

# D<sup>2</sup>C

## Drone Didactique Contrôlé

**TP : prépa**

**TP 0 : L'asservissement en tangage du drone :**

# Eléments de corrigé

## Activité 1 : Décrire et prendre en main le drone didactique.

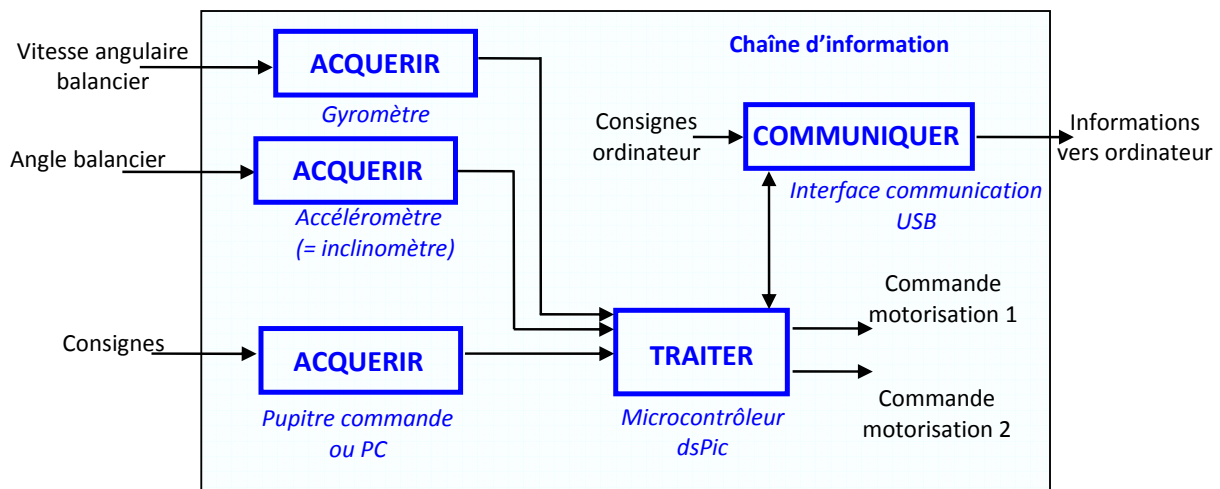
### A1-1 – Analyse des constituants du drone didactique.

*Cette partie nécessite de prendre connaissance de la FICHE 1 « Description du drone D2C (Sysml) ».*

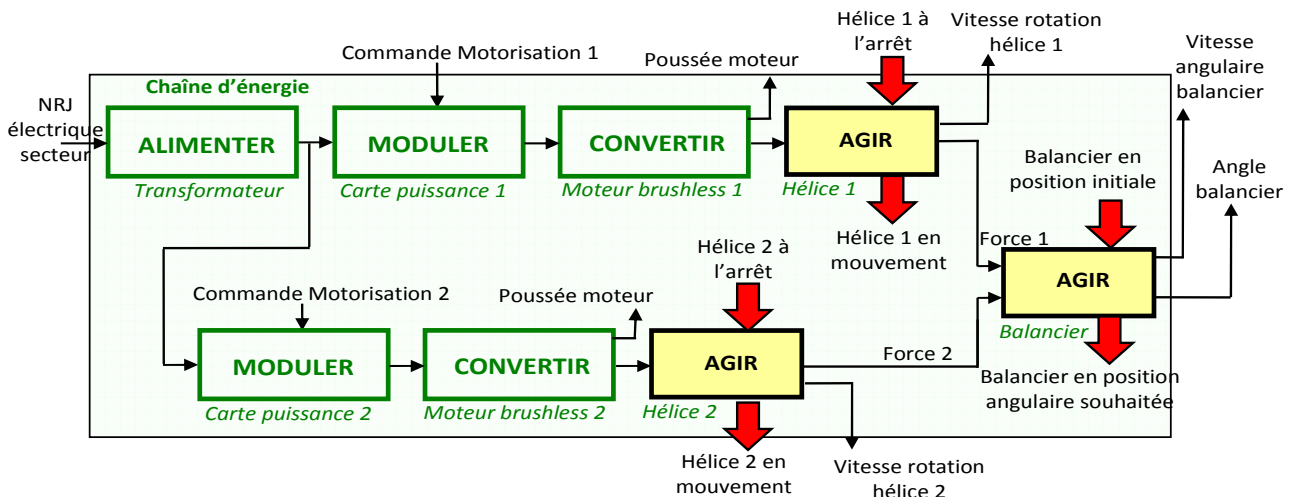
**Travail 1 : Situer** chaque composant des chaînes d'énergie et d'information du drone didactique, puis **réaliser** une description de l'ensemble avec un graphe « chaîne d'énergie – chaîne d'information », qui sera utilisé pour effectuer la présentation lors de la restitution orale des travaux.

