

## Travaux Pratiques - ASSERVISSEMENT Drone D<sup>2</sup>C



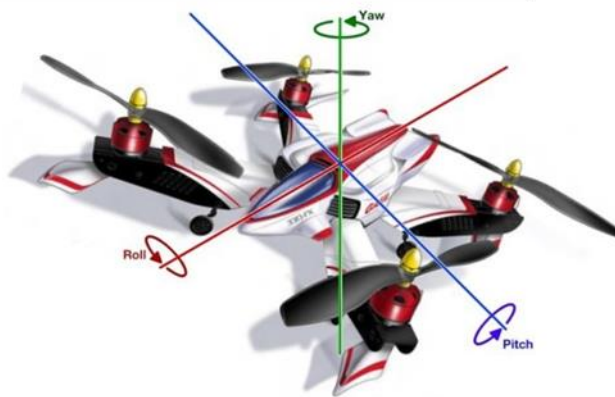
### Objectifs du TP

Etablir un modèle d'asservissement du Drone D<sup>2</sup>C et vérifier sa pertinence par comparaison entre des simulations numériques et des résultats expérimentaux. Etudier l'influence d'un correcteur Proportionnel et Proportionnel Dérivé sur les performances du système.

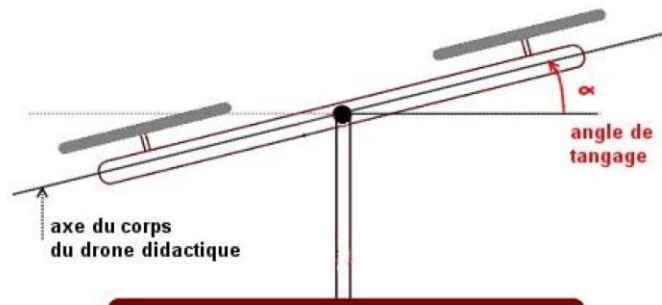
## 1 – Mise en situation et description

Pour pouvoir réaliser un vol en translation, un drone doit pouvoir être placé dans une position inclinée par rapport à l'horizontale.

C'est l'étude du passage à cette position inclinée et du maintien de cette position inclinée qui est étudié grâce au système Drone D2C. Le problème étudié ici n'est donc pas le problème de la stabilisation verticale (altitude) mais le problème de la stabilisation angulaire (« tangage » ou « pitch ») obtenue grâce à la mise en place de boucles d'asservissement (vitesse et position) et l'utilisation de correcteurs dans le micro-contrôleur.

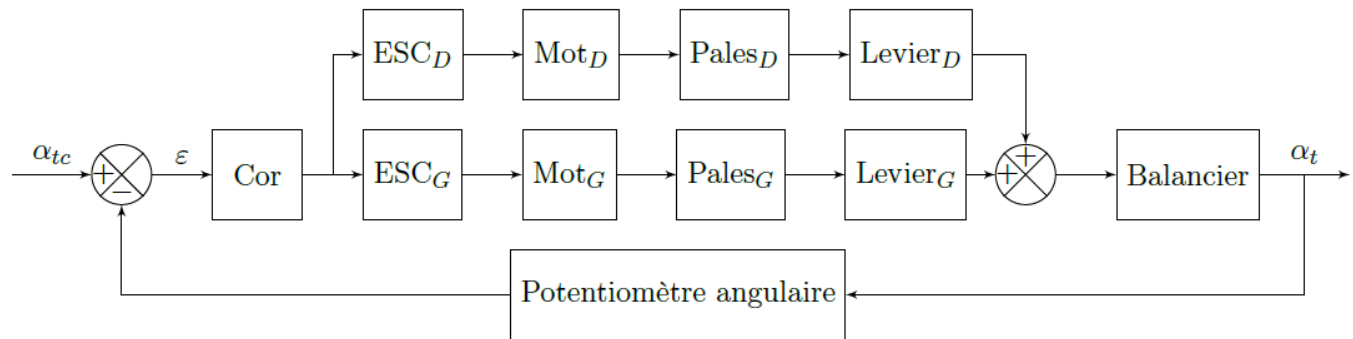


La maquette Drone Didactique Contrôlé (D2C) met en œuvre les technologies qui constituent les drones. Il permet de tester les solutions technologiques de commande d'un système asservi dont les exigences en termes de performances sont élevées.



