

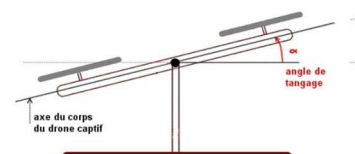
ANALYSE ET CONCEPTION D'UN CORRECTEUR

DRONE D2C

1 PROBLÉMATIQUE

Obtenir le vol stable d'un quadri rotor n'est pas chose facile ; la mise en place de boucles d'asservissement autour de la centrale inertielle et de correcteurs dans le microcontrôleur 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 : Quadrirotor-pilotage-en-position.avi : <http://youtu.be/5g1YTMuls0w> et Quadrirotor-pilotage-en-vitesse.avi : <http://youtu.be/iQ-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).



Nous verrons 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 en simulation de cette boucle de vitesse, et la « commande en vitesse angulaire » du drone.

Cahier des charges

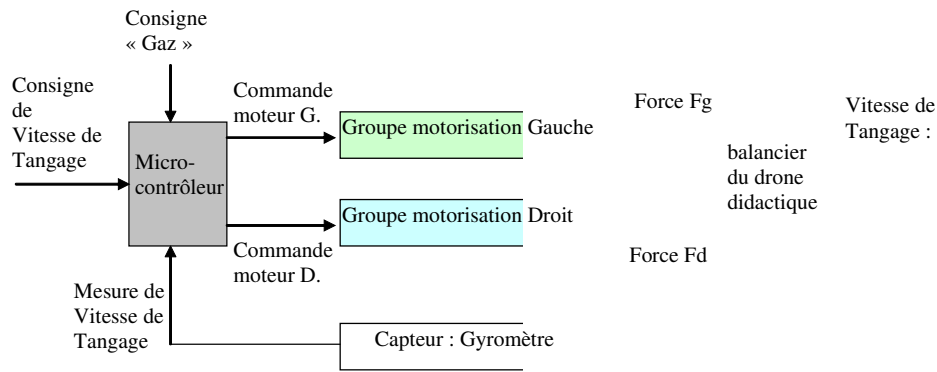
On considère que cette boucle de vitesse est correctement réglée si les deux critères ci-dessous sont respectés :

fonction	critère	niveau
Obtenir un bon comportement de la boucle de vitesse	1- Marge de phase	> 45°
	2- Dépassement	< 25%
	3- Temps de réponse à 5%	< 0,5 s

2 SITUATION DE L'ÉTUDE

L'objectif est de justifier l'agencement et la constitution du schéma-bloc détaillé de la boucle d'asservissement de vitesse. Le document ressource présente les constituants matériels du drone didactique, ainsi que les grandeurs (information ou énergie) échangées entre ceux-ci.

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

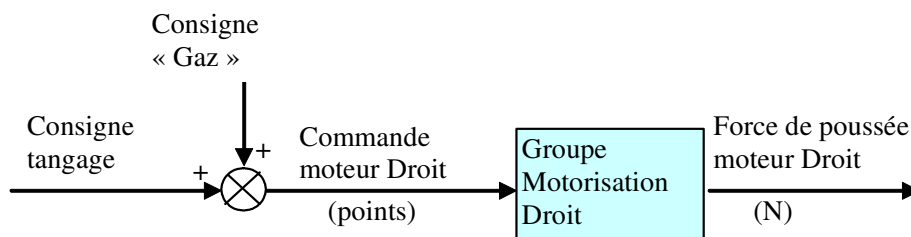


Le microcontrôleur reçoit la consigne de vitesse de tangage, ainsi que la mesure de la vitesse réalisée par le gyromètre de la centrale inertielle du drone didactique. Le document ressource présente le principe de fonctionnement du gyromètre ainsi que les données techniques du constructeur

3 TRAVAIL DES EXPÉRIMENTATEURS

3.1 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 suivante.



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. **À noter** : tous les traitements réalisés par le microcontrôleur (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.

Activité 1. Prendre connaissance de la fiche 8 : Mesure pour l'indentification de la motorisation.

- ☐ 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.

