

D²C

Drone Didactique Contrôlé

TP CPGE

Optimiser l'asservissement de tangage du drone didactique

TP 1-1 « Etude expérimentale de la boucle de vitesse du drone didactique »

Préambule : pourquoi une boucle de vitesse ?

Obtenir le vol stable d'un quadrirotor n'est pas chose facile ; la mise en place de boucles d'asservissement autour de la centrale inertielle et de correcteurs dans le micro-contrôleur permettent d'atteindre cet objectif.

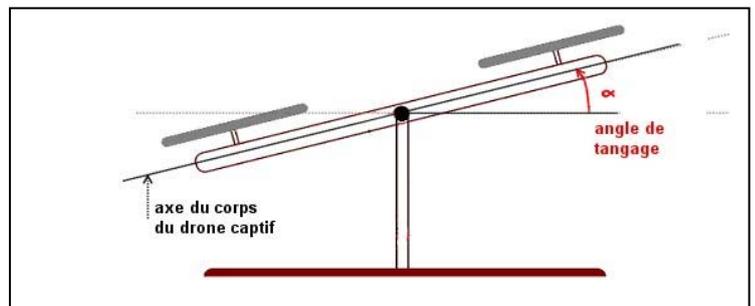
Pour pouvoir réaliser un vol en translation, le drone doit pouvoir être placé dans une position inclinée (voir les vidéos :

<http://youtu.be/5q1YTMuls0w> :
et <http://youtu.be/jQ-JHcsw1G8> :
et <http://youtu.be/jQ-JHcsw1G8>

C'est l'étude du passage à cette position inclinée et du maintien de cette position inclinée qui est l'objet du travail proposé. Le problème étudié ici n'est donc pas le problème de la stabilisation verticale (altitude) mais le problème de la stabilisation angulaire (tangage). (voir figure ci-contre)

Nous verrons dans les différents TP d'asservissement de tangage proposés qu'une la boucle de vitesse interne à la boucle de position permet d'améliorer les performances de cette dernière.

Le travail proposé porte sur le réglage expérimental de cette boucle de vitesse, et sur la « commande en vitesse angulaire » du drone.



TP 1-1 « Etude expérimentale de la boucle de vitesse du drone didactique »

TP 1-1 : Le fil directeur du travail proposé est l'analyse et l'amélioration des performances de la boucle de vitesse de tangage, avec différents choix dans la chaîne de retour, ou dans la chaîne directe :

1- Identification des composants de la boucle de vitesse

1-1 situation de l'étude

1-2 fonction de transfert de la motorisation

2- Réglage des paramètres de la boucle de vitesse

2-1 validation de la fonction de transfert des composants de la boucle de vitesse

2-2 détermination empirique des correcteurs de la boucle de vitesse

2-2-1 correction proportionnelle

2-2-2 correction intégrale

2-2-3 correction dérivée

3- analyse des écarts entre résultats de simulation (TP 1-2) et résultats d'expérimentation (ce TP)

Conditions matérielles de réalisation du TP :

- Le drone didactique D2C doit être alimenté et opérationnel ;
- Le logiciel D2C_IHM doit être installé sur le PC pour interagir avec le drone didactique par liaison USB ;
- Le temps de latence du port USB doit avoir été ajusté une fois à 1 ms :
Menu windows : démarrer – tous les programmes – D2C_IHM → clic droit sur « Change latency » - « exécuter en tant qu'administrateur » ...

- Doivent être à disposition :
 - Le document « [D2C-Guide-prise-en-main-rapide.pdf](#) »
 - Le document « [fiche description - D2C](#) »
 - Le document « [fiche mesure entrée-sortie motorisation](#) »
 - Le document « [Fiche-d_information-gyrometre-et-mesures.pdf](#) »

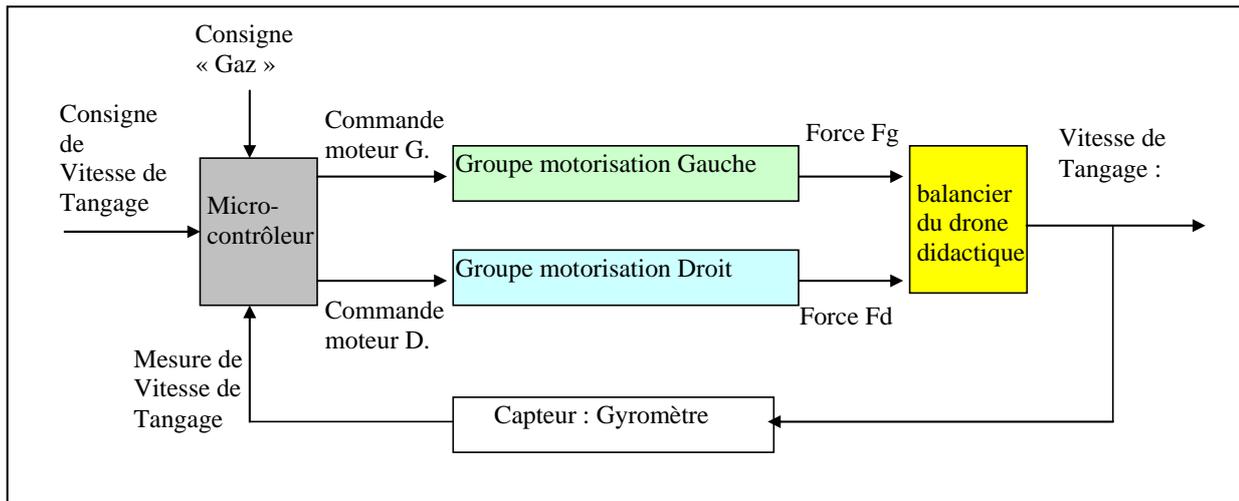
1- Première partie : Identification des composants de la boucle de vitesse