**Corrigé :**

**La chaîne d'information :**



**La chaîne d'énergie :**



### 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) ;

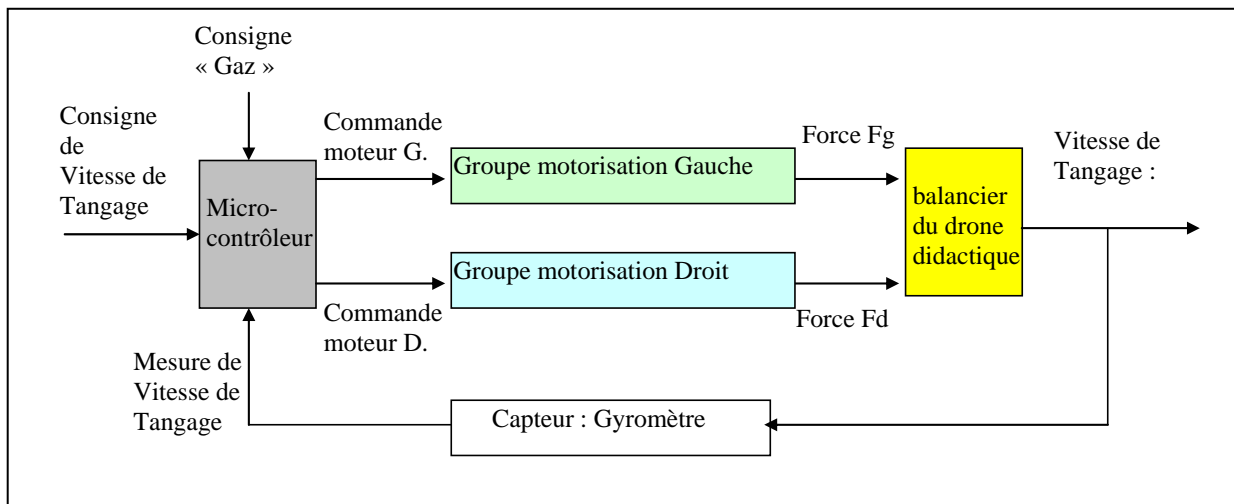
**Préparer** la description du drone didactique dans chacun des deux modes de pilotage, en mettant en valeur dans chaque cas, les liens entre chaînes d'énergie et d'information, et en situant à bon escient le capteur associé à chacun des deux modes de fonctionnement.

**Corrigé :**

**Il s'agit de mettre en valeur la prépondérance du capteur « accéléromètre » (utilisé en inclinomètre) dans l'asservissement en position, et l'utilisation du capteur « gyromètre » dans l'asservissement en vitesse de tangage.**

## Activité 2 : Modéliser 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 (Scilab ou Matlab) utilisé dans le laboratoire, pour utiliser le fichier à compléter :

- pour Scilab « **D2C\_boucle\_vitesse\_acompleter.zcos** » (copie d'écran ci-dessous) :
- pour Matlab « **D2C\_boucle\_vitesse\_acompleter.slx** »

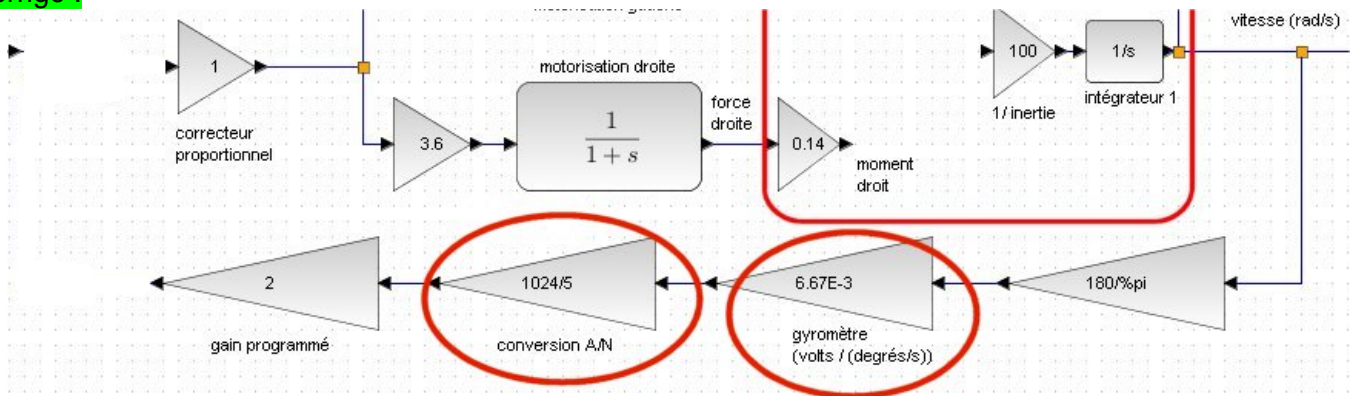
### **A2-2 Finaliser la boucle de retour :**

