

La démarche de projet en STI2D : Etude et réalisation d'un quadricoptère

PIERRE CAYEZ

Professeur de Génie Mécanique Productique : 178 chemin de la Motte 83560 La Verdière

ALEXANDRE CHAUCHOT

Professeur de Génie Mécanique Productique : Lycée Vauvenargues 60 bd Carnot 13100 Aix en Provence

Résumé : cet article aborde la démarche de projet au travers de l'étude d'un quadricoptère. De nombreux points de programme y sont traités (l'analyse fonctionnelle, l'étude des phénomènes vibratoires, la résistance des matériaux, la modélisation et la simulation mécanique, la réalisation de prototype, la commande en boucle fermée,...) pour répondre aux enjeux de la filière :

- ✓ modifier les orientations des formations existantes en les engageant dans la voie du développement durable,
- ✓ rester attractif,
- ✓ décroiser les enseignements, notamment les enseignements techniques,
- ✓ adopter une pédagogie de projet,
- ✓ se familiariser aux nouveaux outils de conception d'un technicien.

La démarche expérimentale est privilégiée pour valider les solutions retenues.

1. Introduction et contexte pédagogique

Le quadricoptère est connu de la plupart de nos élèves et revêt de nombreux atouts. C'est un système pluridisciplinaire, attrayant, il ne nécessite pas un budget excessif (300€ par groupe de 4-5 élèves) et sa maquette peut être facilement réalisée puis exploitée (Figure 1).

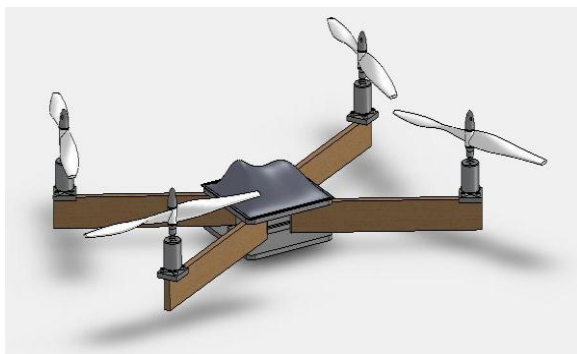


Figure 1 : Modèle numérique de la maquette réalisée par les élèves

1.1. Bienvenue dans le monde du DIY (Do It Yourself)

Le produit commercial le plus connu (AR DRONE de la société PAROT) est le plus emblématique mais une littérature foisonnante ainsi qu'une multitude de sites de modélisme [réf. 1] décrivent des réalisations tout aussi intéressantes que ce quadricoptère, allant du

tricoptère à l'octocoptère dans un jargon qu'il convient de s'approprier comme les mouvements d'un aéronef (Figure 2). Dans l'académie d'Aix-Marseille, pas moins de trois lycées se sont lancés dans la construction de tels drones.

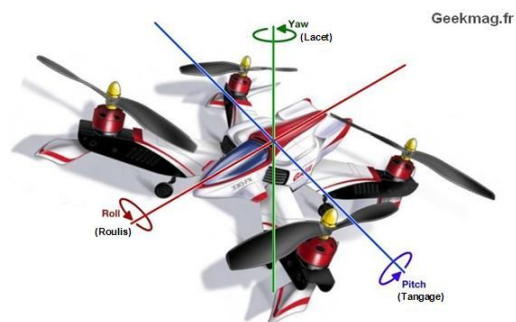


Figure 2 : Les mouvements d'un drone

1.2. Le contexte pédagogique

Au lycée Vauvenargues d'Aix en Provence, le quadricoptère a fourni le thème du second projet de 1^{ère} STI2D. Le premier projet avait été orienté sur l'« éco-conception » et avait permis d'aborder l'utilisation d'outils de conception comme Solidworks. Dans ce second projet, les aspects techniques et les outils mis en œuvre sont plus délicats à appréhender mais la pédagogie de projet reste la plus adaptée pour garder l'adhésion des élèves. Dans une classe de 12

élèves, chaque groupe (4 ou 5 élèves) a en charge la réalisation d'un prototype.

Le projet réalisé pendant 4 mois à raison de 5 heures par semaines (correspondant aux heures de spécialité) est organisé de la manière suivante :

- 1 semaine pour l'analyse du besoin,
- 1 semaine pour la spécification des fonctions et la rédaction du cahier des charges fonctionnel,
- 3 semaines pour la conception globale du système et la rédaction d'un FAST,
- 6 semaines pour la conception détaillée avec des tests sur les fonctions,
- 4 semaines pour l'intégration des fonctions et la réalisation d'un prototype.

La démarche en V (Figure 3) est sous jacente, chaque fonction nécessitant un essai sur une maquette.

Le budget est limité à 300€ par prototypes.

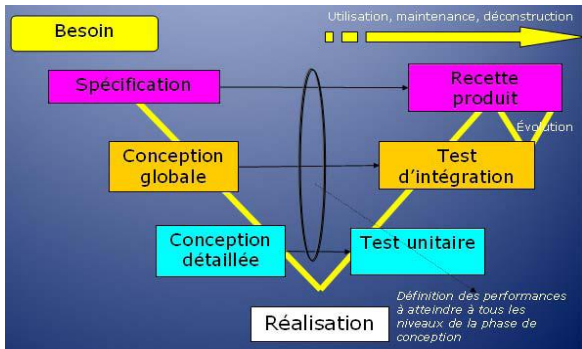


Figure 3: Démarche en V

1.3. Do you speak English?

Au delà de l'évidence de l'intérêt de ce projet pour les domaines scientifiques et techniques, on constate que l'anglais technique est omniprésent. Toutes les notices sont rédigées en anglais car la plupart du matériel qui a été acheté provient de chine (le pays des terres rares) et les élèves ont bien compris que cette langue est incontournable. En voilà quelques exemples.

An ESC : Electronic Speed controller : variateur de vitesse électronique,

An IMU : an Inertial Movement Unit : une centrale inertielle,

The throttle : l'accélérateur,

The BEC : Battery Elimination Circuit : il s'agit d'un régulateur de tension inclus dans le variateur qui permet d'alimenter la carte de commande en 0-5V et évite ainsi le recours à une alimentation externe.

