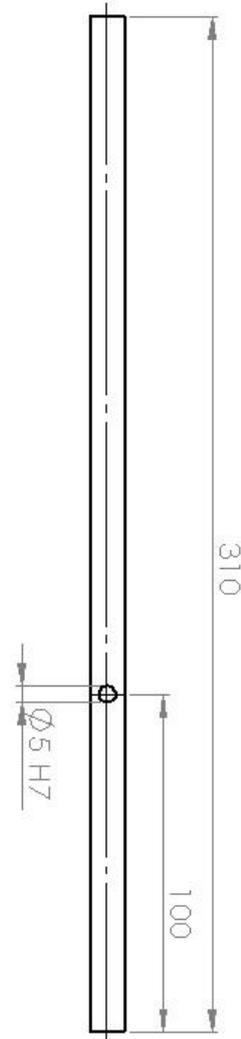
# Annexe XII : Plans banc à balance







Echelle 1:1



Tolérances générales ISO 2768-B Pièces moulées ISO 8062-CT Symboles de soudure Procédé de soudage Tol. gén. de soudure ISO 13920- Pression d'essai		Finition	Remarque(s) Caractéristique 0.25/17
Base de Conditio Ent. nomm Remarq. extér.	Non Révisé: 1	Signature	Date 29.07.2012
Dénomination:  <b>Balancier</b>		Révision:  (1/1)	
Matière: profilé alu		Nom du fichier (Dessin): balancier	