#### **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.

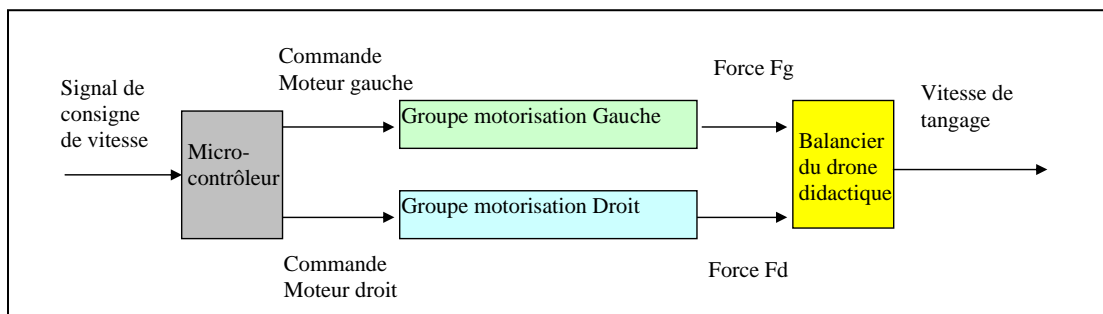
**Corrigé :**



### 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 » ;

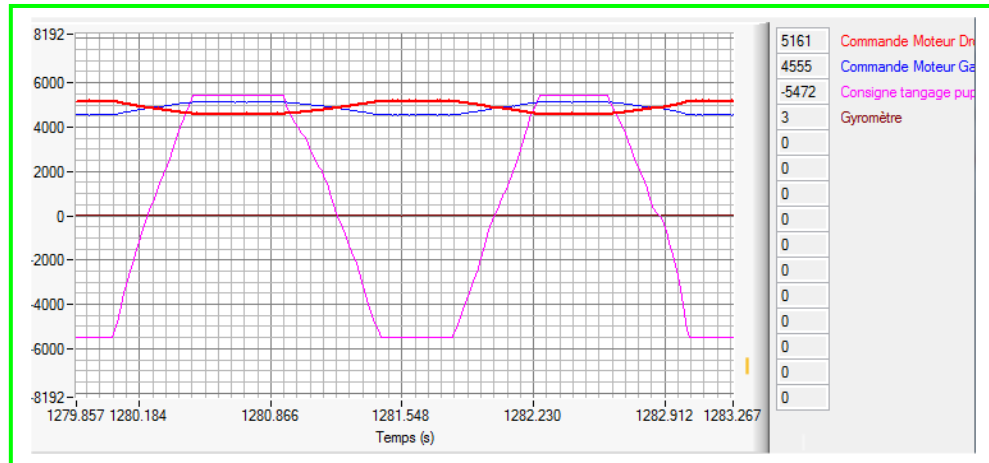
**Travail 4 :**

**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).**

**Corrigé :**

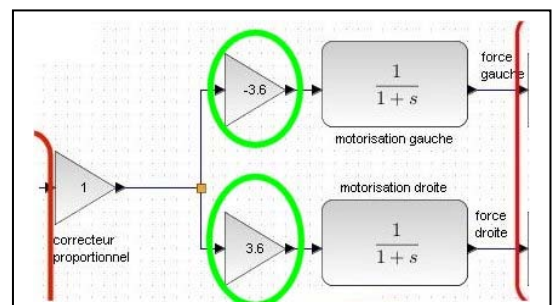


**Analyser** les courbes enregistrées (icône « Affichage mesure ») et **Reproduire puis Compléter** le tableau suivant en indiquant « FAIBLE » ou « FORT » dans les colonnes du signal de commande des moteurs :

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 tangage négative.</b>	<b>FAIBLE</b>	<b>FORT</b>	<b>SENS TRIGO &gt; 0</b>
Côté droit = SENS TRIGO < 0 → <b>consigne tangage positive.</b>	<b>FORT</b>	<b>FAIBLE</b>	<b>SENS TRIGO &lt; 0</b>