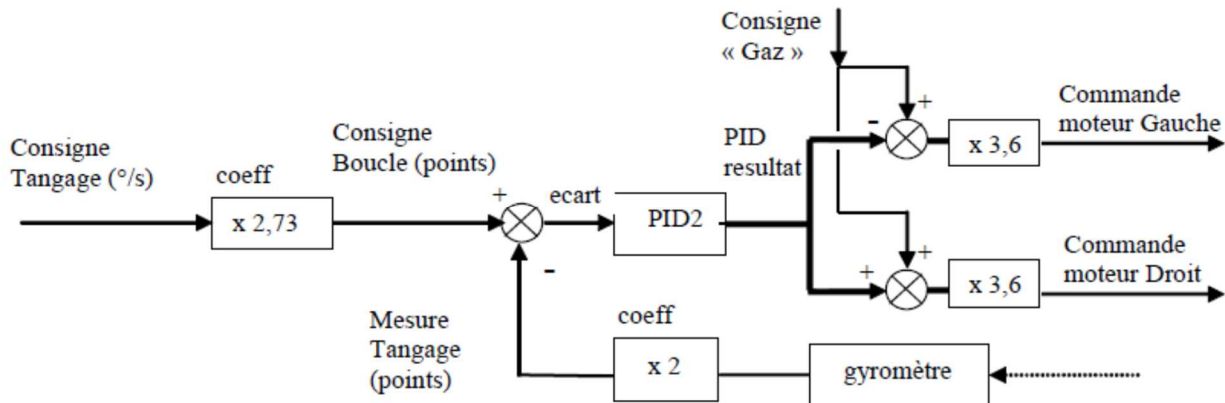
Activité 2.

- ☐ Expérimenter dans les mêmes conditions qu'à l'activité 1, mais avec une entrée sinusoïdale de pulsation égale à la pulsation de cassure du modèle identifié à l'activité 1.
- ☐ Comparer les valeurs du déphasage attendu et du déphasage mesuré, proposer une explication aux écarts éventuellement constatés.

3.2 Réglages des paramètres de la boucle de vitesse

3.2.1 Validation de la fonction de transfert des composants de la boucle de vitesse

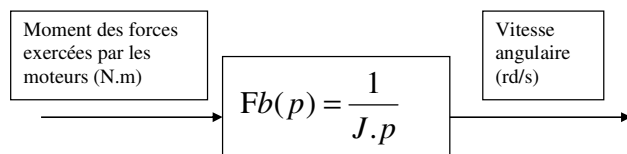
La programmation de la boucle de vitesse fait intervenir le schéma suivant :



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 3 - 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 : $F_b(p) = \frac{1}{Jp}$ (frottements négligés).

J est le moment d'inertie du balancier équipé, par rapport à son axe de rotation : $J = 10^{-2} \text{ kg.m}^2$. b est le bras de levier ou distance d'un moteur à l'axe de rotation : $b = 0,14 \text{ m}$



Activité 3.

- Montrer que l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée de la commande en vitesse lorsque $\text{PID}(p)=1$ est $FTBF_{\text{vitesse}}(p) = \frac{1/G_{\text{retour}}}{1 + \frac{J}{7,2bKmG_{\text{retour}}}p + \frac{\tau_m J}{7,2bKmG_{\text{retour}}}p^2}$.
- Exprimer G_{retour} et déterminer la période propre T_0 et la période amortie T_a du mouvement résultant de l'application d'un échelon.

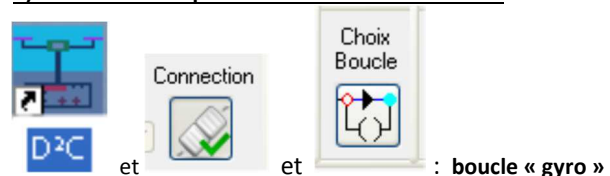
Activité 4.

- 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.