L'objectif est de trouver un modèle de comportement de la « motorisation » du drone didactique et des constituants de la « boucle de vitesse ».

1-1 Situation de l'étude

Le document « [fiche description D2C](#) » présente les constituants matériels du drone didactique, ainsi que les grandeurs (information ou énergie) échangées entre ceux-ci.

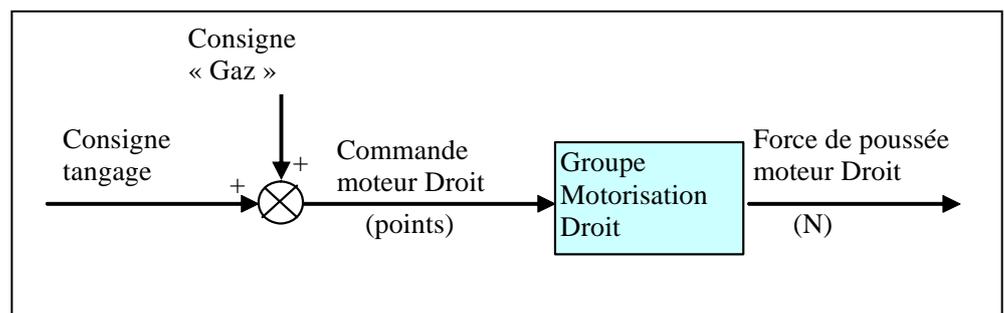
Le schéma-bloc ci-dessous permet de présenter plus précisément la boucle d'asservissement autour du micro-contrôleur de la « carte pupitre », dans le cas d'une commande « en vitesse » :



Le micro-contrôleur reçoit la consigne de vitesse de tangage, ainsi que la mesure de la vitesse réalisée par le gyromètre de la centrale inertielle du drone didactique ;

1-2 fonction de transfert de la motorisation

Pour obtenir le modèle de comportement de la motorisation seule, il s'agira de commander le système D2C en « boucle ouverte » ; l'analyse sera effectuée seulement sur le moteur droit et le schéma-bloc utile se réduit à celui de la figure ci-contre :



Il permet de visualiser la grandeur d'entrée « commande moteur » et la grandeur de sortie « Force ». C'est cette force dont le moment fait basculer le balancier du drone didactique qui devra être mesurée.

A noter : tous les traitements réalisés par le micro-contrôleur (et en particulier la grandeur « commande moteur », sont exprimés en « points », sur une échelle $[-32767 +32767]$ qui correspond à un code binaire en 15 bits signés.

Travail 1 :

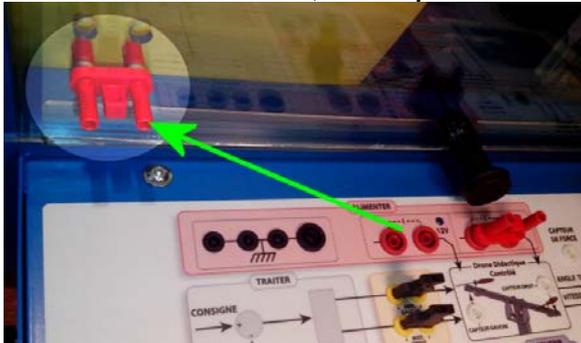
- Expérimenter pour obtenir la réponse temporelle de la motorisation « groupe motorisation droit » dans les conditions suivantes : autour du « point de fonctionnement » Gaz à 30% ; avec quelques échelons de consigne choisis entre [-2% ; +2%] et [-10% ; +10%]
(un tableur pourra être utilisé pour faire une moyenne sur les différents résultats)
- En déduire le gain K_m (en Newtons par points de commande) et la constante de temps τ_m d'un modèle approché équivalent du premier ordre, pour la motorisation, autour de ce point de fonctionnement.