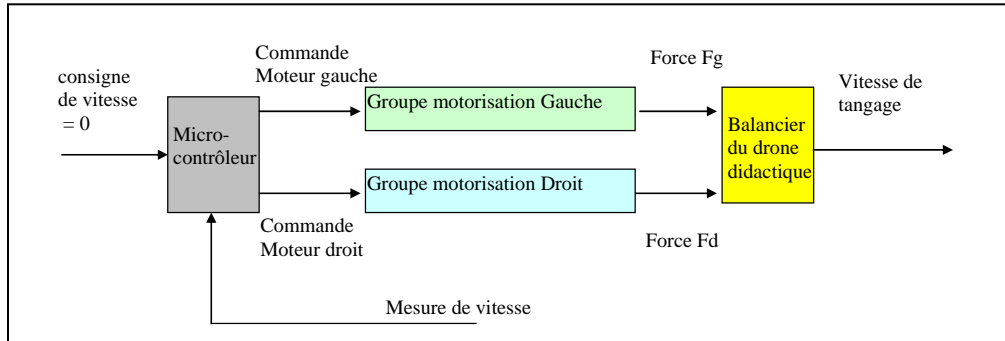
**En raisonnant sur les sens des mouvements que l'on placera en consigne, justifier en conséquence les signes qui affectent les gains de 3,6 des lignes qui commandent les moteurs.**

**Une consigne de mouvement de sens trigo positif doit faire diminuer la vitesse du moteur gauche et augmenter celle du moteur droit ; le signe « - » doit donc être placé sur la ligne du moteur gauche.**



**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.

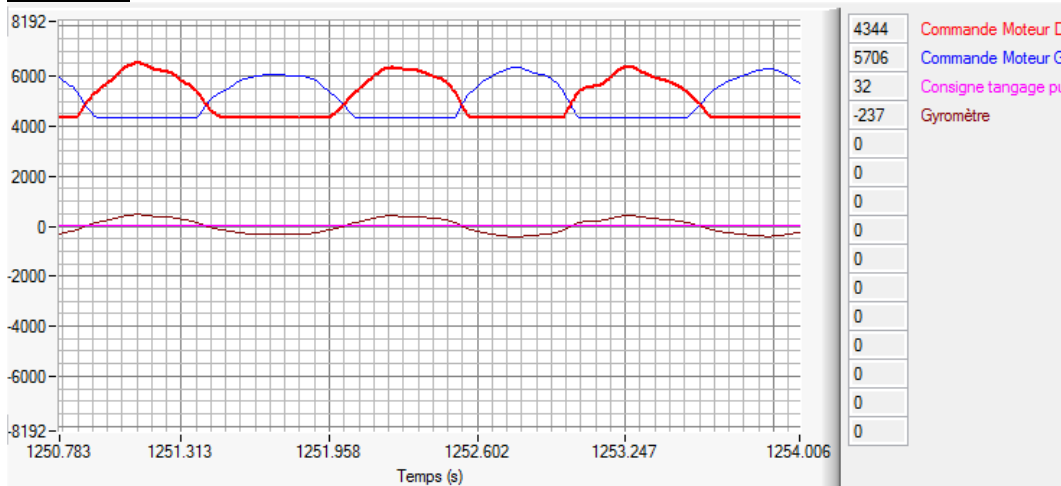
**Donnée :** Le diagramme simplifié prend en compte une partie de la boucle de retour.



### Travail 5 :

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

**Corrigé :**



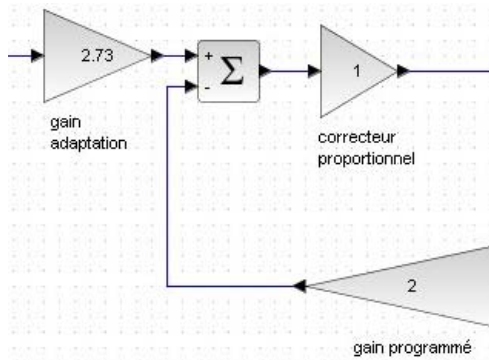
**Analyser** les courbes enregistrées (icône « Affichage mesure ») et **Reproduire puis Compléter** le tableau suivant en indiquant « FAIBLE » ou « FORT » dans les colonnes du signal de commande des moteurs et **en déduire** dans la colonne de droite du tableau, pour chaque sens d'évolution du balancier,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

**Corrigé :**

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 négative.</b>	<b>FORT</b>	<b>FAIBLE</b>	<b>SENS TRIGO &lt; 0</b>
Côté droit = SENS TRIGO < 0 → <b>Mesure gyromètre positive.</b>	<b>FAIBLE</b>	<b>FORT</b>	<b>SENS TRIGO &gt; 0</b>

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.