*Illustration de l'angle de tangage sur la maquette didactisée du Drone D<sup>2</sup>C*

La structure de commande des 2 actionneurs permettant de contrôler l'angle de tangage  $\alpha_t$  est décrite par le schéma-blocs ci-dessous :



En mode **Manu** et en boucle fermée, la consigne angulaire (angle de tangage de consigne  $\alpha_{tc}$  est fournie par le potentiomètre **Commande tangage**, et la vitesse de rotation des moteurs (image de la commande des gaz) est fournie par le potentiomètre **Commande Moteurs**. L'image de la position angulaire du drone autour de l'axe de tangage  $\alpha_t$  est fournie par un potentiomètre angulaire.



Situer sur le système le potentiomètre angulaire permettant à la partie commande de connaître la position angulaire sur l'axe de tangage du drone.



Décrire, en s'aidant d'un schéma, le principe de fonctionnement d'un potentiomètre angulaire.

Dans la réalité, le potentiomètre angulaire n'est pas présent, mais la position angulaire est élaborée à partir des capteurs accéléromètres et gyroscopes placés sur le drone.

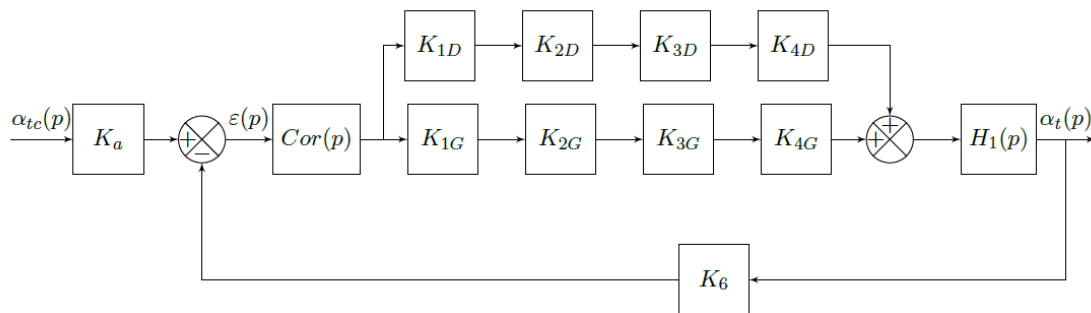


Situer sur le drone les deux actionneurs de type moteur *brushless* et les deux préactionneurs ESC.

## 2 – Modélisation du système

Certains paramètres seront issus de modèle de comportement (à la suite d'un résultat expérimental), d'autres seront issus de modèle de connaissance (modèle physique pour représenter le phénomène). Dans ce qui suit, nous allons établir un modèle de chaque composant identifié dans le schéma-blocs fonctionnel précédent. L'hypothèse de préactionneurs, moteurs et pales, gauches et droites identiques, est faite et est supposée réaliste.

Le schéma-blocs fonctionnel précédent permet d'établir le schéma-bloc suivant :



Pour réaliser un asservissement de qualité, il faut que la sortie du comparateur (soustracteur) soit nulle lorsque la grandeur physique du système est égale à la grandeur de consigne (en régime permanent dans le cas d'un système stable).



Après avoir exprimé l'écart  $\varepsilon(p)$  en fonction des grandeurs d'entrée et de sortie du système, déterminer le lien entre  $K_a$  et  $K_6$  pour que l'angle de tangage  $\alpha_t$  suive parfaitement l'angle de tangage de consigne  $\alpha_{tc}$  en régime permanent.

### Modélisation des actionneurs

On rappelle que les 2 actionneurs sont supposés identiques. Les actionneurs du type moteur *brushless* (voir **DOSSIER TECHNIQUE**) sont des actionneurs dont le temps de réponse à 5% est extrêmement court (inférieur à 5 ms). On se propose alors de les modéliser sous la forme d'un simple gain.



Déterminer la valeur numérique des gains  $K_{2G}$  et  $K_{2D}$ .

## Modélisation des pâles du drone

Les pales, entraînées en rotation par l'arbre des moteurs *brushless*, génèrent des efforts, appelés efforts de portance.