Conditions d'expérimentation

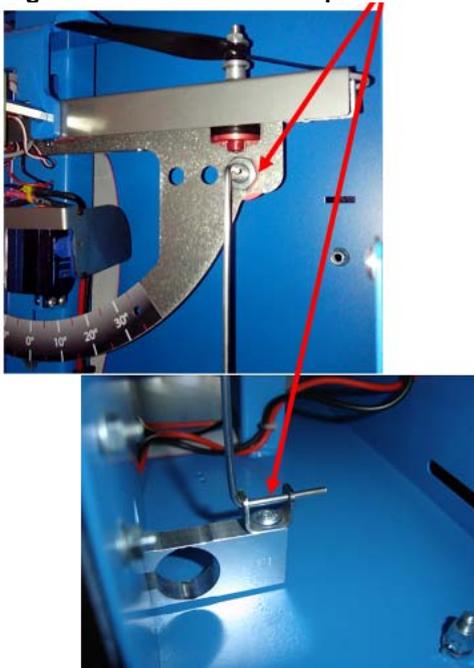
Voir la « [fiche mesure entrée-sortie motorisation](#) » (dont un extrait est reproduit ci-dessous)

a) Conditions d'expérimentation « pupitre » et « système »

- système branché ; interrupteur « 0/1 » sur 1, « Arrêt Général » déverrouillé ;
- connexion USB avec le PC en place ;
- 3 cavaliers noirs commande moteurs et bloqueur en place.
- cavalier alim moteur gauche enlevé et placé sur les perforations prévues à cet effet à gauche, dans le plexiglass ,
- cavalier alim moteur droit, seul en place.



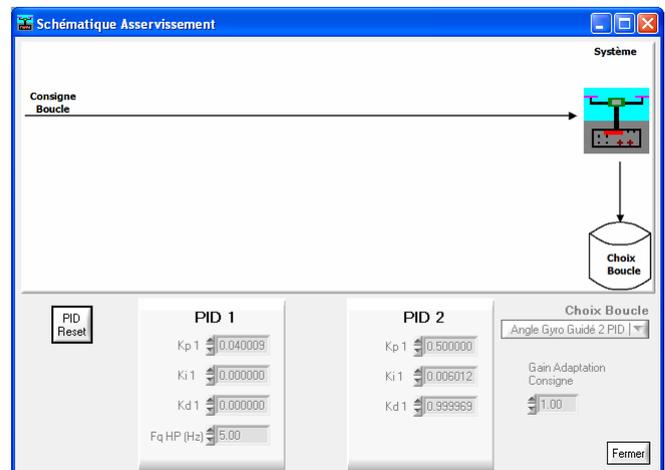
- bouton « commande bloqueur » sur « tangage libre » ;
- bouton « PC/MANU » sur PC
- bouton BO/BF sur « Boucle Ouverte » ;
- potenti « Moteur Gauche » en position gauche (0%) ;
- potenti. « Moteur Droit » en position gauche (0%) ;
- tige de transfert d'effort en place :



b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »

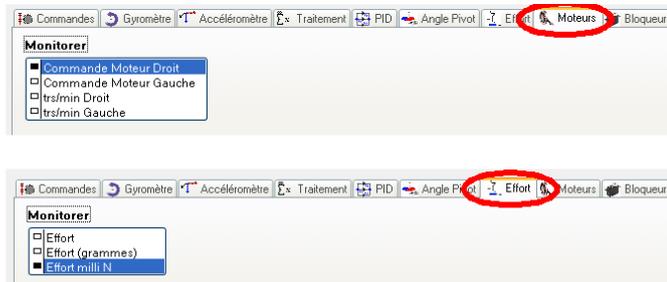


- : boucle « ouverte » activée par le bouton du pupitre



c) Conditions d'expérimentation : « affichage »

(cliquer sur « commandes » si pas d'accès direct)
moniterer : « **Commande moteur droit** »
et « **Effort milli N** » :



Une fois la mesure réalisée, les résultats seront enregistrés et une fenêtre de post-traitement s'affichera ; un accès aux résultats enregistrés est toujours possible ultérieurement avec l'icône « Affichage Mesures » :

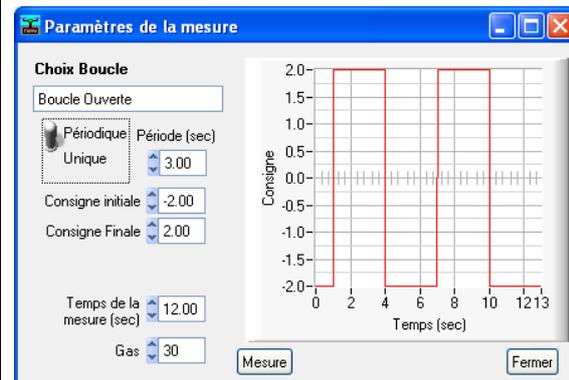


d) Condition d'expérimentation : « consignes »

- Porte fermée pour autoriser la rotation du moteur.