**Corrigé :**



Le gain d'adaptation est donné par :  
 $2 \times (1024/5) \times (6,67 \cdot 10^{-3}) = 2,73$

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

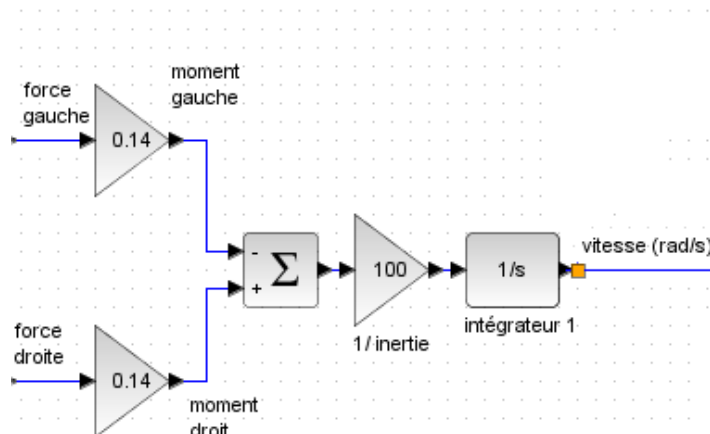
Le modèle de connaissance qui lie les grandeurs d'effort aux grandeurs de mouvement est donné par la relation dite « équation des moments du principe fondamental de la dynamique » (qui sera démontrée en deuxième année de classe prépa) :

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

#### 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).

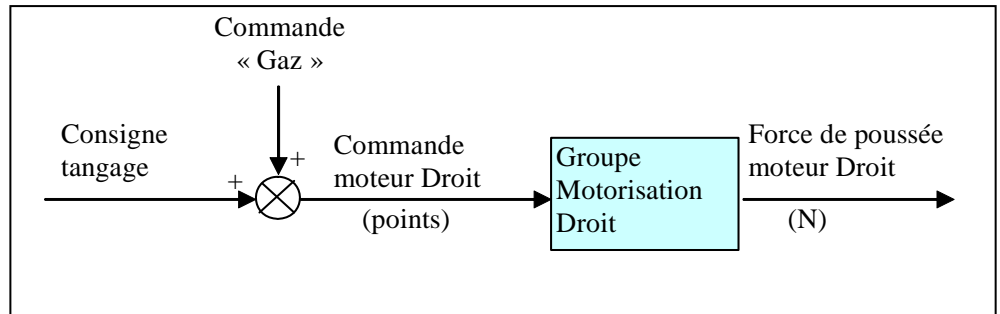
**Corrigé :**





## 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 :



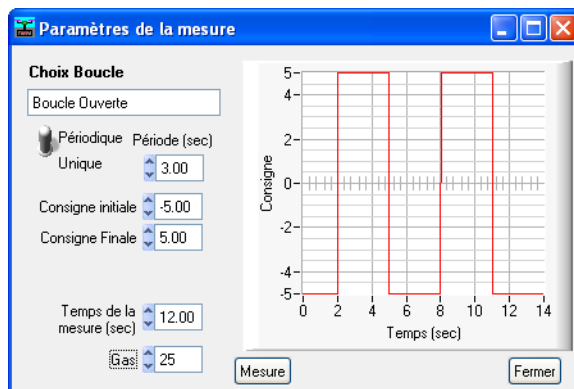
Il permet de visualiser la grandeur d'entrée « commande moteur » et la grandeur de sortie « Force ». C'est cette force dont le moment fait basculer le balancier du drone didactique, qui devra être mesurée.

### 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% :



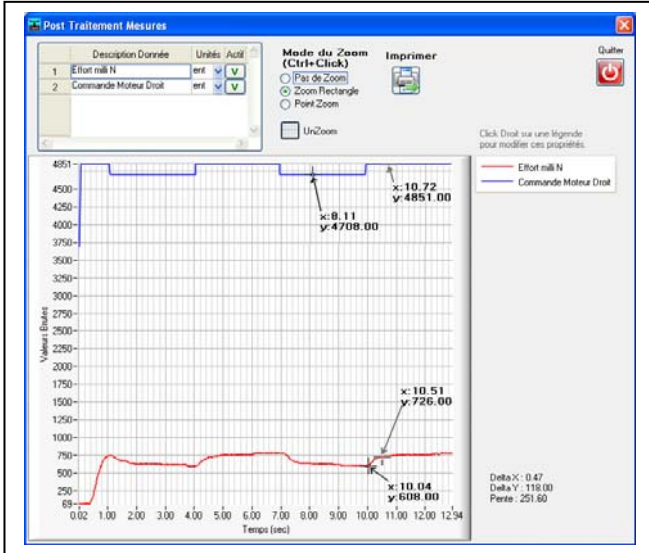
**En déduire** le gain « Km » (en Newtons par points de commande) et la constante de temps «  $\tau_m$  » d'un modèle approché équivalent du premier ordre, pour la motorisation, autour de ce point de fonctionnement.



