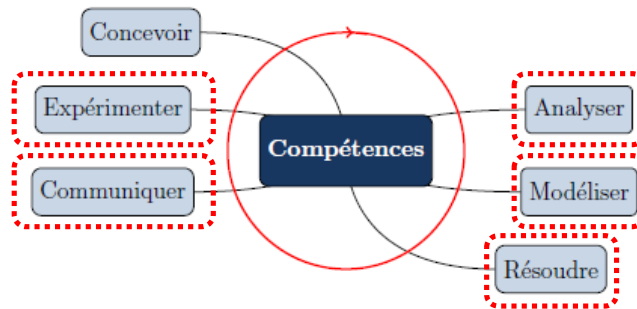


**Problème technique :**

*Mettre en place un asservissement performant du système pour son axe de tangage.*

**Matériel utilisé :**

- Drone didactique contrôlé D2C
- Logiciel d'acquisition associé au système
- Logiciel de modélisation simulation : Matlab Simulink

**I. Prise en main et Analyse du système****1. Préambule: le drone pour l'étude de la commande du drone réel**

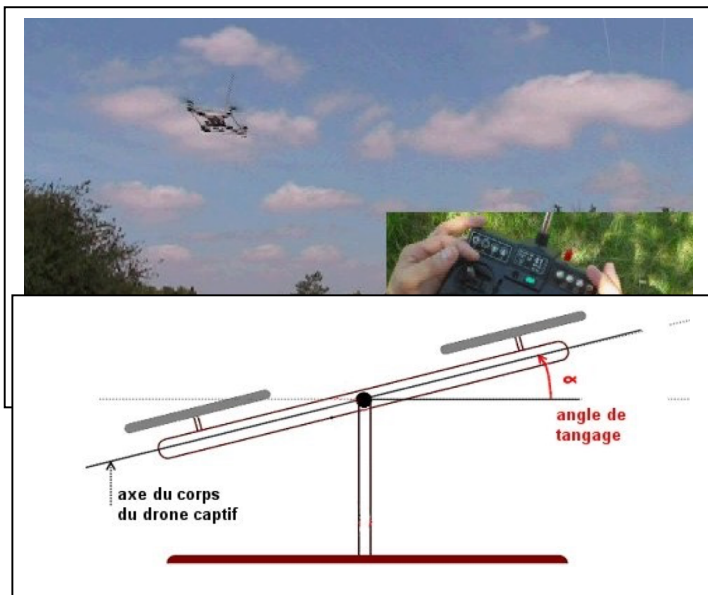
Obtenir le vol stable d'un quadrirotor n'est pas chose facile ; la mise en place de boucles d'asservissement autour de la centrale inertielle, et de traitements numériques dans le micro-contrôleur permettent d'atteindre cet objectif.

Pour pouvoir réaliser un vol en translation, le drone doit pouvoir être placé dans une position inclinée.

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)

Le travail proposé porte sur la « commande en vitesse angulaire de tangage » du drone et l'analyse de l'asservissement de cette vitesse de tangage, à partir du drone didactique qui possède tous les composants d'un drone réel.



L'ensemble du travail se décompose en 5 activités :**Activité 1 : décrire et prendre en main, le drone didactique**

Travail 1 : réaliser la description

Travail 2 : mettre en service

**Activité 2 : modéliser la boucle d'asservissement en vitesse de tangage**

Travail 3 : finaliser la boucle de retour

Travaux 4 et 5 : expérimenter moteurs à l'arrêt pour comprendre le traitement des consignes

Travail 6 : modéliser le corps du drone D2C

Travail 7 : expérimenter pour obtenir la fonction de transfert de la motorisation

**Activité 3 : simuler le comportement de la boucle d'asservissement en vitesse de tangage**

Travail 8 : simuler le comportement, comparer au cahier des charges

Travail 9 : ajuster la valeur du gain du correcteur proportionnel

**Activité 4 : simplifier le modèle**

Travail 10 : obtenir la fonction de transfert équivalente et retrouver les résultats de simulation