- échelon
- périodique 3s ; temps de la mesure 12s ;
- point de fonctionnement des moteurs : Gaz à 30 (%)
- **consigne choisie entre [-2% ; +2%] et [-10% ; +10%]**



- cliquer sur « mesure » et **donner un nom** au fichier de sauvegarde pour lancer l'expérimentation.

Travail 2 :

Expérimenter dans les mêmes conditions qu'au travail 1, mais avec une entrée sinusoïdale de pulsation égale à la pulsation de cassure du modèle identifié au travail 1 ;

Comparer les valeurs du déphasage attendu et du déphasage mesuré, proposer une explication aux écarts éventuellement constatés.

Conditions d'expérimentation

a) Conditions d'expérimentation « pupitre » et « système »

- idem travail 1

c) Conditions d'expérimentation : « affichage »

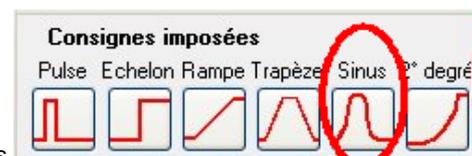
- idem travail 1

b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »

- idem travail 1

d) Condition d'expérimentation : « consignes »

- Porte fermée pour autoriser la rotation des moteurs.

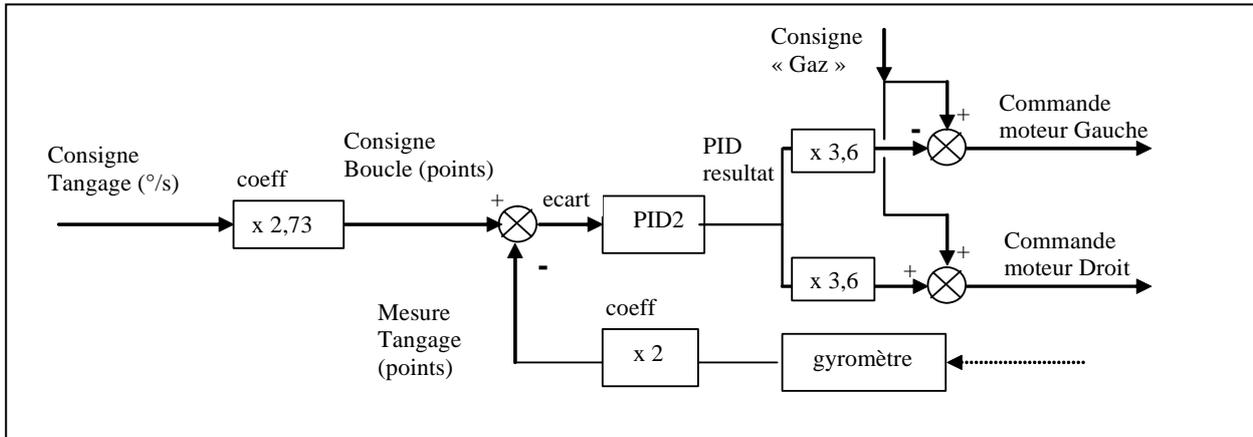


- sinus

2- Deuxième partie : réglage des paramètres de la boucle de vitesse

2-1 validation de la fonction de transfert des composants de la boucle de vitesse

la programmation de la boucle de vitesse fait intervenir le schéma suivant :



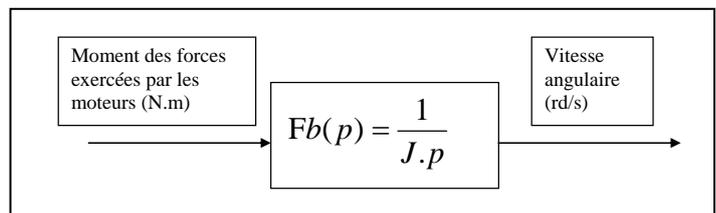
Données complémentaires :

- On ne prendra pas en compte la « consigne Gaz » puisqu'on étudie les variations de la commande (consigne boucle), autour du point de fonctionnement associé à cette « consigne Gaz » de 30%.
- le schéma-bloc complet de la boucle est fourni dans le document « [Fiche d'information-Gyromètre-et-mesures](#) », de même que le gain du gyromètre ; la fonction de transfert de la motorisation seule

$F_m(p) = \frac{Km}{1 + \tau_m \cdot p}$ a été obtenue en première partie ;

- la partie de schéma-bloc associée au « balancier » du drone didactique s'obtient à partir de l'application du Principe Fondamental de la Dynamique et s'écrit :

$Fb(p) = \frac{1}{J \cdot p}$ (frottements négligés)