A GUI : Grafic User Interface : une interface graphique

2. Le suivi du projet

La carte mentale (Figure 4) est un outil précieux pour assurer le suivi du projet. Réalisée avec Xmind, elle donne une vision synthétique lors des revues de projet qui ont lieu toutes les 3 semaines environ. Elle est alimentée par l'enseignant à partir des documents fournis par les élèves notamment. Documents, liens, maquettes et résultats y figurent sous la forme d'une arborescence en forme d'étoile.

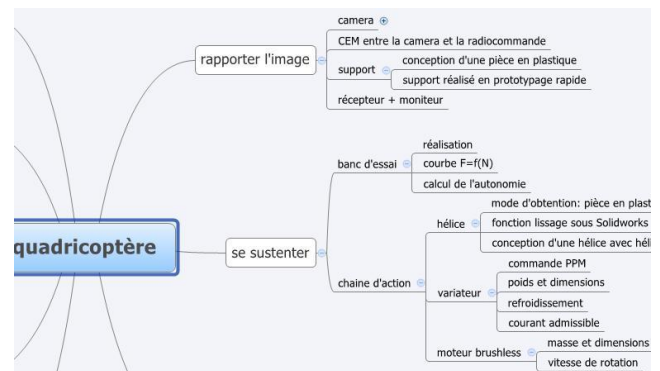


Figure 4: Carte mentale partielle

3. De l'expression du besoin au cahier des charges fonctionnel

Le besoin est réel : inspection de façades, d'édifices, de sites isolés... L'analyse fonctionnelle est indispensable et doit être le fruit d'une réflexion commune qui prend la forme d'un brainstorming. L'ensemble des élèves s'accorde alors sur l'élaboration du diagramme pieuvre (figure 5) et l'identification des fonctions de service (figure 6).

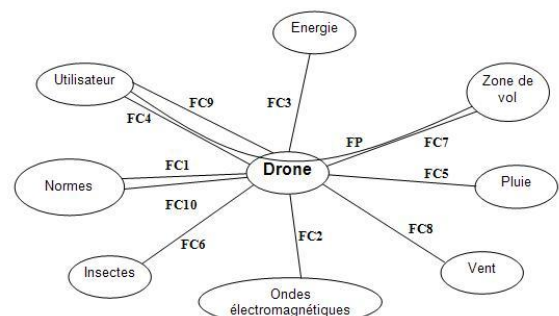


Figure 5 : Diagramme pieuvre

FC1	Etre éco-conçu (respecter les normes environnementales)
FC2	Etre imperturbable en milieu urbain
FC3	Etre autonome en énergie
FP	<u>Permettre de surveiller une zone à distance</u>
FC4	Etre facile d'entretien
FC5	Résister à la pluie et la poussière
FC6	Résister aux impacts d'insectes
FC7	Eviter les collisions
FC8	Etre stable en milieu venté
FC9	Plaire à l'utilisateur
FC10	Respecter les normes de sécurité

Figure 6 : Les fonctions de service

La caractérisation des fonctions est plus délicate puisqu'il s'agit d'énoncer des critères quantifiables et de déterminer le niveau de performance à atteindre ou à ne pas dépasser. L'accent est mis sur la définition des critères. L'expertise de l'enseignant est à ce stade indispensable. Enfin, les élèves habitués à manipuler ou voir des quadricoptères, ont facilement fixé les niveaux.

Etre autonome en énergie	Autonomie en vol stationnaire	10 min \pm 2 min
	Déplacement maxi à vitesse de croisière	2 km mini
<u>Permettre de surveiller une zone à distance</u>	Distance de la zone à surveiller	100 m en ville
	Changer rapidement de direction	1 s pour passer de 0 à 30° sur un axe (dépassement autorisé de 10%)
	Type de déplacement permis	Manœuvrabilité totale 6 ddm
	Dimension du drone (hors tout)	60 cm x 60 cm maxi
	Qualité d'observation	6000 pixels
	Vitesse d'élévation	1 m/s

Figure 7: Cahier des charges fonctionnel

Cette démarche de spécification n'est pas nouvelle pour les élèves puisqu'elle est enseignée dès le collège.

Recherche de solutions constructives

Pour faire l'analyse fonctionnelle interne le diagramme FAST (Figure 8) reste d'actualité du moins chez les mécaniciens. Chaque fonction doit y être détaillée. Pour cette étude, il a été choisi de partir des solutions données par l'enseignant et de créer le diagramme en se demandant pourquoi ces solutions avaient été retenues (rétro conception). Cette démarche est plus simple pour les élèves d'autant qu'ils ont travaillé en groupe sur cette tâche et ont pu ainsi confronter leurs idées.

DIAGRAMME FAST partiel du DRONE

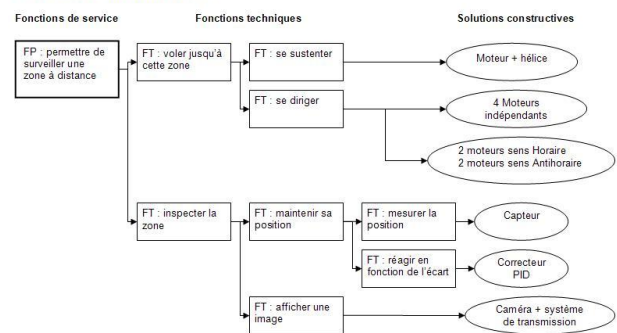


Figure 8: Diagramme FAST partiel du Drone

4. La conception

4.1. Se sustenter

a) un peu d'aérodynamique

L'hélice, permet de générer la force nécessaire à la sustentation de l'engin (force de « poussée ») à partir d'un mouvement de rotation. Les lois de l'aérodynamique permettent de concevoir des formes d'hélices efficaces pour assurer le déplacement des avions et autres engins susceptibles de se mouvoir dans les airs. Le logiciel Heliciel est dédié à la conception des hélices et turbines et son site [réf. 2] constitue une mine d'informations sur le choix du nombre de pales, leurs formes,...

Avec les élèves, on définit sur un profil d'aile la poussée et la traînée (Figure 9) préalable à la création du modèle numérique de l'hélice sous Solidworks.