**Activité 5 : synthèse**

Travail 11 : expérimenter sur le drone et comparer les résultats avec ceux de la simulation

Travail 12 : récapituler les résultats

Pour une démarche conduite en îlot, le travail pourra être décomposé comme suit :

Conducteurs de projet	Modélisateurs	Expérimentateurs
Travaux : 1, 10, 12	Travaux : 3, 6, 8, 9	Travaux : 2, 4, 5, 7, 11

**1. Activité 1 : décrire et prendre en main le drone didactique****A1-1 – Analyse des constituants du drone didactique.***Cette partie nécessite de prendre connaissance de la FICHE 1 « Description du drone D2C (Sysml) ».*

**Travail 1 : Situer** chaque composant des chaînes d'énergie et d'information du drone didactique, puis **réaliser** une description de l'ensemble avec un graphe « chaîne d'énergie – chaîne d'information », qui sera utilisé pour effectuer la présentation lors de la restitution orale des travaux.

**A1-2 - Mise en service du drone didactique.***Cette partie nécessite de prendre connaissance de la FICHE 2 « Mise en œuvre du drone D2C ».***Travail 2 : Mettre en service** et faire fonctionner manuellement le drone didactique :

- d'une part avec la procédure de pilotage en mode « position » (§F2-1 puis §F2-2) ;
- et d'autre part avec la procédure de pilotage en mode « vitesse de tangage » (§F2-3) ;

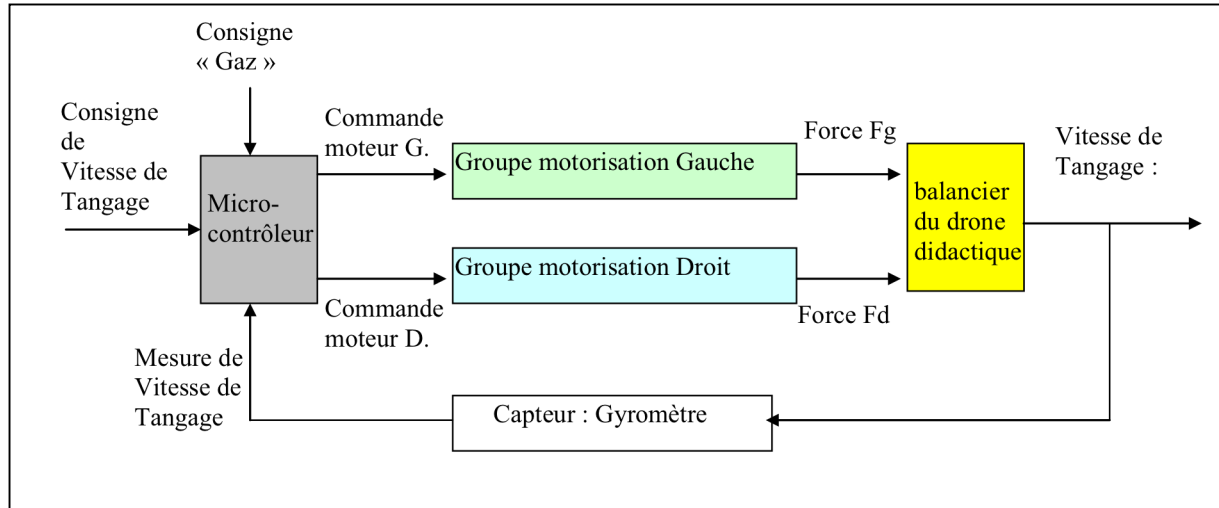
**Préparer** la description du drone didactique dans chacun des deux modes de pilotage, en mettant en valeur dans chaque cas, les liens entre chaînes d'énergie et d'information, et en situant à bon escient le capteur associé à chacun des deux modes de fonctionnement.