J est le moment d'inertie du balancier équipé, par rapport à son axe de rotation : **J = 10⁻² kg.m²**
 b est le bras de levier ou distance d'un moteur à l'axe de rotation : b = 0,14 m

Travail 3 :

Montrer que l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée de la commande en vitesse lorsque PID(p) = 1 est :

$$FTBF_{vitesse}(p) = \frac{1/G_{retour}}{1 + \frac{J}{7,2 \cdot b \cdot K_m \cdot G_{retour}} \cdot p + \frac{\tau_m \cdot J}{7,2 \cdot b \cdot K_m \cdot G_{retour}} \cdot p^2}$$

Exprimer G_{retour} et déterminer la période propre T₀ et la période amortie T_a du mouvement résultant de l'application d'un échelon.

Travail 4 :

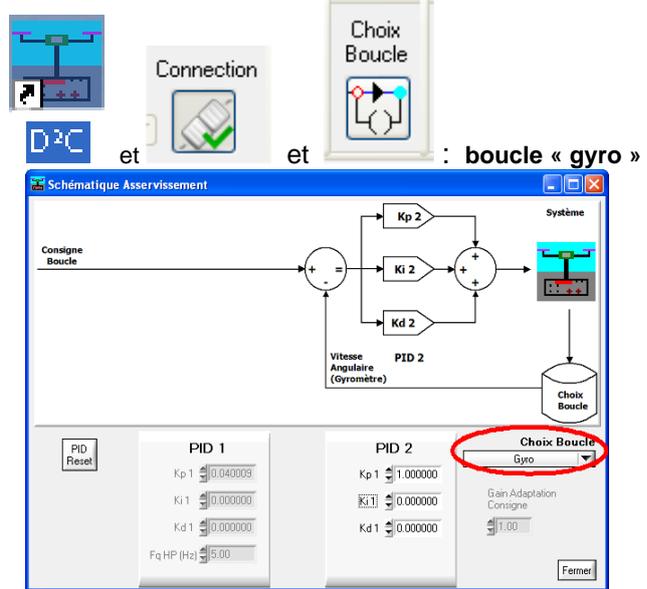
Expérimenter en boucle fermée de vitesse avec $Kp2 = 1$ (et autres coefficients à 0), pour valider le résultat sur la période, obtenu précédemment ; proposer une explication aux écarts éventuellement constatés par rapport au modèle obtenu au travail 3.

Conditions d'expérimentation

a) Conditions d'expérimentation « pupitre » et « système »

- système branché ; interrupteur « 0/1 » sur 1, « Arrêt Général » déverrouillé.
- connexion USB avec le PC en place ;
- 3 cavaliers noirs commande moteurs et bloqueur en place.
- 2 cavaliers rouges alimentation moteurs en place.
- tige de mesure d'effort enlevée ;
- porte d'accès aux moteurs initialement fermée ;
- bouton « commande bloqueur » sur « tangage libre » ;
- bouton « PC/MANU » sur PC
- bouton BO/BF sur « Boucle fermée » ;
- potentiomètre « Commande Tangage » en position gauche (0%) ;
- potentiomètre « Commande Tangage » en position centrale ;

b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »



c) Conditions d'expérimentation : « affichage »

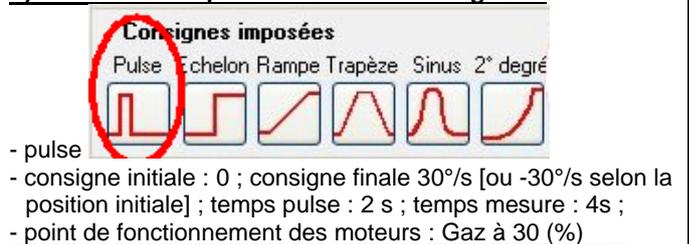
(cliquer sur « commandes » si pas d'accès direct)
moniteur : « gyromètre » et « consigne boucle » :

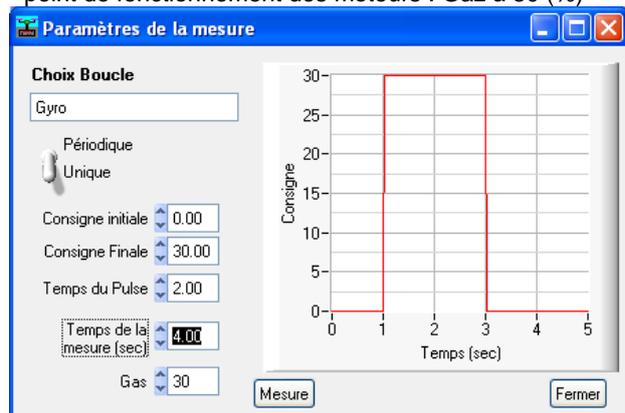


Une fois la mesure réalisée, les résultats seront enregistrés dans un fichier (à nommer préalablement) et une fenêtre de post-traitement s'affichera ; un accès aux résultats enregistrés est toujours possible ultérieurement avec l'icône « Affichage Mesures » :



d) Condition d'expérimentation : « consignes »