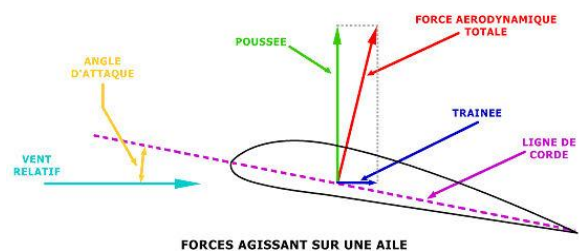


Figure 9: Forces agissant sur une aile

Malheureusement, même si on peut trouver un grand nombre de profils NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) sur internet [réf. 3] le choix en matière d'hélice se résume bien souvent à la dimension de l'axe du rotor et au coloris. Les profils sont eux davantage le résultat des contraintes liées au procédé d'injection plastique. Les élèves en autonomie ont suivi pas à pas les étapes leur permettant de modéliser l'hélice sous Solidworks (Figure 10).

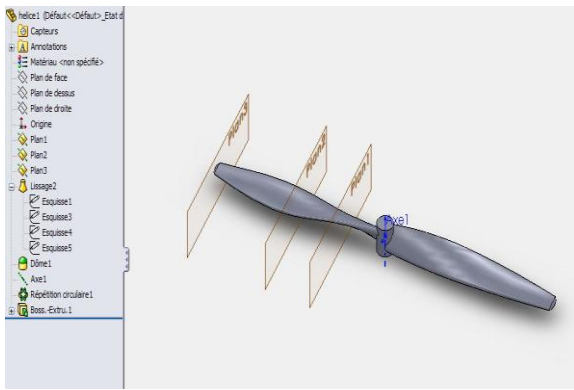


Figure 10: Solidworks : TD créer une hélice

Pour le choix d'une motorisation, les critères étant, une grande vitesse de rotation, un bon rendement énergétique, un bon rapport poids/puissance, une bonne dynamique; le moteur brushless et son convertisseur s'imposent. Une source de tension continue est nécessaire pour le convertisseur. La tension d'alimentation doit être aux alentours de 12V. La chaîne d'action (Figure 11) est un modèle du genre. Sur les éléments réels, la dimension des fils permet de faire la différence entre information et énergie.

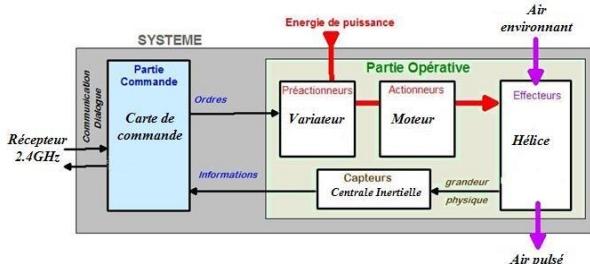


Figure 11: La chaîne d'action

b) Détermination de la poussée

La « poussée » est une fonction de la vitesse de rotation mais quelle est son expression? En STI2D, préférant une approche expérimentale, nous réalisons un banc de mesure qui prend la forme ci-dessous. (Figure 12)

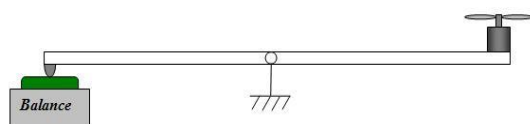


Figure 12: le banc d'essai moteur

Pour différents régimes moteur (fonction croissante de la largeur de l'impulsion τ envoyée au variateur), on relève le courant absorbé, la vitesse de rotation ainsi

que la poussée donnée en kg sur la balance (Figure 13).

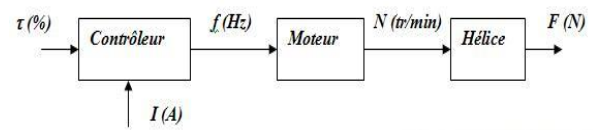


Figure 13: Les grandeurs mesurées

Après traitement des données, on obtient le graphique suivant :

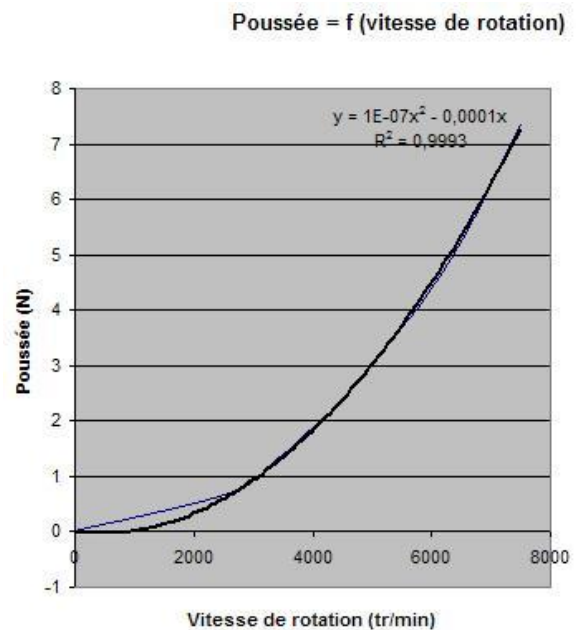


Figure 14: Feuille de calcul Excel

L'engin muni de 4 moteurs pourra donc peser jusqu'à 3kg.

Bien que le courant absorbé par le moteur soit lié au couple fourni donc à l'effort de trainée, il n'est reste pas moins vrai que pour un régime moteur établi il devient une fonction polynomiale du régime moteur soit $I = 4.10^{-11}.N^3 - 2.10^{-7}N^2 + 0,0005.N - 0,0054$ (Avec I en Ampère et N en tr/min)

Les courbes de tendance sont obtenues grâce à Excel (Figure 14).

4.2. Etre autonome en énergie

a) Quelle technologie de batteries ?

Des recherches sur internet puis une mise en commun ont permis de faire une liste assez complète des accumulateurs disponibles sur le marché avec leurs avantages et inconvénients. On retrouve les technologies à base de plomb, de Nickel (Ni-Cd, Ni-MH), ou de Lithium (Li-ion et Li-Po). Le critère principal de sélection étant la densité massique de

stockage notre choix s'est porté vers la technologie Li-Po. Trois cellules de 3.7V seront nécessaires pour approcher les 12V nécessaires au variateur.

Le site des accu-rechargeables [réf. 4] et une vidéo sur le lithium [réf. 5] sont à ce sujet des ressources intéressantes.