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 » ;**
- potentio « Commande moteurs » en position gauche (0%) ;
- potentio. « Commande Tangage » en position centrale ;

b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »




: boucle « gyro »


c) Conditions d'expérimentation : « affichage »
(cliquer sur « commandes » si pas d'accès direct)
monitorer : « **gyromètre** » et « **consigne boucle** » :



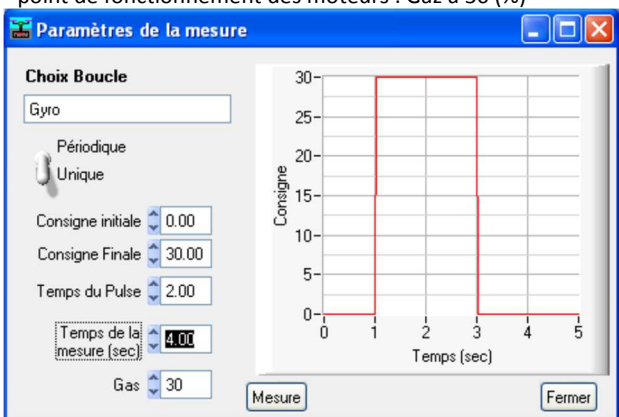
Une fois la mesure réalisée, les résultats seront enregistrés dans un fichier (à nommer préalablement) et une fenêtre de post-traitement s'affichera ; un accès aux résultats enregistrés est toujours possible ultérieurement avec l'icône « Affichage Mesures » :



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 : 4 s ;
- 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 »

3.2.2 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.

Ajustement de la correction Proportionnelle

Le réglage initial est : ($K_{p2} = 1$; $K_{i2} = 0$; $K_{d2} = 0$; Puls-Fd = 0)

Activité 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.

Ajustement de la correction Intégrale

le réglage précédent a dû conduire à un résultat voisin de $Kp2 = 0,8$ à $0,5$, selon l'hélice et la motorisation utilisée ; avec ($Ki2 = 0$; $Kd2 = 0$; Puls-Fd = 0). Avec la valeur de $Kp2$ déduite du travail 5, il s'agit maintenant d'expérimenter pour régler le coefficient $Ki2$ de façon à augmenter la résistance du système aux perturbations (précision).

Activité 6.

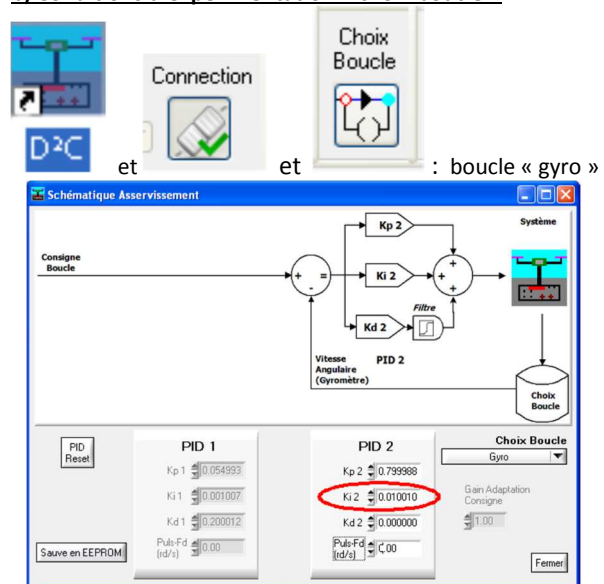
- ❑ Il s'agira (à vitesse nulle) de générer une perturbation avec la « tige de déstabilisation » présentée ci-dessous dans les conditions d'expérimentation, pour faire en sorte qu'après suppression de la perturbation, le système reprenne sa position précédente (effet de l'intégrateur).
- ❑ Augmenter progressivement Ki , depuis 0 par paliers de 0,0005 jusqu'à obtenir le comportement indiqué, sans oscillations trop importantes.
- ❑ Donner la valeur de Ki qui convient.