- 
- pulse
 - consigne initiale : 0 ; consigne finale 30°/s [ou -30°/s selon la position initiale] ; temps pulse : 2 s ; temps mesure : 4s ;
 - point de fonctionnement des moteurs : Gaz à 30 (%)



- Ouvrir la porte ; Positionner manuellement le balancier du côté du départ (inclinaison gauche si consigne positive ; inclinaison droite si consigne négative),
- fermer la porte et cliquer sur « mesure » : donner un nom au fichier ; la mise en mouvement se fait dès le clic sur « Enregistrer »

2-2 détermination empirique des correcteurs de la boucle de vitesse

la démarche proposée est une démarche purement expérimentale qui permettra d'apprécier physiquement l'effet de chaque composante du correcteur ; (c'est un autre TP qui propose une démarche par simulation logicielle).

2-2-1 ajustement de la correction Proportionnelle

le réglage initial est : ($K_p2 = 1$; $K_i2 = 0$; $K_d2 = 0$; Puls-Fd = 0)

Travail 5 :

- Expérimenter dans les mêmes conditions qu'au travail 4, en augmentant progressivement K_p2 (de 0,5 en 0,5), avec ($K_i2 = 0$; $K_d2 = 0$, Puls-Fd = 0) pour obtenir un comportement avec oscillations régulières de vitesse, en limite d'instabilité ;
- Choisir un réglage final de **K_p2 un peu inférieur à la moitié de cette valeur de K_p2 limite** (adapté de la méthode de Ziegler-Nichols) ;
- Enregistrer l'acquisition, et analyser la précision de vitesse obtenue avec ce réglage ; proposer des explications aux défauts éventuels de précision.

2-2-2 Ajustement de la correction Intégrale

le réglage précédent a dû conduire à un résultat voisin de $K_p2 = 0,8$ à 0,5, selon l'hélice et la motorisation utilisée ; avec ($K_i2 = 0$; $K_d2 = 0$; Puls-Fd = 0)

Avec la valeur de K_p2 déduite du travail 5, il s'agit maintenant d'expérimenter pour régler le coefficient K_i2 de façon à augmenter la résistance du système aux perturbations (précision).

Travail 6 :

il s'agira (à vitesse nulle) de générer une perturbation avec la « tige de déstabilisation » présentée ci-dessous dans les conditions d'expérimentation, pour faire en sorte qu'après suppression de la perturbation, le système reprenne sa position précédente (effet de l'intégrateur).

augmenter progressivement K_i , depuis 0 par paliers de 0,0005 jusqu'à obtenir le comportement indiqué, sans oscillations trop importantes.

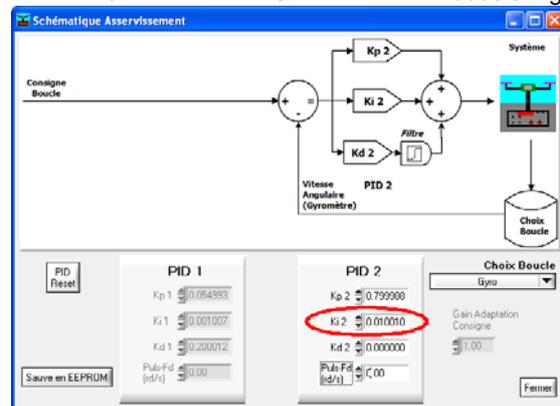
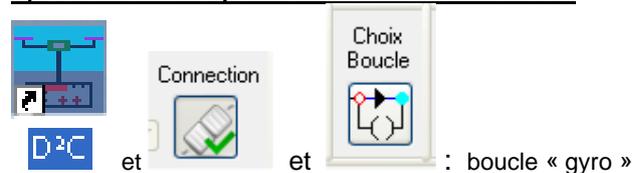
Donner la valeur de K_i qui convient.

Conditions d'expérimentation

a) Conditions d'expérimentation « pupitre » et « système »

- système branché ; interrupteur « 0/1 » sur 1, « Arrêt Général » déverrouillé.
- connexion USB avec le PC en place ;
- 3 cavaliers noirs commande moteurs et bloqueur en place.
- 2 cavaliers rouges alimentation moteurs en place.
- tige de mesure d'effort enlevée ;
- porte d'accès aux moteurs fermée ;
- bouton « commande bloqueur » sur « tangage libre » ;
- bouton « PC/MANU » sur MANU
- bouton BO/BF sur « Boucle fermée » ;
- potentiomètre « Commande moteurs » en position gauche (0%), puis 30% pendant les manipulations ;
- potentiomètre « commande tangage » en position centrale, et éventuellement ajusté pendant les manipulations ;

b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »



c) Conditions d'expérimentation : « affichage »