Attention, ce choix (Li-Po) engendre l'achat d'un chargeur de qualité et de connecteurs spécifiques.

b) Calcul de l'autonomie pour un régime stationnaire

La masse du quadricoptère est évaluée avec Solidworks à 1kg. Son poids est donc $P_{\text{quadricoptère}} = 9,8\text{N}$. La gravité doit être compensée par la force de portance de chaque groupe motopulseur (GMP) à part égale soit $F_{\text{poussée}} = 2,45\text{ N}$ ce qui d'après le graphique impose une vitesse de rotation de l'hélice de 4500tr/min. A ce régime moteur, la consommation en courant est de $I = 2,8\text{A}$ soit une consommation pour les quatre GMP de 11,2A. La quantité d'énergie stockée par l'accumulateur étant à cette tension (11,1V) de 2200mAh, l'autonomie du drone à ce régime est de $(2,2/11,2) \cdot 60 = 11,8\text{min}$.

Tous ces calculs ont été menés lors d'un travail dirigé.

4.3. Se diriger

Pour les mouvements de tangage et roulis, les élèves comprennent assez facilement quelle consigne doit être envoyée aux différents variateurs. En revanche, pour évaluer le temps de réaction du drone, une simulation est nécessaire. Enfin pour le mouvement de lacet, une expérimentation à l'aide d'une maquette particulière (Figure 15) a permis d'assoir le cours sur les forces, couples et moments.

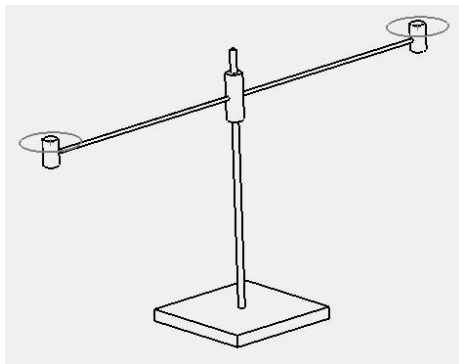


Figure 15: Maquette « lacet »

a) Mouvement de lacet: la faute au torseur couple !

Le torseur des efforts résume l'action en un point d'un élément sur un autre.

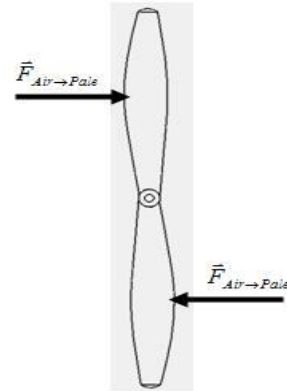


Figure 16: forces ou couple de trainée

La relation de moment s'écrit

$$\vec{M}_A = \vec{M}_B + \vec{AB} \wedge \vec{F}$$

Mais quand la résultante est nulle, le champ de moment devient identique en tout point de l'espace. A l'équilibre, c'est le cas pour la somme des actions de l'air sur chacune des pales de l'hélice (Figure 16).

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{\text{air} \rightarrow \text{hélice}} = \vec{0} \\ \vec{C}_{\text{air} \rightarrow \text{hélice}} = \vec{C}_{\text{air} \rightarrow \text{pale1}} + \vec{C}_{\text{air} \rightarrow \text{pale2}} \end{array} \right\} \forall \text{point}$$

La trainée sur chacune des pales engendre un couple résistant de l'air sur l'hélice de sens opposé à la rotation de l'hélice.

Sur la maquette représentée sur la figure 17 on constate que deux moteurs tournant dans le même sens génèrent un couple au niveau de l'axe de rotation au centre du bras et donc la rotation de ce dernier.

Cette maquette a été réalisée avec 2 MCC : résultat garanti !

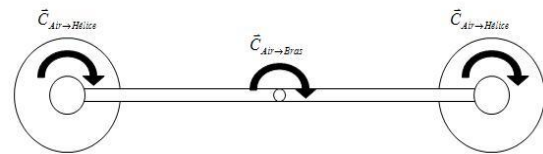


Figure 17: Le couple résultant est non nul

Ce résultat est confirmé par une simulation sous Solidworks motion (Figure 18) dans laquelle on applique sur chaque rotor le couple déterminé grâce au banc d'essai.

b) Evaluation du couple sur le rotor

Avec un rendement fixé à 80% (par l'enseignant), on peut écrire que $P_{\text{élec}} \cdot 0,8 = P_{\text{méca}}$.

Dans le cas particulier d'une alimentation sous une tension continue U avec un courant moyen I , les pertes

du convertisseur étant englobées dans le calcul, on a $C.\omega=0,8U.I$ d'où l'on tire à la vitesse de rotation $N=4500\text{tr/min}$ soit $\omega=471\text{ rad/s}$ un couple $C=0,05\text{N.m}$.

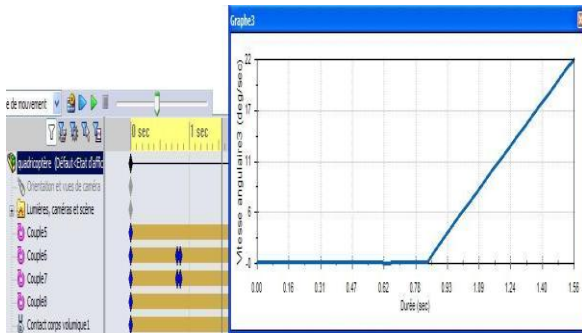


Figure 18: Solidworks Motion : courbe de vitesse de rotation (lacet)

Sur la figure ci-dessus (Figure 18), on peut voir que dans la première phase (de 0 à 0,8 s) les effets engendrés par les deux moteurs tournant en sens horaire (H) sont compensés par ceux des deux moteurs tournant en sens antihoraire (A). Puis à 0,8s, deux des moteurs baissent de régime (le couple passe de 0,5Nm à 0,4Nm) et le drone commence à tourner. Le déplacement angulaire atteint 30° en 1,2s.

Comment alors disposer les hélices ? Faut-il choisir des rotations symétriques ? Deux moteurs en rotation H et les deux autres en rotation A ? Prenons comme base de réflexion la disposition de la figure 19 classiquement présentée dans la littérature. Si on choisit de placer deux moteurs H en positions 3 et 10 et 2 moteurs A en positions 11 et 9, lors d'un mouvement vers l'avant (tangage), il faudra réduire les régimes des deux moteurs 3 et 10 et donc des 2 moteurs H. Le drone effectuera alors un mouvement de lacet en plus du tangage. Ce serait le même problème en couplant les moteurs 3 et 11 et les moteurs 10 et 9. La disposition retenue est finalement celle de la figure 19. La numérotation correspond à celle adoptée par la communauté des modélistes spécialisés dans le multicoptère.