L'effort de portance est modélisable par l'équation  $F_{portance} = k \cdot \omega_{mot}^2$ . Ce modèle de connaissance n'est pas utilisable, car non linéaire. Cependant, autour d'un point de fonctionnement défini par  $(\omega_0, F_{portance0})$ , on peut considérer de petites variations  $\Delta\omega$  (telles que  $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \ll 1$ ) autour de ce point de fonctionnement provoquant de petites variations d'effort de portance  $\Delta F_{portance}$  telles que :

$$\Delta F_{portance} = K_3 \cdot \Delta\omega \quad \text{avec } K_3 = \frac{\Delta F_{portance}}{\Delta\omega}$$

On parle alors de modèle linéarisé autour du point de fonctionnement  $(\omega_0, F_{portance0})$  ou de modèle linéaire tangent.



Traduire les explications fournies ci-dessus sous la forme d'un graphique représentant l'évolution et la linéarisation du modèle de connaissance

Ce coefficient de proportionnalité entre l'effort de portance et la vitesse de rotation de l'hélice n'est pas aisément calculable à partir des caractéristiques des pales. Il est alors nécessaire de procéder à des essais expérimentaux.

Pour la suite, le point de fonctionnement est défini pour une vitesse de rotation des pales de 6000 tr/min (consigne des gaz proche de **30 %**).



A l'aide du logiciel de mesure du drone (voir **DOSSIER RESSOURCES**), mettre en œuvre un protocole permettant de déterminer expérimentalement la valeur des gains  $K_{3G}$  et  $K_{3D}$  (on suppose que ceux-ci sont égaux entre eux), pour une valeur de  $\omega_0 = 6000 \text{ tr/min}$ .

## Modélisation des préactionneurs

Les préactionneurs (ESC) sont supposés être modélisables par des gains tels que  $K_{1D} = K_{1G} = 10$ .

## Modélisation du balancier

L'équation issue du PFD traduisant le comportement sur lequel sont fixés les 2 actionneurs est :

$$J_{eq} \cdot \frac{d^2 \alpha_t(t)}{dt^2} = L \cdot F_{PG}(t) + L \cdot F_{PD}(t)$$

Avec :

- $J_{eq} = 0,01 \text{ kg.m}^2$  : Moment d'inertie équivalent du balancier et des actionneurs autour de l'axe de tangage du drone.
- $\alpha_t(t)$  : Angle de tangage du drone.
- $L$  : Distance entre l'axe de tangage et l'arbre des actionneurs (et des pales).
- $F_{PG}(t)$  et  $F_{PD}(t)$  : Efforts de portance générés (respectivement) par les pales gauche et droite.



Transformer l'équation ci-dessus dans le domaine de Laplace, en considérant les conditions initiales nulles. En déduire la fonction de transfert  $H_1(p)$ .



Par une mesure avec une règle sur le système, déterminer la valeur numérique des gains  $K_{4G}$  et  $K_{4D}$ , supposés égaux.

## Modélisation du capteur de position angulaire



En utilisant les informations du **DOSSIER RESSOURCES** et du **DOSSIER TECHNIQUE**, déterminer la valeur numérique du gain du capteur de position angulaire noté  $K_6$  et exprimé en  $V/^\circ$ .

Nous disposons maintenant d'un modèle représentant le comportement du drone sur l'axe de tangage. Il est nécessaire de valider ce modèle, puis de déterminer les performances simulées.

### 3 – Validité du modèle

L'objectif est de vérifier que le modèle élaboré dans les parties précédentes permet de retrouver les performances mesurées sur le système. Dans cette partie, le correcteur n'est pas pris en compte ( $C(p) = 1$ ).



Compléter le fichier Scilab en utilisant les résultats obtenus dans les parties précédentes.



Réaliser une simulation pour une entrée de  $10^\circ$ . Commenter et analyser les résultats obtenus.



A l'aide du logiciel de pilotage du drone, mettre en œuvre un protocole permettant de relever l'évolution temporelle de l'angle de tangage  $\alpha_t$  pour une entrée du type créneau d'amplitude  $10^\circ$  et de période 4 s.



Commenter et analyser les résultats obtenus.



Comparer les ordres des fonctions de transfert entre les modèles de connaissance (simulation) et de comportement (expériences). Commenter.



L'objectif pour le groupe est de comparer les courbes obtenues sur Scilab et celles obtenues expérimentalement. Calculer et commenter les écarts éventuels.

## 4 – Etude de l'influence du correcteur Proportionnel

Nous allons étudier l'influence du correcteur Proportionnel sur la rapidité du système ainsi que sa stabilité, afin de trouver un réglage optimal pour vérifier les performances du cahier des charges.