Facultatif : monitorer éventuellement : « **gyromètre** » et « **consigne boucle** » :



d) Condition d'expérimentation : « consignes »

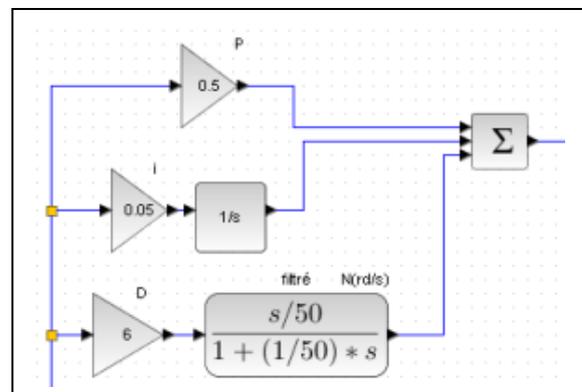
Porte fermée pour autoriser la rotation des moteurs.
Consignes manuelles réalisées au pupitre, selon la démarche indiquée ci-dessous : Il s'agira de :

- Positionner (grâce au potenti. droit « commande tangage », le balancier dans une position voisine de + 10° sens anti-horaire ;
- **Mettre en place la tige de déstabilisation**, et exercer une action continue pendant une seconde ou deux, pour faire pivoter le balancier de 5 à 10 degrés environ.
- Voir que la boucle d'asservissement du drone didactique D2C commande alors une modification de la vitesse des moteurs et cherche à ramener le balancier en position ;
- Retirer la tige de déstabilisation.
- vérifier que le balancier revient à sa position initiale. (réitérer éventuellement l'opération)

2-2-3 Ajustement de la correction dérivée

avec $K_{p2} = 0,5$ à $0,8$ la manipulation précédente a dû conduire à un résultat voisin de $K_{i2} = 0,001$; L'objectif est maintenant de montrer l'effet stabilisant de la correction dérivée.

Nota : le correcteur dérivé est en réalité un correcteur « dérivé-filtré », de gain dérivé K_{d2} et de pulsation de cassure du filtre dérivé notée « Puls-Fd » ; on utilisera sans explications $K_{d2} = 6$ et une pulsation Puls-Fd = 50 rd/s.



Travail 7 :

Expérimenter pour montrer l'effet stabilisant du correcteur dérivé.

Montrer que le coefficient K_p peut être encore augmenté grâce à ce correcteur dérivé et que le système peut être encore plus rapide (réactif) que précédemment

(Nota : en cliquant sur « PID Reset », les réglages d'usine considérés comme optimums sont réappliqués ; cliquer ensuite sur choix « boucle gyro » pour revenir à la boucle de vitesse du TP)

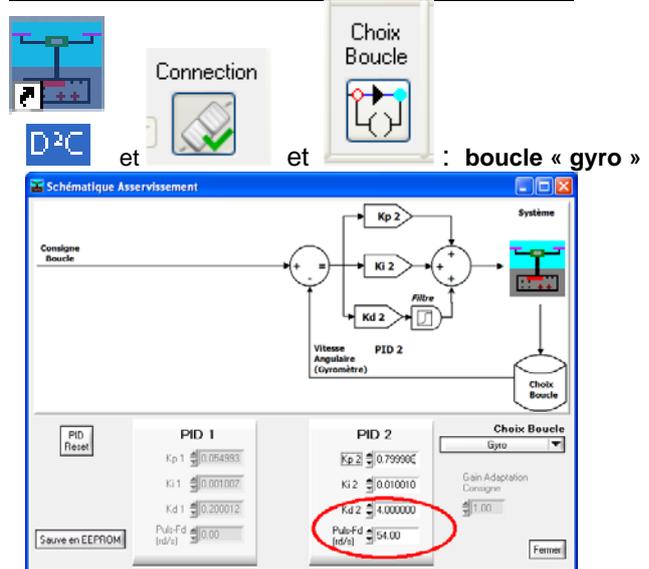
En conclusion, mettre en place un tableau qui récapitule l'effet obtenu sur la boucle d'asservissement par chacun des correcteurs P ; I ; D.