Les moteurs avant gauche, avant droit, arrière gauche et arrière droit correspondent respectivement aux moteurs 3, 10, 11 et 9.

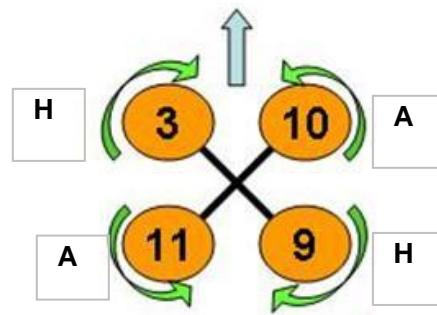


Figure 19: Disposition convenable des hélices en sens Horaires et Antihoraire

Le schéma de commande prend donc la forme suivante :

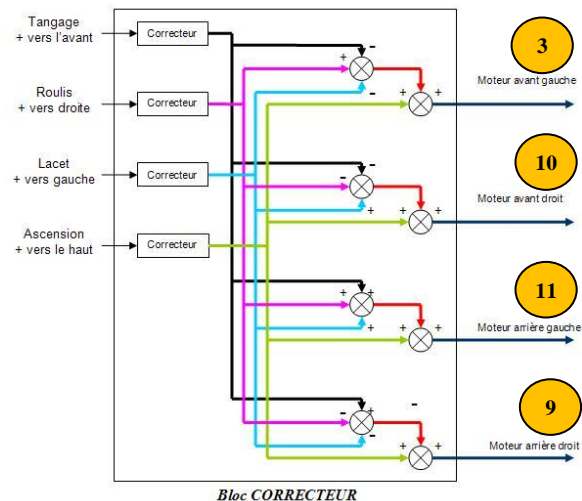


Figure 20: Synthèse du schéma de commande

c) Maintenir sa position : être stable en vol

Afin de concevoir l'asservissement de la position et de l'orientation du quadricoptère, il est important de bien choisir les capteurs.

Vive la France : ST micro-electronics a été la première société à développer les MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) capteurs de mouvement intégrés dans un CI avec en tête l'accéléromètre, le gyromètre, le magnétomètre et enfin le baromètre.



Figure 21 : le magnétomètre HMC5883L monté sur un PCB

Une activité élève consiste à identifier les grandeurs mesurées et leur utilité pour notre quadricoptère. On les retrouve dans la

centrale inertielle « 10 DOF » (Degree Of Freedom) de la chaîne d'information. Les informations provenant de l'accéléromètre 3 axes sont filtrées (passe bas) afin de ne détecter que l'accélération statique (la gravité) et donc les composantes de la verticale locale (projection). Le gyromètre 3 axes indique quant à lui les vitesses de rotation de l'engin dans l'espace, le magnétomètre, lui, est sensible aux champs magnétiques et on l'espère principalement au champ magnétique terrestre (boussole électronique). Enfin le baromètre par la mesure de la pression donne une information sur les changements d'altitude.

Les signaux délivrés sont rarement analogiques. Le protocole de communication le plus courant est l'I2C ou encore parfois le SPI. Plusieurs sociétés comme la société Drotek [réf. 6] proposent des PCB (Printed Circuit Board) sur lesquels ces MEMs sont implantés (Figure 21). Il ne reste qu'à souder des barrettes pour les monter sur des supports DIL.



Figure 22: L'accéléromètre BMA180 de la société BOSCH

Les mesures étant bruitées par des vibrations et des bruits de mesure, il sera nécessaire de prévoir leur filtrage.

4.4. Rigide mais pas trop

a) Essais de flexion et de torsion

L'analyse harmonique permet de prévoir le comportement de la structure en vol.

De par sa rigidité et son faible rapport densité/prix, le bois paraît être le matériau le plus adapté pour la structure du drone. Bien qu'il ne soit pas isotrope, nous cherchons tout de même à le caractériser du point de vue mécanique. Pour cela on réalise deux essais sur un tasseau de sapin du nord, un de flexion (Figure 23) l'autre de torsion.

Les conditions d'essai du premier sont les suivantes : le tasseau est maintenu entre les mors d'un étau. Un perçage localisé à 1m du bout de l'étau permet de suspendre une masse de 1kg. La flèche est mesurée au droit du perçage.

La flèche mesurée en mm est telle que :

$$y = \frac{F.L^3}{3.E.I_{Gz}}$$

L'essai dual permet à partir de l'angle obtenu

$$\theta = \frac{M.L}{G.I_0} \text{ de calculer } G.$$

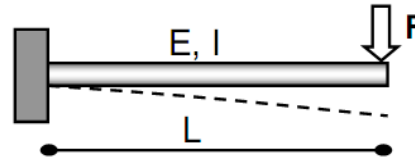


Figure 23: Essai de flexion

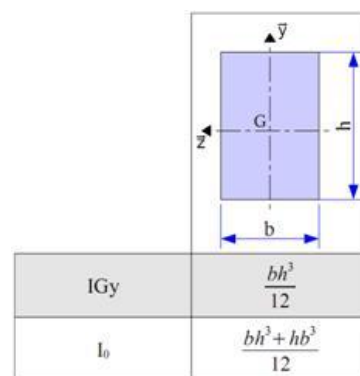


Figure 24 : Formules de moments quadratiques

Les expériences ont été réalisées par les élèves. Ils ont pu ensuite mener les calculs en autonomie grâce aux formules (Figure 24) et réaliser la recherche des modes propres qui suit.

b) Recherche des modes de résonance avec Solidworks Simulation

Après avoir saisi les modules E et G pour le matériau « sapin du nord » on exclu de l'analyse les pièces complexes et légères (donc sans incidence) comme les hélices et le capot puis on rend rigide les pièces métalliques dont les déformations seront négligeables comparées à celles de la structure. Tout cela permet de gagner du temps de calcul. Puis on rajoute la gravité telle qu'elle agit lors d'un vol stationnaire, on impose un déplacement nul au niveau de la batterie (proche du CDI) et enfin on rapporte les efforts de chaque hélice sur leur rotor (couple et portance) (Figure 25).