Pour la suite on utilisera uniquement le mode « vitesse de tangage » (choix boucle : Gyro), avec le réglage suivant du correcteur :  $K_p2 = 1$  ;  $K_i2 = 0$  ;  $K_d2 = 0$  ; Puls-Fd indifférent.

## II. Modélisation

### 1. Activité 2: Modélisation la boucle d'asservissement en vitesse de tangage

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 » :

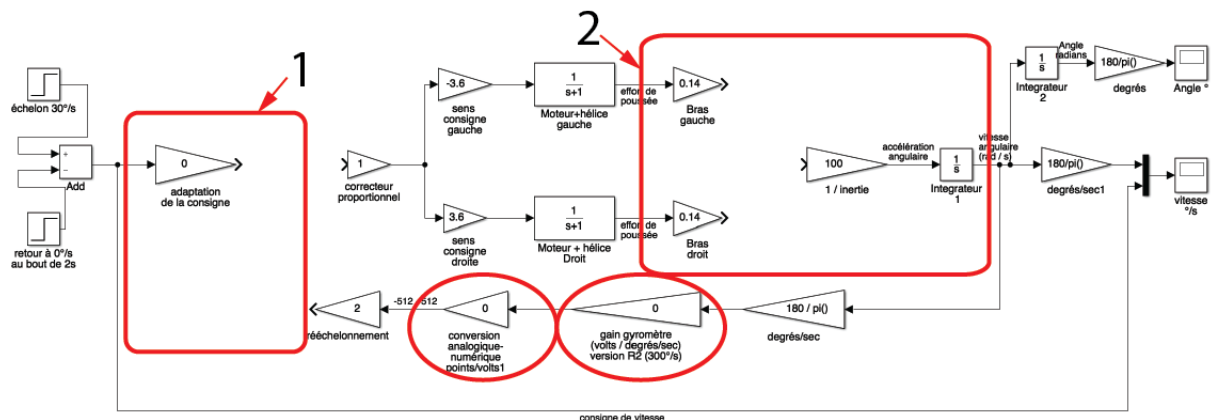


Le micro-contrôleur reçoit la consigne de vitesse de tangage, ainsi que la mesure de la vitesse réalisée par le gyromètre de la centrale inertielle du drone didactique ;

#### A2-1 Schéma-bloc à compléter :

Lancer le logiciel Matlab utilisé dans le laboratoire, pour utiliser le fichier à compléter :

« D2C\_boucle\_vitesse\_acompleter.slx »



(\* : Les coefficient 3,6 sont dûs au mode de génération des commandes par « timer » interne au microcontrôleur)

#### A2-2 Finaliser la boucle de retour :

##### Travail 3 :

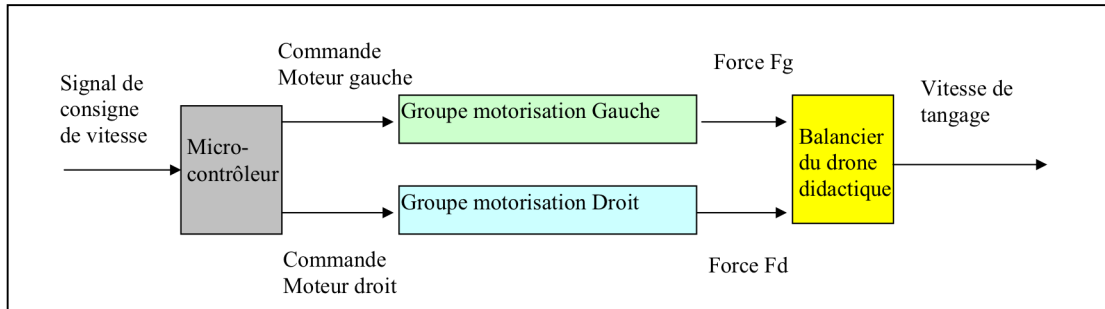
**Cette partie nécessite de prendre connaissance de la FICHE 6 « informations Gyromètre ».**

Sachant que le convertisseur analogique/numérique du micro-contrôleur code sur 10 bits un signal d'une amplitude de 0 à 5 volts, **compléter** les 2 blocs entourés de la chaîne de retour du schéma-blocs.