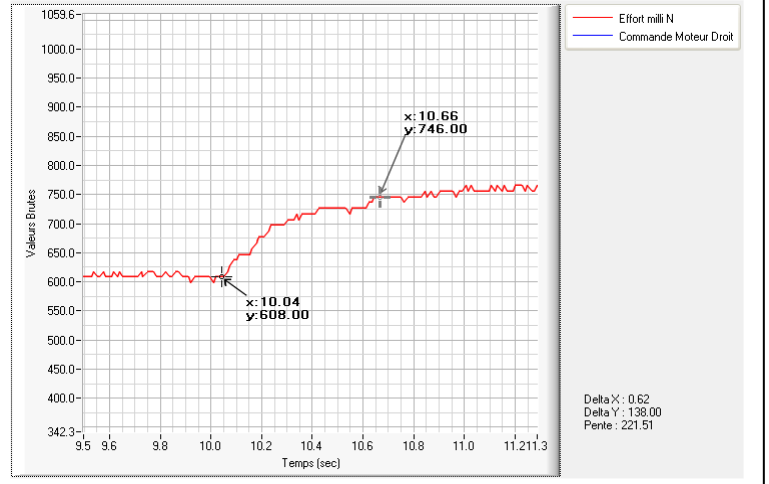
**Corrigé :**

L'acquisition des grandeurs « commande moteur droit » et « Effort milliN » permettent d'obtenir la réponse temporelle de la motorisation :

**Exemple :**



En mode « zoom » :



**gain statique :**

il faut noter que le système n'est pas linéaire ; la simple division d'une valeur d'effort par la grandeur de consigne associée conduit à une valeur erronée ; il faut trouver la valeur locale de la pente de la courbe de l'effort en fonction de la consigne ;

c'est pourquoi on divise des valeurs d'écart notées « Delta » :

$$K_m = \text{Delta Effort} / \text{Delta commande} = (760 - 608) / (4851 - 4708) = 1,06 \text{ milliN} / \text{point} ;$$

on utilisera donc :  **$K_m = 0,001 \text{ N/point}$**

**constante de temps :**

avec l'hypothèse d'un modèle approché équivalent du premier ordre, on obtient :

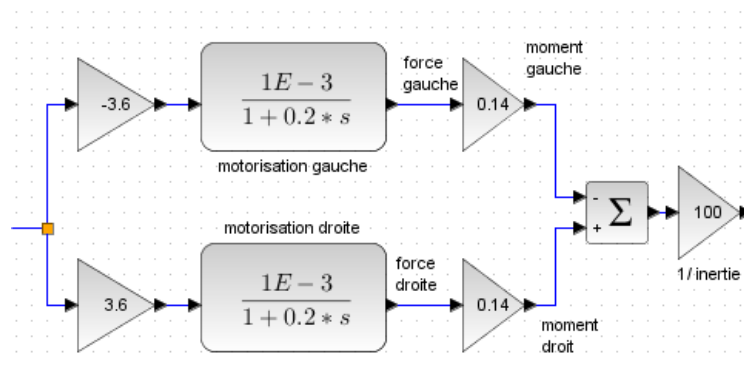
$$\text{temps de réponse à 5 \% : } tr_{5\%} = 0.62 \text{ s} \rightarrow \text{constante de temps } \tau_m = tr_{5\%} / 3 = 0,2 \text{ s}$$

**d'où la fonction de transfert de la motorisation :**

$$\frac{\text{Force } F_d}{\text{Commande moteur } D} = \frac{10^{-3}}{1 + 0,2p} \quad (\text{N} / \text{points})$$

**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.

**Corrigé :**



## 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	$> 45^\circ$
	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\_corrige1.zcos* »

(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.