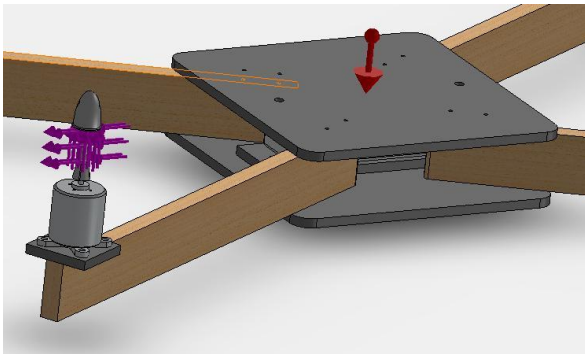


Figure 25: Préparation du modèle à l'analyse harmonique

Après calculs, le logiciel donne l'allure des déformations du quadricoptère (Figure 26) ainsi que les modes de résonance (38, 58, 59, 60, 63, 69, 138,... tout cela en Hz !).

Mauvaise nouvelle il va falloir filtrer les vibrations pour éviter de perturber les mesures effectuées par la centrale inertielle. En effet le régime moteur de 4500tr/min en vol stationnaire équivaut à une fréquence de 75Hz trop proche de 69Hz. Un matériau type mousse devra être interposé entre le capteur et le châssis. Nous devons donc faire le choix d'une centrale inertielle non solidaire de la carte de commande.

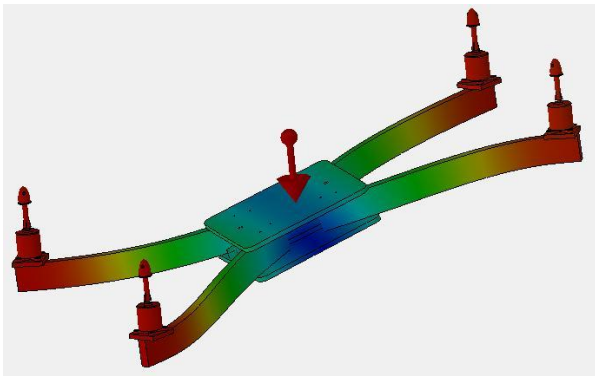


Figure 26: Mode 3 de l'analyse harmonique

4.5. Maintien de la position angulaire

Cette partie n'a pas été traitée avec les élèves mais devrait l'être avec les enseignants de terminale pour illustrer les problèmes de commande en boucle fermée (asservissement), d'inertie et justifier l'utilisation d'un logiciel de simulation multi-physique (Scilab).

On se propose de vérifier que cette fonction est réalisable :

- par une simulation à l'aide d'un modèle Scilab d'une « balançoire »,
- à l'aide de la maquette réelle de la même

expérience (Figure 27).

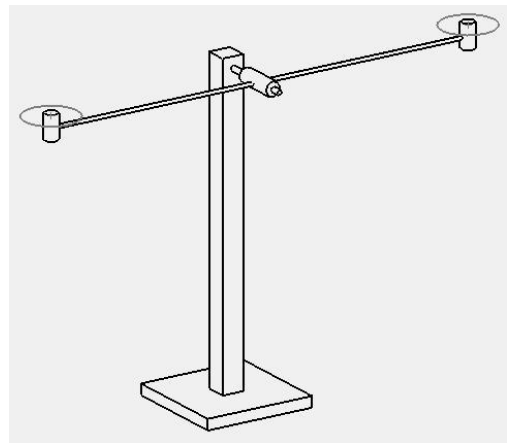


Figure 27 : Maquette « balançoire »

a) La simulation sous Scilab

A l'état initial, les deux GMP fournissent la portance nécessaire à la lévitation F_0 . Un échelon de consigne d'angle est envoyé au système. Le PID élabore un signal de commande pour le GMP de droite et son opposé pour celui de gauche. Une fois passée dans les GMP, deux poussées sont générées F_0+F et F_0-F . Multipliée par la distance moteur-axe de rotation de la balançoire les deux couples de signes opposés génèrent un couple moteur auquel on retire un couple de frottement. Une non linéarité de type « bande morte » simule la loi de coulomb. Et voilà le couple réel qui une fois divisé par J donne l'accélération angulaire. Reste une double intégration pour retrouver l'angle.

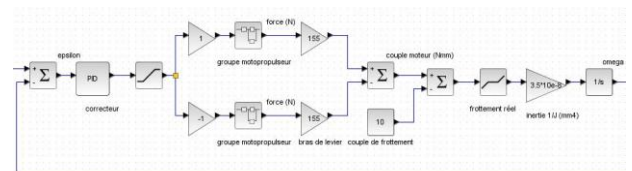


Figure 28 : Modèle Scilab de la balançoire

Sur ce modèle, paramétré par l'enseignant, les élèves peuvent constater l'effet des coefficients du correcteur PID sur la réponse et identifier temps de réponse et dépassement.

L'extrapolation au modèle réel est envisageable, seuls les paramètres suivants seront à modifier : le moment d'inertie du quadricoptère autour de l'axe X ou Y, les modèles des moteurs sans oublier qu'ils sont au nombre de 2. Le couple résistant et le frottement réel quant à eux deviennent nuls.

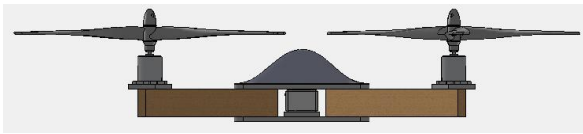


Figure 29 : Vue de face du quadricoptère

Comme on peut le voir sur la figure ci-dessus (Figure 29), 2 GMP tendent à faire basculer l'engin vers la droite, et les deux autres vers la gauche. C'est l'occasion pour les élèves de découvrir l'inertie (et sa matrice) et de voir les effets de cette grandeur sur le comportement dynamique du système.