Conditions d'expérimentation

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

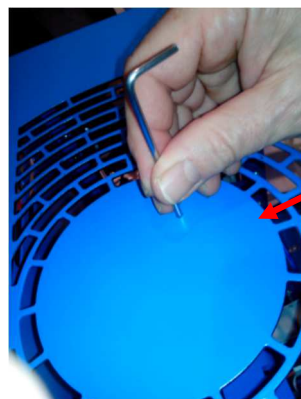
- système branché ; interrupteur « 0/1 » sur 1, « Arrêt Général » déverrouillé.
- connexion USB avec le PC en place ;
- 3 cavaliers noirs commande moteurs et bloqueur en place.
- 2 cavaliers rouges alimentation moteurs en place.
- tige de mesure d'effort enlevée ;
- porte d'accès aux moteurs fermée ;
- 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 :

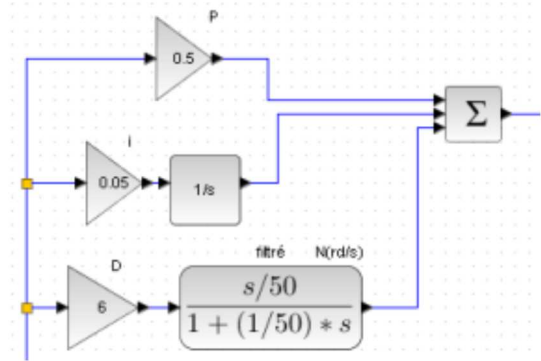
- Positionner (grâce au potentiomètre droit « commande tangage », le balancier dans une position voisine de $+10^\circ$ sens anti-horaire ;
- **Mettre en place la tige de déstabilisation**, et exercer une action continue pendant une seconde ou deux, pour faire pivoter le balancier de 5 à 10 degrés environ.
- 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)

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.



Activité 7.

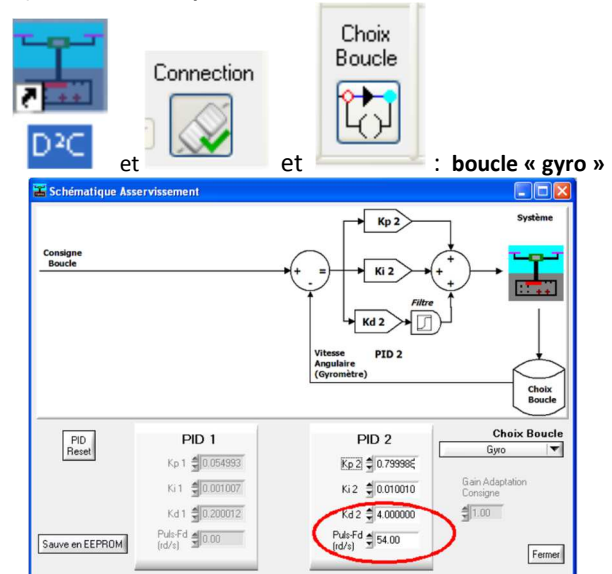
- ☐ Expérimenter pour montrer l'effet stabilisant du correcteur dérivé.
- ☐ Montrer que le coefficient K_p peut être encore augmenté grâce à ce correcteur dérivé et que le système peut être encore plus rapide (réactif) que précédemment (Nota : en cliquant sur « PID Reset », les réglages d'usine considérés comme optimaux sont réappliqués ; cliquer ensuite sur choix « boucle gyro » pour revenir à la boucle de vitesse du TP).

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 »



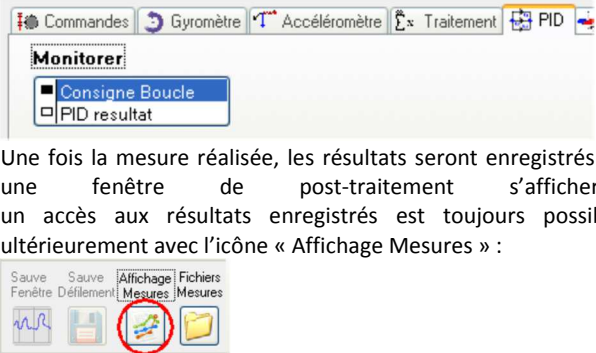
c) Conditions d'expérimentation : « affichage »

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

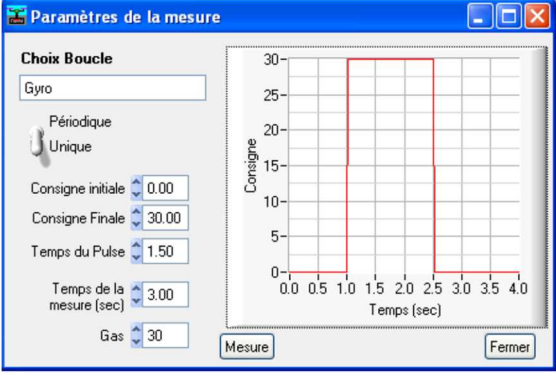


d) Condition d'expérimentation : « consignes »