**A2-3 analyse des signaux de commande des moteurs**

**Objectif 1 :** mettre en évidence l'évolution des signaux de commande lors d'une variation de la consigne de vitesse du drone didactique.

**Donnée :** On propose un schéma simplifié avec la chaîne directe seule.



Le micro-contrôleur réalise un calcul qui permet de générer les commandes de chaque moteur notées « commande moteur gauche » et « commande moteur droit » ;

**Travail 4 :**

**Cette partie nécessite de prendre connaissance de la FICHE 3 « commande moteurs fonction de la consigne » et de la FICHE 4 « analyse des résultats d'acquisitions ».**

**Expérimenter** conformément aux directives de la Fiche 3, pour analyser les signaux de commande des moteurs, lorsqu'une variation de consigne se produit.

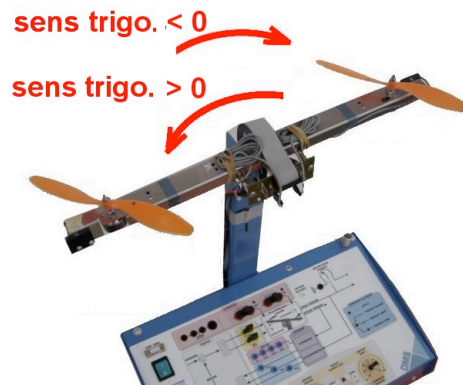
**(on ouvrira préalablement la porte du système D2C (côté droit) pour supprimer l'alimentation en énergie des moteurs ; on placera manuellement le balancier en position horizontale ; celui-ci devant rester à l'horizontale pendant la manipulation associée à ce travail).**

**Nota :** si le balancier ne peut rester en position horizontale, le professeur devra réaliser l'équilibrage statique du balancier à l'aide de rondelles métalliques ajoutées d'un côté ou de l'autre, sur les boulons visible au niveau des moteurs ou au-dessus de la carte « mesures ».

**Analyser** les courbes enregistrées (icône « Affichage mesure ») et **Reproduire puis Compléter** le tableau suivant en indiquant « FAIBLE » ou « FORT » dans les colonnes du signal de commande des moteurs :

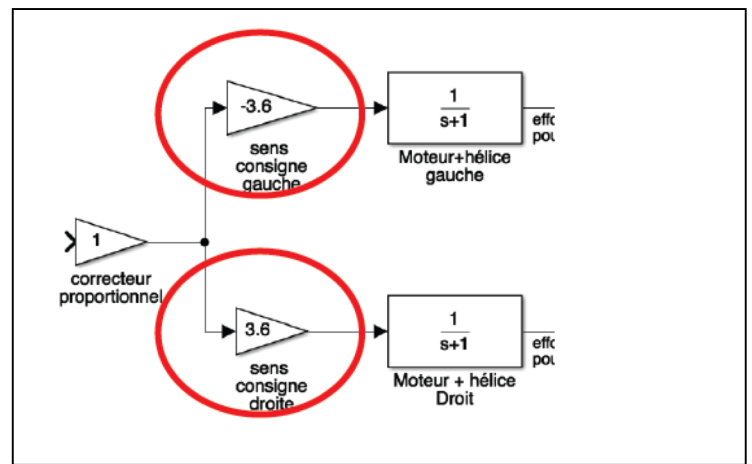
Position du bouton du potentiomètre « commande tangage »	Signal « commande moteur gauche »	Signal « commande moteur droit »	Mouvement prévisible du balancier dû aux hélices
Côté gauche = SENS TRIGO > 0 → <b>Consigne</b> tangage négative.			
Côté droit = SENS TRIGO < 0 → <b>consigne</b> tangage positive.			