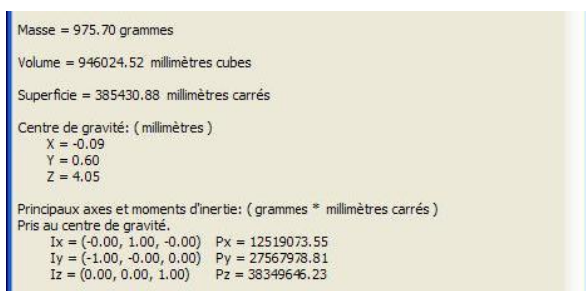


Figure 30 : Propriétés de masse du drone données par Solidworks

Comportement dynamique du GMP :

Derrière le GMP (variateur + moteur brushless + hélice + phénomène de poussée) se cache un système complexe que nous assimilerons à un second ordre. Pour l'identifier le banc de mesure (Figure 12) reprend du service mais la balance est remplacée par une balance avec une sortie analogique 4-20mA. L'acquisition se fait à l'aide d'une carte NiDAQ USB 6008 de chez « National Instrument » interfacée avec Scilab. Le temps de réponse de l'ensemble à un échelon de consigne (40% à 60%) est estimé après plusieurs essais à 50ms. Le bras ne bougeant pas, on considère que cette constante de temps caractérise l'évolution de la poussée.

Le résultat de la simulation (Figure 31) est conforme à nos attentes. Le changement de direction pourra se faire en moins d'une seconde (avec dépassement de 6%).

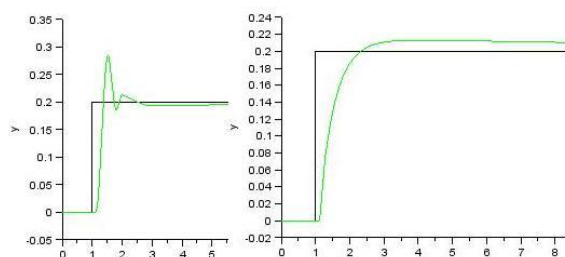


Figure 31 : Réponse à un échelon de consigne de 0.2radians avant et après ajustement des gains

On constate que la réponse tend vers la valeur de consigne mais cela après plusieurs secondes (le régime permanent n'est pas atteint sur la figure 31).

b) Passons à l'expérimentation

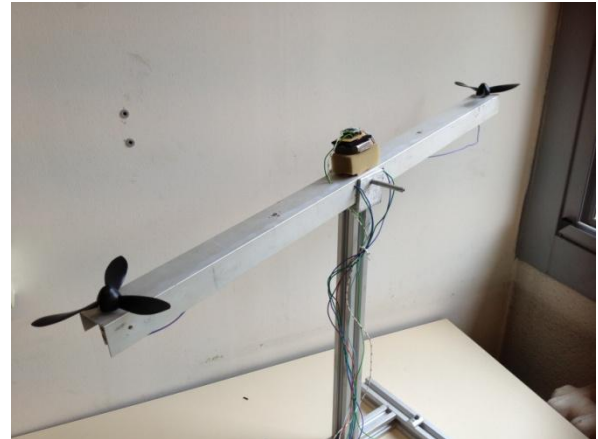


Figure 32 : La maquette « balançoire »

Description de la maquette (Figure 32): Un bras est en liaison pivot d'axe horizontal. Une MCC et une hélice tripales est fixée à chaque extrémité. La mesure de l'angle est réalisée au moyen d'un accéléromètre analogique [réf. 7]. Sa bande passante est de 500Hz. La valeur de consigne choisie est 0 aussi on s'autorise l'approximation $\sin\alpha \approx \alpha$. La tension d'alimentation des MCC est limitée à 10V (phénomène de saturation à prendre en compte).

Le microcontrôleur PIC 18F452 de la carte PICDEM2+ [réf. 8] réalise une acquisition de la valeur donnée par l'accéléromètre toutes les 2ms. Au bout de 16 acquisitions il calcule la moyenne des échantillons et élabore une consigne à partir des gains proportionnel et dérivé. Les 8 MSB du résultat servent à moduler la commande PWM de 0 à 256. Les commandes des deux MCC sont symétriques : $PWM1 = 127 + \text{consigne}$ et $PWM2 = 127 - \text{consigne}$.

Un MOSFET commandé en bloqué/saturé réalise la commande des moteurs. Comme les moteurs apportent énormément de vibrations parasites, un élastomère type « mousse » et une pièce d'inertie permettent de filtrer une partie des bruits perçus par l'accéléromètre (Figure 33).

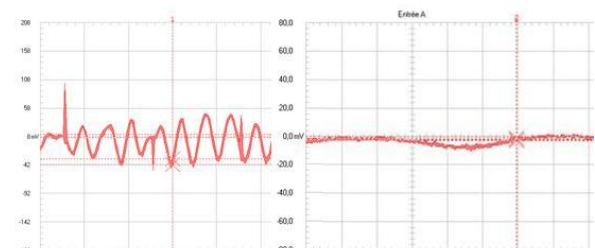


Figure 33 : Signal issu de l'accéléromètre avec et sans filtrage mécanique

Comme on peut le constater, le filtrage mécanique a permis d'atténuer certaines oscillations mais une autre, plus basse et d'amplitude assez faible est apparue. Elle est liée à l'oscillation de l'ensemble mousse-pièce d'inertie sur lequel est monté l'accéléromètre.

Le correcteur proportionnel dérivé (PD) a été réglé suivant la méthode de Ziegler Nichols [réf. 10]. Lors du fonctionnement, une consigne d'angle (signal carré de $+30^\circ$ à -30° de période 9s) est générée. A la réponse très bruitée on a substitué le résultat d'un filtrage par moyenne mobile (Figure 34). Les deux MCC ne permettent pas d'atteindre le temps de réponse attendu pour le drone.

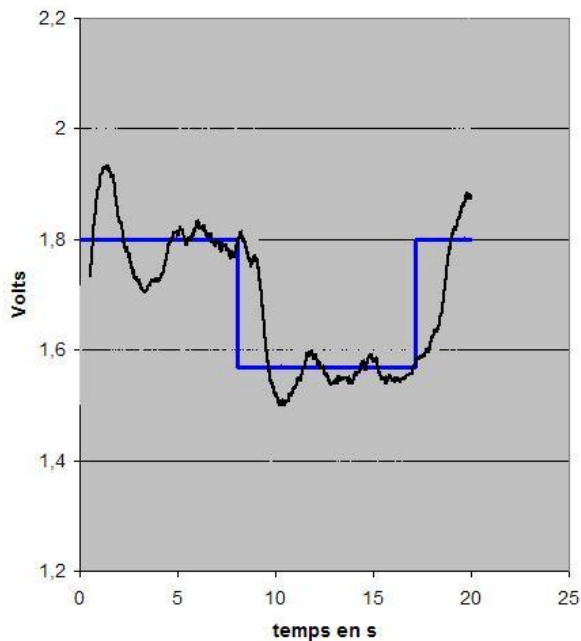


Figure 34 : réponse à une consigne ($+30^\circ$ - 30°) °

4.6. Voir sans se déplacer

La caméra CMOS doit être fixée sur le drone. Les tests de portée sont réalisés avec les élèves dans le lycée. L'alimentation à partir de l'accumulateur ne nécessite qu'un régulateur de tension LM7809.