Conditions d'expérimentation

a) Conditions d'expérimentation « pupitre » et « système »

- système branché ; interrupteur « 0/1 » sur 1, « Arrêt Général » déverrouillé.
- connexion USB avec le PC en place ;
- 3 cavaliers noirs commande moteurs et bloqueur en place.
- 2 cavaliers rouges alimentation moteurs en place.
- tige de mesure d'effort enlevée ;
- porte d'accès aux moteurs fermée ;
- bouton « commande bloqueur » sur « tangage libre » ;
- bouton « PC/MANU » sur PC
- bouton BO/BF sur « Boucle fermée » ;
- potentiomètre « Commande moteurs » en position gauche (0%) ;
- potentiomètre « Commande Tangage » en position centrale ;

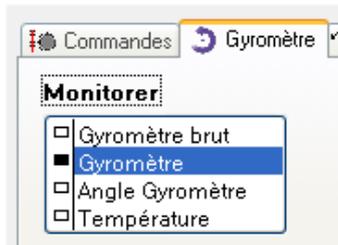
b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »



et et : boucle « gyro »

c) Conditions d'expérimentation : « affichage »

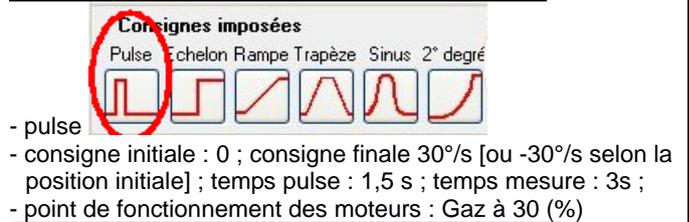
(cliquer sur « commandes » si pas d'accès direct)
monitorer : « gyromètre » et « consigne boucle » :

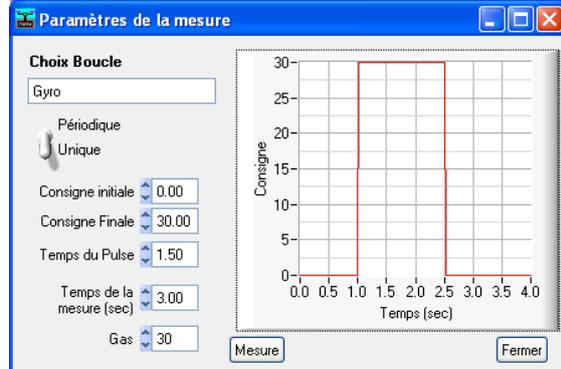



Une fois la mesure réalisée, les résultats seront enregistrés et une fenêtre de post-traitement s'affichera ; un accès aux résultats enregistrés est toujours possible ultérieurement avec l'icône « Affichage Mesures » :



d) Condition d'expérimentation : « consignes »

- 
- pulse
 - consigne initiale : 0 ; consigne finale 30°/s [ou -30°/s selon la position initiale] ; temps pulse : 1,5 s ; temps mesure : 3s ;
 - point de fonctionnement des moteurs : Gaz à 30 (%)



- Ouvrir la porte ; Positionner manuellement le balancier du côté du départ, **fermer la porte et cliquer sur « mesure »** ; donner un nom au fichier ; la mise en marche se fait dès le clic sur « Enregistrer »

3- Troisième partie : analyse des écarts entre le modèle et le réel.

Cette partie nécessite d'avoir travaillé en simulation sur le modèle de l'asservissement du drone didactique D2C (TP Asservir 1-2 avec Matlab- Simulink ou Scilab-Xcos ou autre logiciel de simulation ...).

Dans le cas où deux groupes de travail différents ont procédé séparément à l'étude expérimentale et à l'étude en simulation, cette partie nécessite une mise en commun des conclusions et éventuellement un retour sur certaines expérimentations.

Nota : concernant les correspondances de coefficients du correcteur intégral entre simulation et expérimentation :

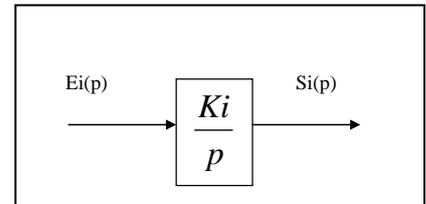
La relation de récurrence mise en place dans le programme du système D²C pour la correction intégrale est :

$$Si_n = Si_{n-1} + Ki.Ei_n.Te$$

Te étant la période d'échantillonnage choisie à 3,2 millisecondes.

en conséquence, pour le coefficient Ki on a la relation :

$$Ki(D^2C) = Ki(\text{simulation}) \times 3,2 \cdot 10^{-3} ; \text{ ou encore : } \boxed{Ki(D^2C) = Ki(\text{simulation}) / 312,5}$$



Travail 8 :

En considérant les réglages optimums obtenus d'une part par la méthode de réglage expérimentale, et d'autre part par la simulation du modèle (Matlab- Simulink ou Scilab-Xcos ou ...), mettre en évidence les écarts entre le comportement réel et le comportement simulé.

Les critères d'analyse proposés sont :

- la précision de la mise en vitesse ;
- la rapidité de la mise en vitesse ;
- la stabilité du réglage obtenu ;
- Les concordances entre les valeurs des coefficients obtenus par simulation et ceux effectivement acceptables sur le système réel.

Proposer une explication aux écarts constatés.