Sachant que chaque hélice fournit un effort de traction proportionnel au signal de commande du moteur, **en déduire** dans la colonne de droite du tableau, pour chaque position du bouton, le sens prévisible du mouvement du balancier qui serait généré par les hélices (SENS TRIGO >0 ou SENS TRIGO <0).

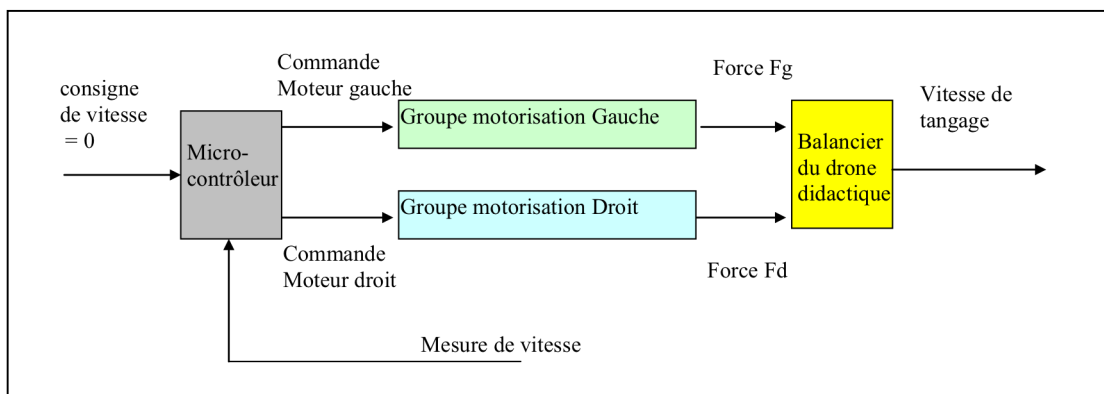


**En raisonnant sur les sens des mouvements que l'on placera en consigne**, justifier en conséquence les **signes** qui affectent les gains de 3,6 des lignes qui commandent les moteurs.

**Objectif 2 :** mettre en évidence l'évolution des signaux de commande lors d'une variation de la vitesse angulaire du drone didactique, la consigne étant maintenue à zéro °/s.



**Donnée :** Le diagramme simplifié prend en compte une partie de la boucle de retour.



### Travail 5 :

**Réaliser** manuellement des mouvements de pivotement du balancier en laissant le bouton « commande tangage » immobile en position centrale (commande de vitesse nulle).

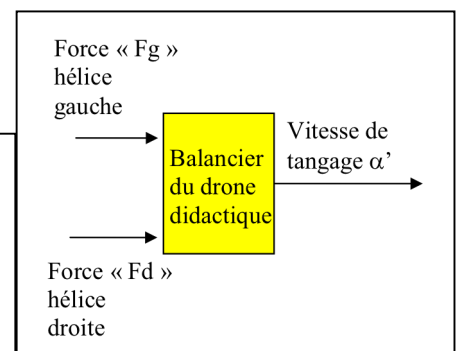
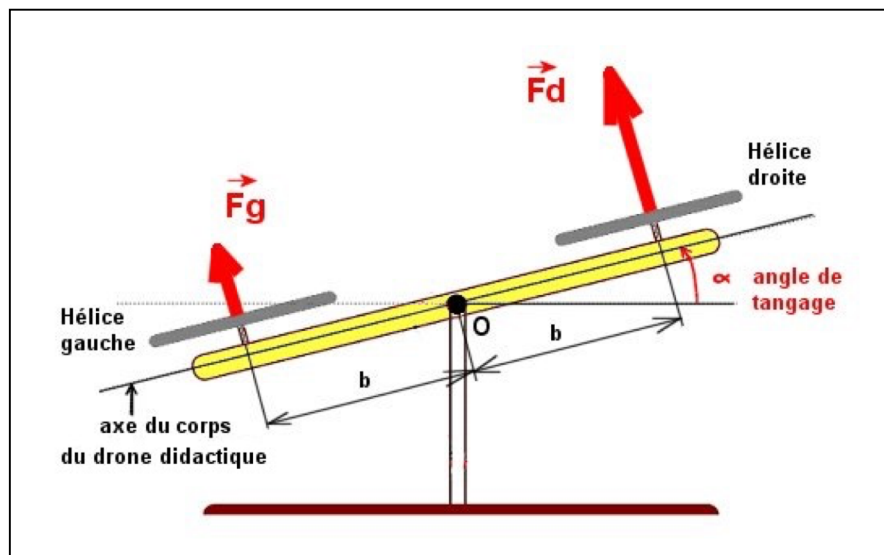
**Analyser** les courbes enregistrées (icône « Affichage mesure ») et **Reproduire puis Compléter** le tableau suivant en indiquant « FAIBLE » ou « FORT » dans les colonnes du signal de commande des moteurs et **en déduire** dans la colonne de droite du tableau, pour chaque sens d'évolution du balancier, le mouvement qui serait généré par les hélices (SENS TRIGO >0 ou SENS TRIGO <0).