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



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 » :



- 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 »

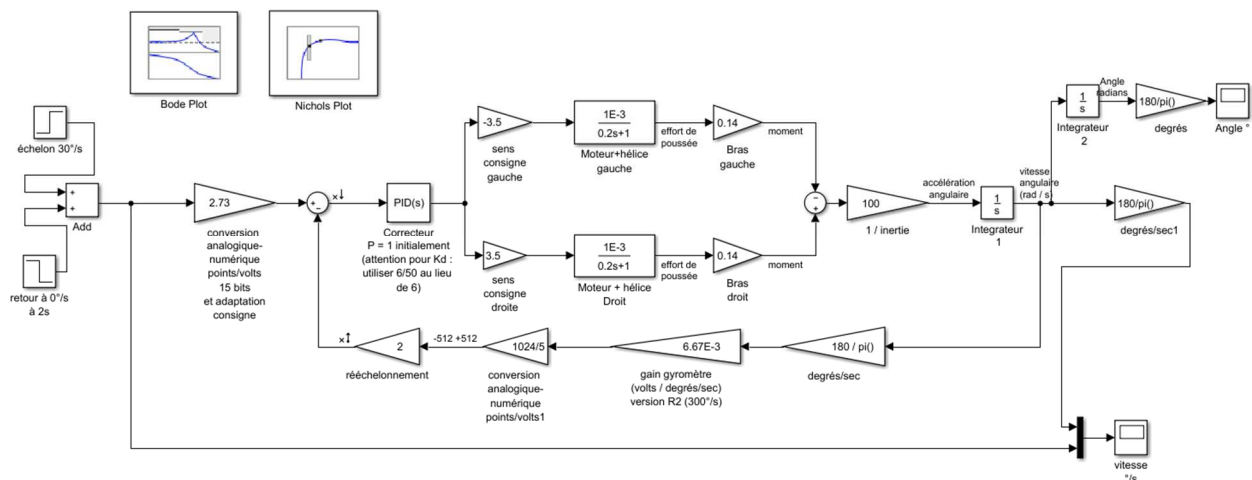
Activité 8. Synthèse

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

4 TRAVAIL DES MODÉLISATEURS

4.1 Justification du schéma-bloc détaillé

Fichier à utiliser sous Scilab-Xcos : « [D2C-Simulation-vitesse-sujet.slx](#) » (à sauvegarder à votre nom) le schéma-blocs détaillé est présenté ci-dessous ; différentes zones d'analyse sont proposées.



Précautions : Certains blocs sont fournis sans explication car ils résultent de travaux réalisés dans d'autres TP du drone didactique (pour la motorisation et l'inertie par exemple). Du fait de variations possibles entre les matériels, Il est possible que les valeurs fournies dans ces blocs diffèrent quelque peu des valeurs obtenues lors des manipulations réalisées dans ces autres TP ; il s'agira alors d'utiliser les valeurs associées au drone du laboratoire et non les valeurs fournies.

Par ailleurs, les valeurs proposées pour la motorisation sont obtenues pour un point de fonctionnement particulier (en général correspondant à une vitesse moteur de 25% à 30%) ; pour des vitesses différentes, les valeurs peuvent être différentes.

Activité 1.

- ☐ Sur le schéma-blocs, « localiser » le capteur (gyromètre), la correcteur (PID) ainsi que le balancier.
- ☐ Valider le coefficient de gain du capteur gyromètre à partir de la documentation de la fiche technique « [Fiche-d_information-gyrometre-et-mesures.pdf](#) » et préparer pour l'explication orale une description de son principe ainsi que de la manière de déterminer son gain à partir des données du constructeur.

4.2 Ajustement du correcteur proportionnel

Les coefficients **I** et **D** du correcteur PID sont choisis nuls pour cette étude.