Pour maintenir la caméra en place, un support est nécessaire. En autonomie, à partir du modèle numérique de la caméra conçu sous SolidWorks, les élèves dessinent en contexte le support. L'épaisseur des parois doit être proche de 3mm et la flexibilité du matériau plastique doit permettre de la « clipser ». La pièce est ensuite créée grâce à une imprimante 3D (Figure 35).

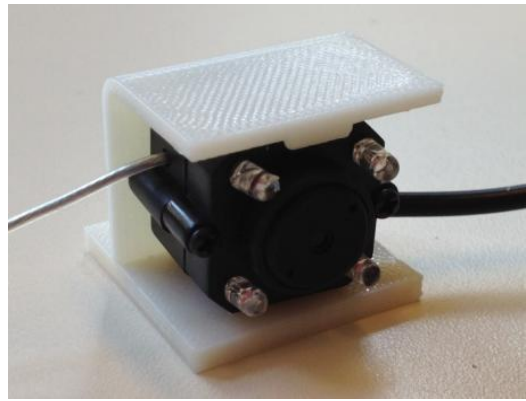


Figure 35 : Caméra CMOS et son support

La perturbation des signaux par ceux de la radiocommande reste à vérifier : c'est la CEM !

5. L'intégration et le prototype

Comme prévu, le châssis du prototype a été réalisé en bois. Les élèves ont confectionné un montage de collage pour les fabriquer en série. La connexion de la carte des variateurs et du récepteur est celle donnée sur le site [réf. 9]

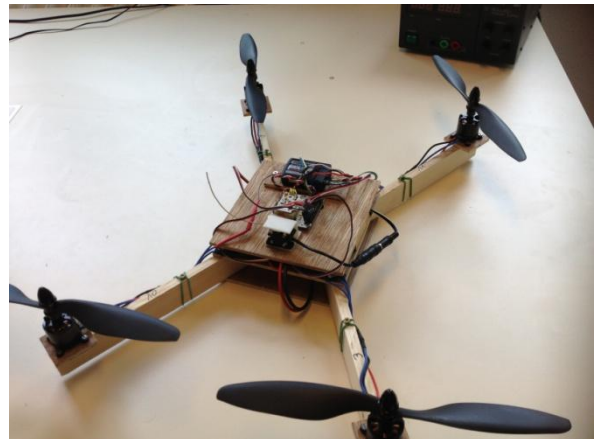


Figure 36 : Le quadricoptère équipé

Le programme de commande est le résultat d'un projet nommé « multiwii » [réf. 9]. Les documentations de la radiocommande, des variateurs du logiciel et de la carte ont été traduites par les élèves.

L'interface graphique (Figure 37) permet de visualiser en temps réel les données venant des différents capteurs (accéléromètre, gyromètre et magnétomètre). Un autre onglet permet de modifier les gains des correcteurs PID afin d'obtenir la « réponse » souhaitée.



Figure 37 : capture d'écran du logiciel
MultiWiiWinGUI.exe version 1.04

6. Bilan

Ce projet accrocheur a permis de conserver une bonne motivation chez les élèves. Un ensemble a été réalisé (Figure 36) et semble fonctionner mais seuls des essais au sol ont été réalisés. (L'engin nécessite de grands espaces !)

Tout est prêt pour qu'en terminale, un ou plusieurs groupes d'élèves reprennent le sujet. Il reste à faire le réglage des correcteurs, l'intégration de l'électronique (protection contre les intempéries), trouver une solution au montage-démontage rapide des accumulateurs. Le soft gère les mouvements d'une nacelle motorisée mue par deux servomoteurs pour la caméra embarquée. En effet, lors d'un déplacement vers l'avant (tangage), la caméra fixe filme le sol. La nacelle qui pallie cet inconvénient reste à concevoir. La distance de transmission de la vidéo peut être accrue en changeant de technologie (ZigBee)...

7 Références

[réf. 1] un projet de fin d'étude très intéressant
http://jeremie.sangare.fr/coriolis_uav/pfe_coriolis_rapport_de_projet.pdf

Un exemple de réalisation

<http://code.google.com/p/aeroquad/downloads/detail?name=AeroQuad%20Manual%20v10.pdf&can=4&q=>

Un site de modélisme spécialiste du multicoptère

<http://www.geekmag.fr/quadricoptere-fonctionnement-configuration-et-pilotage-rc/>

Un site de matériel très bon marché

<http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/index.rc>

[réf. 2] Le site du logiciel <http://www.heliciel.com/>

[réf. 3] Les profils d'aile NACA

<http://www.pdas.com/sections6.html#s63618>

[réf. 4] Le monde des accus rechargeables

<http://www.ni-cd.net/>

[réf. 5] la vidéo « quelles solutions pour vivre sans pétrole »

http://www.m6.fr/documentaire-capital_terre/

[réf. 6] le site de la société DROTEK

<http://www.drotek.fr/shop/en/>

[réf. 7] le site de GOTRONIC pour l'accéléromètre

<http://www.gotronic.fr/art-accelerometre-accm2g2-11508.htm>

[réf. 8] la carte de développement utilisée PICDEM2+

http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en010072

[réf. 9] Le site pour tout savoir sur le projet multiwii

<http://www.multiwii.com/>

La page pour télécharger l'application gratuite

<http://code.google.com/p/mw-wingui/>

[réf. 10] Application of Kalman Filtering and PID

control for direct inverted pendulum control : un exemple d'utilisation du filtre Kalman et de réglage d'un PID

<http://csuchico-dspace.calstate.edu/bitstream/handle/10211.4/145/4%2022%2009%20Jose%20Miranda.pdf?sequence=1>