Vitesse d'évolution du <b>balancier</b>	Signal « commande moteur gauche »	Signal « commande moteur droit »	Mouvement du balancier qui serait généré par les hélices
Côté gauche = SENS TRIGO > 0 → <b>Mesure gyromètre</b> négative.			
Côté droit = SENS TRIGO < 0 → <b>Mesure gyromètre</b> positive.			

A partir des observations effectuées dans les deux étapes, compléter le schéma-blocs (**zone 1**). La valeur du gain d'adaptation, sera déterminée en utilisant les résultats du **travail 3**.

#### A2-4- modélisation du balancier (corps) du drone didactique

L'objectif de ce paragraphe est de vérifier le modèle proposé pour faire le lien entre les grandeurs d'entrée du bloc « balancier du drone didactique » et la grandeur de sortie (figure ci-contre) :



Données sur les grandeurs du mouvement de tangage :

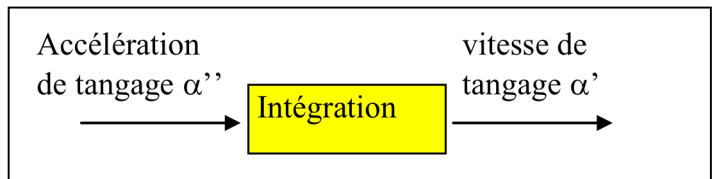
Lors du mouvement, de tangage, il y a trois grandeurs qui dépendent du temps qui sont à prendre en compte :

- L'angle de tangage  $\alpha$  (ou position angulaire) ;
- la vitesse angulaire de tangage (notée  $\alpha'$ ) (on dit « alpha prim » ou aussi « alpha point ») ;

on peut mémoriser le fait que la vitesse angulaire ( $\alpha'$ ) caractérise la rapidité d'évolution de la position angulaire ( $\alpha$ ).

- l'accélération angulaire de tangage (notée  $\alpha''$ ) (on dit « alpha seconde » ou « alpha point-point »). L'accélération angulaire ( $\alpha''$ ) caractérise la rapidité d'évolution de la vitesse angulaire ( $\alpha'$ ).

Le modèle de connaissance qui lie les différentes grandeurs est le **modèle de l'intégration** (notée « 1/p » avec la variable de Laplace, notée aussi « 1/s » dans le logiciel de simulation).



$$[b.F_d - b.F_g - C_f] = J.\alpha''$$

où :

$F_d$  et  $F_g$  : sont les forces générées par les hélices gauche et droite ;

$b$  : est le bras de levier pour exprimer le moment des forces  $F_g$  et  $F_d$  calculé au point O ;

$J$  : est appelé « moment d'inertie » du corps du drone didactique ;

$\alpha''$  : est l'accélération angulaire du corps du drone didactique ;