Modifier les valeurs du correcteur PID pour placer dans les blocs de ce correcteur :

- la valeur 1 à la place de K_{p2} ;
- la valeur 0 à la place de K_{i2} ;
- la valeur 0 à la place de K_{d2} .

Activité 2.

- ☐ Lancer la simulation.
- ☐ Exploiter les réponses temporelles et le diagramme de Bode qui s'affichent pour comparer la réponse du système vis-à-vis des critères 1 et 2 du cahier des charges.
- ☐ Choisir la valeur de K_p qui permet de répondre à ces deux premiers critères.

4.3 Ajout d'une correction intégrale : le correcteur PI

On conserve la valeur de K_p (voisine de 0,8) obtenue au travail précédent.

L'objectif est maintenant mettre en place une correction intégrale qui devrait permettre de contrecarrer l'effet des perturbations qui s'exercent sur le balancier en mouvement (turbulences ou frottement de la liaison pivot sur le système D2C).

4.3.1 Mise en place de la perturbation

On se propose d'ajouter une perturbation en échelon pour visualiser l'effet des modifications apportées ultérieurement au correcteur.

Activité 3.

- ☐ Mettre en place un échelon dans le schéma-bloc, pour simuler l'application d'une perturbation de couple sur le balancier de 0,002 Nm à l'instant $t=6s$; augmenter la durée de la simulation à 20s (bloc « Time »).
- ☐ Relancer la simulation et vérifier que son effet ne disparaît pas en régime établi.

4.3.2 Choix du coefficient K_{i2} du correcteur

On se propose de choisir la valeur du **Ki2** en anticipant l'effet du correcteur

Activité 4.

- ☐ En regardant dans le bloc PID, donner la fonction de transfert du correcteur en fonction de P et I . En le mettant sous la forme $C(p) = K_{p2} \frac{1 + \frac{K_{p2}}{K_{i2}}p}{\frac{K_{p2}}{K_{i2}}p}$, donner la relation entre P , I , K_{p2} , K_{i2} .
- ☐ Tracer l'allure du diagramme de Bode du correcteur et montrer que sur la courbe de phase de la FTBO de la boucle de vitesse du système D2C, l'intégrateur provoquera une diminution de 90° des valeurs de phase.
- ☐ Choisir alors la pulsation de cassure ω_c de ce correcteur, la plus élevée possible, pour qu'il ne modifie pas la marge de phase obtenue avec le réglage de K_{p2} ; en déduire la valeur de K_{i2} optimale.
- ☐ Vérifier le choix et l'effet du correcteur en traçant le diagramme de Bode du système corrigé ; vérifier que la perturbation peut être annulée en régime établi (choisir une durée de simulation de 20s). Commenter.

4.3.3 Analyse de l'effet de la correction dérivée :

Nota : le correcteur utilisé est de type PID « filtré » où le terme dérivé est associé à un filtre passe-bas du premier ordre. Ce filtre passe-bas permet d'obtenir la causalité sur cette partie dérivée du correcteur PID (le degré du dénominateur est supérieur ou égal au degré du numérateur).

On propose de garder les corrections précédentes, avec $K_{p2} = 0,5$ et $K_{i2} = 0,05$;

Tout en ajoutant une correction dérivée : $K_{d2} = 6$ et $N = 50$.

Activité 5.

- ☐ Analyser l'effet de cette nouvelle correction, et montrer dans un premier temps, que le gain proportionnel K_p peut être augmenté de manière importante grâce à l'utilisation de cette correction dérivée.

- ☐ Mettre en place dans un deuxième temps la correction proportionnelle pour tenter de valider tous les critères du cahier des charges ; identifier l'effet principal de cette correction dérivée après ajustement du coefficient proportionnel.

5 TRAVAIL DE SYNTHÈSE : ANALYSE DES ÉCARTS ENTRE LE MODÈLE ET LE RÉEL.

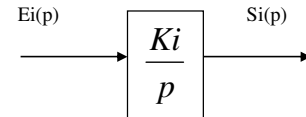
Nota : concernant les correspondances de coefficients du correcteur intégral entre simulation et expérimentation :

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 :

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



Synthèse

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.