Nous allons réutiliser le modèle précédent avec uniquement dans un premier temps un correcteur Proportionnel  $C(p) = K_p$  et étudier son influence sur les performances du système.

### Rapidité du système



Déterminer par simulation, l'influence de la valeur de  $K_p$  sur la performance de rapidité de l'asservissement de l'angle de tangage. Conclure vis-à-vis du cahier des charges.



Proposer, à partir des résultats expérimentaux, une valeur de  $K_p$  permettant de valider les résultats obtenus avec le modèle de simulation.

Remarque : Pour le réglage du correcteur sur le logiciel, voir le **DOSSIER RESSOURCES**. Le correcteur correspond au PID1 (le PID2 doit rester à  $K_p = 1, K_i = 0, K_d = 0$ )



Conclure sur l'effet d'une variation (augmentation ou diminution) de  $K_p$  sur l'amélioration de la rapidité du système.

### Stabilité du système



Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée  $\frac{\alpha_t(p)}{\alpha_{tc}(p)}$  et l'écrire sous la forme canonique d'un second ordre lorsque  $C(p) = K_p$ .



Identifier les paramètres caractéristiques du second ordre  $(K, z, \omega_0)$ .





Montrer par calculs qu'un simple correcteur Proportionnel  $C(p) = K_p$  ne permettra pas de stabiliser le drone sur l'axe de tangage.



Déterminer par simulation, l'influence de la valeur de  $K_p$  sur la performance de stabilité (1<sup>er</sup> dépassement, ...) de l'asservissement de l'angle de tangage. Conclure vis-à-vis du cahier des charges.



Proposer, à partir des résultats expérimentaux, une valeur de  $K_p$  permettant de valider les résultats obtenus avec le modèle de simulation.



Conclure sur l'effet d'une variation (augmentation ou diminution) de  $K_p$  sur l'amélioration de la stabilité du système.

L'exigence de rapidité ne peut pas être satisfaite simultanément à l'exigence de stabilité. Un correcteur Proportionnel Dérivé permettra ultérieurement d'atteindre ces deux exigences.

## 5 – Etude de l'influence du correcteur Proportionnel Dérivé

Nous allons étudier l'influence du correcteur Proportionnel Dérivé sur la rapidité du système ainsi que sa stabilité, afin de trouver un réglage optimal pour vérifier les performances du cahier des charges.

Nous allons maintenant réutiliser le modèle précédent avec un correcteur Proportionnel Dérivé  $C(p) = K_d \cdot \frac{T_d \cdot p}{1 + N \cdot T_d \cdot p}$  avec  $T_d = 0,01$  s et  $N = 10$ . Nous allons étudier son influence sur les performances du système.

### Rapidité du système



Déterminer par simulation, l'influence de la valeur de  $K_d$  sur la performance de rapidité de l'asservissement de l'angle de tangage. Conclure vis-à-vis du cahier des charges.



Proposer, à partir des résultats expérimentaux, une valeur de  $K_d$  permettant de valider les résultats obtenus avec le modèle de simulation.

Remarque : Pour le réglage du correcteur sur le logiciel, voir le **DOSSIER RESSOURCES**. Le correcteur correspond au PID1 (le PID2 doit rester à  $K_p = 1, K_i = 0, K_d = 0$ ).



Conclure sur l'effet d'une variation (augmentation ou diminution) de  $K_d$  sur l'amélioration de la rapidité du système.

### Stabilité du système



Déterminer par simulation, l'influence de la valeur de  $K_d$  sur la performance de stabilité (1<sup>er</sup> dépassement, ...) de l'asservissement de l'angle de tangage. Conclure vis-à-vis du cahier des charges.



Proposer, à partir des résultats expérimentaux, une valeur de  $K_d$  permettant de valider les résultats obtenus avec le modèle de simulation.



Conclure sur l'effet d'une variation (augmentation ou diminution) de  $K_d$  sur l'amélioration de la stabilité du système.

## 6 – Validation



L'objectif pour le groupe est de comparer pour les performances de rapidité et de stabilité avec le correcteur Proportionnel, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.



L'objectif pour le groupe est de comparer pour les performances de rapidité et de stabilité avec le correcteur Proportionnel Dérivé, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.



Quels autres paramètres peut-on modifier pour améliorer les performances de stabilité et/ou de rapidité ? Qu'en est-il des autres performances ?