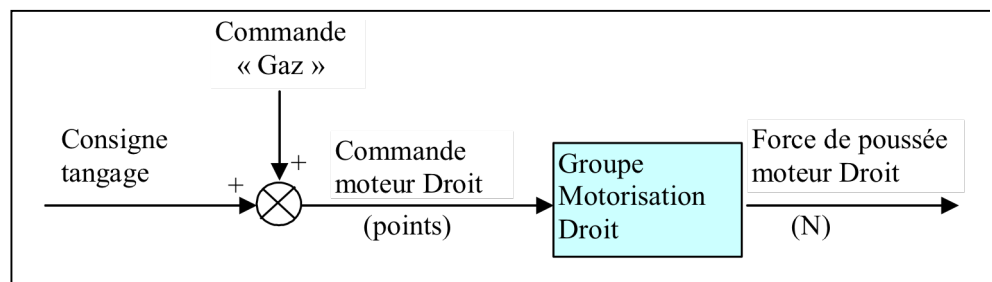
$C_f$  : est un « couple de frottement » qui peut intervenir au point O de l'axe d'articulation pour freiner le mouvement de tangage ; On propose dans la suite de négliger le couple de frottement  $C_f$  :  $C_f = 0$ .

### Travail 6 :

Sur le schéma-blocs de la boucle d'asservissement de vitesse de tangage, **compléter** la **zone 2** entourée pour représenter le modèle de connaissance associé à l'équation des moments du principe fondamental de la dynamique (une attention particulière sera portée aux signes de l'équation).

### A2-5 fonction de transfert de la motorisation autour d'un point de fonctionnement

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 :

**1-** 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 codage en binaire sur 15 bits signés.



2- Le signal noté « commande gaz » est celui qui, sur le drone réel, correspond à la vitesse de rotation nominale des moteurs permettant de réaliser le vol stationnaire ; sa valeur dépend des charges embarquées.

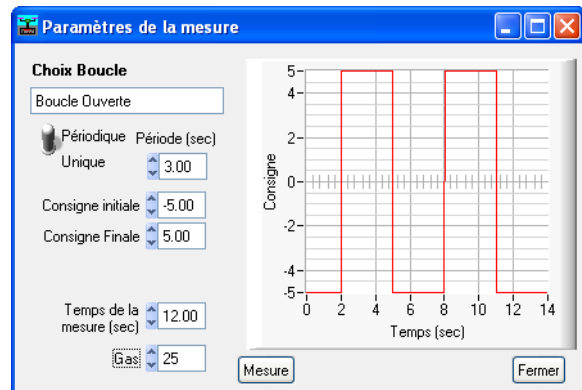
Sur notre drone didactique, on utilisera une valeur de 25% de la vitesse maxi, pour limiter les nuisances sonores. Mais il faut savoir que les valeurs qui seront obtenues pour le modèle de comportement, peuvent varier selon ce choix du « point de fonctionnement ».

### Travail 7 :

*Cette partie nécessite de prendre connaissance de la FICHE 5 « Mesure entrée-sortie motorisation » et de la FICHE 4 « analyse des résultats d'acquisitions ».*

**Expérimenter** pour obtenir la réponse temporelle de la motorisation « groupe motorisation droit » dans les conditions suivantes :

- autour du « point de fonctionnement » Gaz à 25% ;
- consigne de deux créneaux successifs (qui reproduisent donc deux échelons positifs et deux échelons négatifs) choisi de -5% à +5% :



**En déduire** le gain « Km » (en Newtons par points de commande) et la constante de temps «  $\tau_m$  » d'un modèle approché équivalent du premier ordre, pour la motorisation, autour de ce point de fonctionnement.

**Modifier** sur le schéma-blocs de la simulation, la fonction de transfert de chaque moteur pour qu'elle corresponde au modèle de comportement identifié aux travaux précédents.