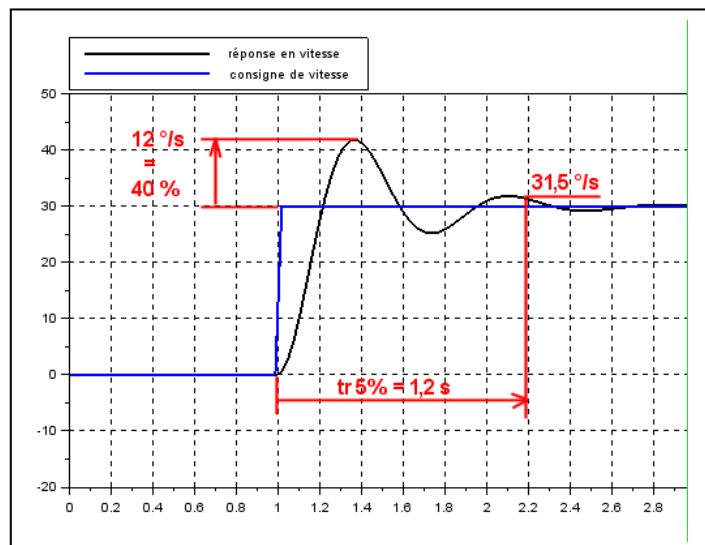
**Cette partie nécessite de prendre connaissance de la FICHE 7 « simulation Scilab ».**

**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  $\leq 25$  %

### Corrigé :

le cahier des charges n'est respecté pour aucun des deux critères.



**Travail 9 :**

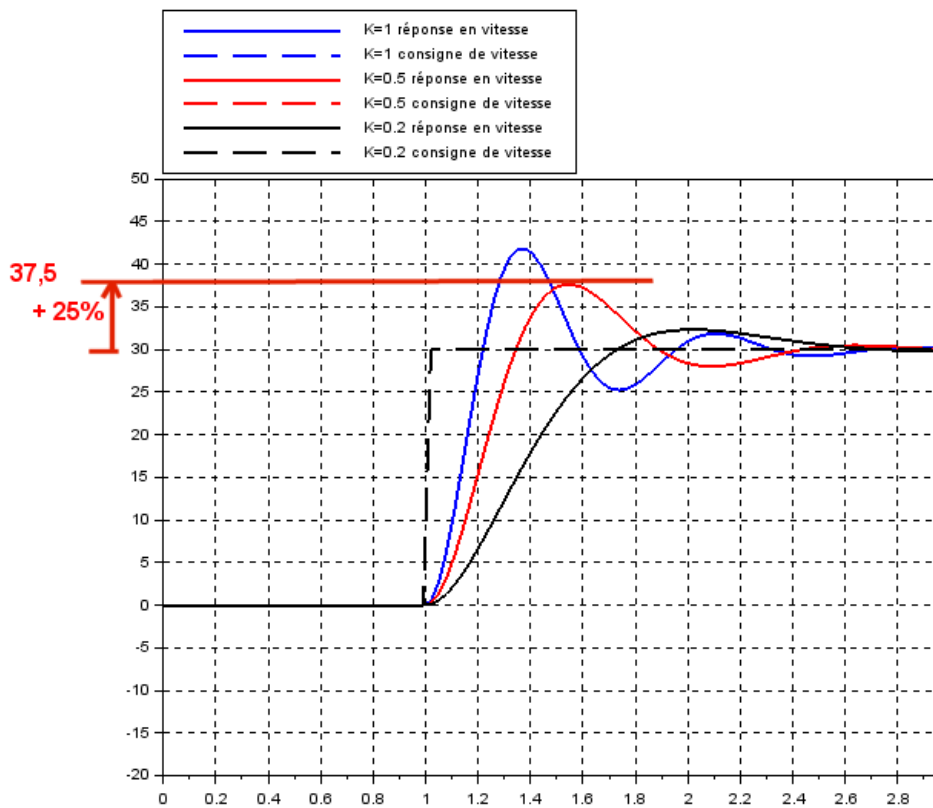
**Nota :** l'exigence de rapidité ne peut pas être satisfaite simultanément à l'exigence de stabilité ; un correcteur plus compliqué que le correcteur proportionnel, permettra ultérieurement d'atteindre ces deux exigences ; on travaillera donc ici seulement sur l'exigence de stabilité :

**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.

**Corrigé :**



La valeur  $k = 0,5$  convient pour limiter le dépassement à 25%.

La diminution du gain stabilise le système.