## III. Simulation

### 1. Activité 3 : simuler le comportement de la boucle d'asservissement en vitesse de tangage

#### **A3-1 Cahier des charges à respecter :**

On considère que cette boucle de vitesse est correctement réglée si les 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%	< 0,5s

(Nota : le critère 1 qui porte sur l'étude fréquentielle ne sera pas étudié dans ce TP)



**A3-2 Simulation****Travail 8 :**

Le schéma-bloc complété est donné dans le fichier de simulation

« **D2C\_boucle\_vitesse\_acompleter2.slx** »

(Nota : la grandeur « commande moteurs » n'est pas présente sur ces schémas car les grandeurs qui y sont traitées représentent uniquement des variations autour d'un point de fonctionnement ; donc les grandeurs qui restent constantes comme la commande des moteurs « commande gaz » n'apparaissent pas. )

**Vérifier** la conformité de ce schéma-bloc avec celui de votre fichier complété ; reprendre les points sur lesquels il y a des différences.

**Exécuter** la simulation, et comparer la réponse aux exigences suivantes du cahier des charges :

- Rapidité : temps de réponse à 5%  $\leq 0,5$  s
- Stabilité : dépassement  $\leq 25$  %

**Travail 9 :**

**Nota** : l'exigence de rapidité ne peut pas être satisfaite simultanément à l'exigence de stabilité ; un correcteur plus compliqué que le correcteur proportionnel, permettra ultérieurement d'atteindre ces deux exigences ; on travaillera donc ici seulement sur l'exigence de stabilité :

**Trouver** une valeur du correcteur proportionnel qui permet de répondre à l'exigence de stabilité, tout en donnant la réponse la plus rapide possible

(on utilisera la valeur « K » dans le bloc du correcteur proportionnel et on exploitera les possibilités du logiciel pour tracer les réponses en fonction de plusieurs valeurs de ce paramètre).

**Conclure** sur l'effet d'une variation (augmentation ou diminution) du gain de la fonction de transfert en boucle ouverte, sur l'amélioration de la stabilité du système.

**2. Activité 4 : simplification du modèle****Travail 10 :**

A partir de la modélisation utilisée dans la simulation, **exprimer** la fonction de transfert en boucle fermée, en fonction du gain « K » du correcteur proportionnel.

**Exprimer** le coefficient d'amortissement «  $\zeta$  » en fonction de « K ».

**valider** le résultat obtenu en simulation pour la valeur du coefficient K qui répond au critère de stabilité du cahier des charges. (On rappelle l'expression du dépassement en fonction du

$$\text{coefficient d'amortissement : } D\% = \frac{S_{\max} - S_{\infty}}{S_{\infty}} = e^{-\frac{\pi \cdot \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} )$$

Pour la valeur de K obtenue au **travail 9**, **tracer** en simulation sur un même graphe, la réponse du modèle complet et celle du modèle simplifié déduit de la fonction de transfert.

**Conclure** en validant à nouveau le critère de stabilité du cahier des charges à partir du modèle simplifié.

**IV. Activité 5 : analyse des écarts****Travail 11 :**

**Cette partie nécessite de prendre connaissance de la FICHE 2 « Mise en œuvre du drone D2C » et du §F2-4 en particulier.**

**Régler** dans l'interface de drone didactique le gain  $K_{p2}$  à la valeur du coefficient « K » obtenu en simulation pour respecter le critère de stabilité du cahier des charges ;

**Expérimenter** sur le drone D2C, avec ce réglage conformément au §F2-4 de la fiche 2 (deux ou trois mesures sont conseillées, dans un sens et dans l'autre).

**Comparer** les résultats obtenus dans cette expérimentation, avec ceux de la simulation ; **trouver** des explications aux éventuels écarts constatés (Il faudra avoir à l'esprit que le correcteur proportionnel n'est pas un correcteur optimal et que toutes les perturbations ne sont pas corrigées par le système).

**Travail 12 :**

**Récapituler** les différentes activités dans un document Power-Point ou Open-Office, en vue d'une restitution orale ; Il s'agira pour chaque activité 1 à 4, de poser clairement la problématique et de présenter les résultats, par exemple à l'aide de copies d'écran.