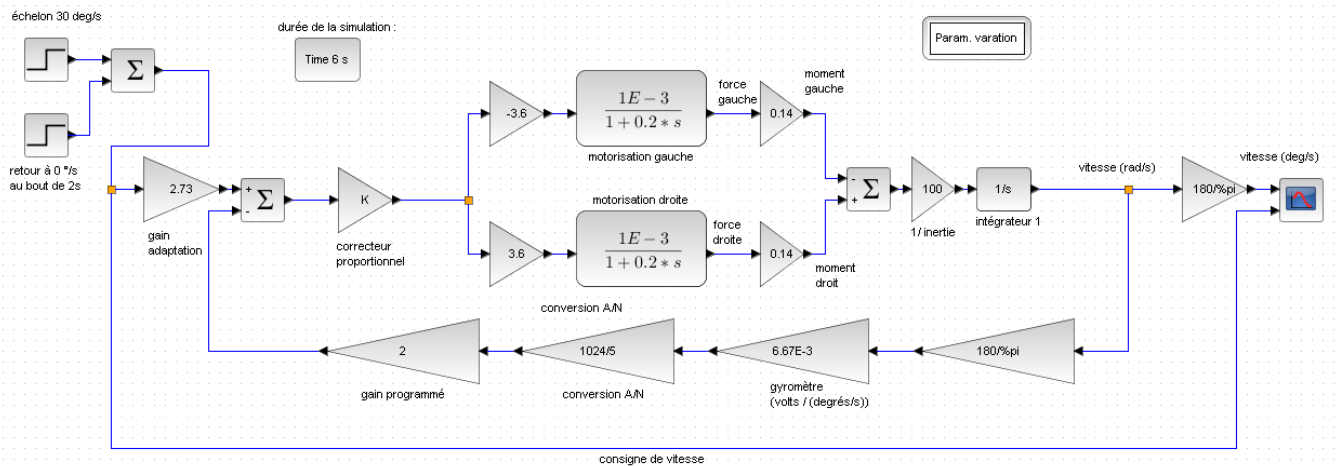
## Activité 4 : Simplifier le modèle

### 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 « ksi » en fonction de « K ».

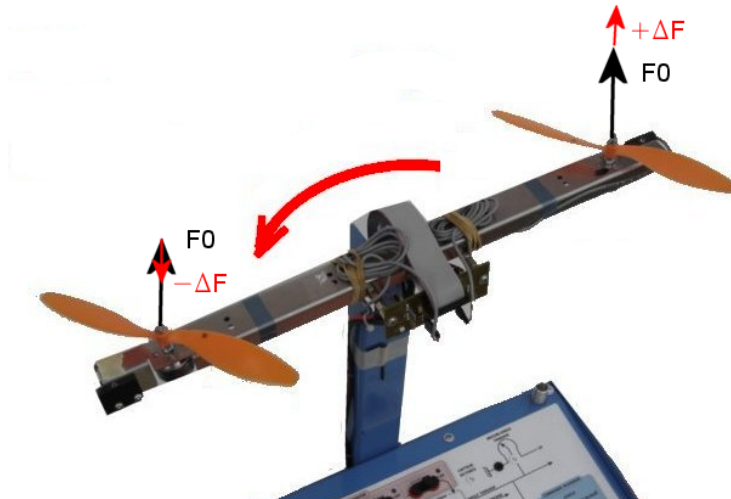
### Corrigé :



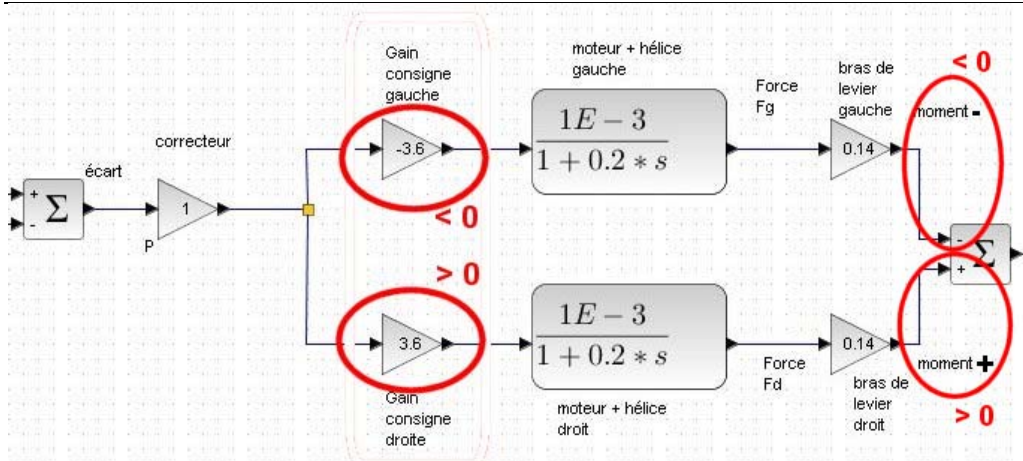
On doit faire attention aux signes associés à chaque branche du schéma-blocs :

Les signes des gains de consigne ( - 3,6) et ( + 3,6) s'expliquent par le fait que lors d'une commande de tangage, par exemple en basculement vers la gauche,

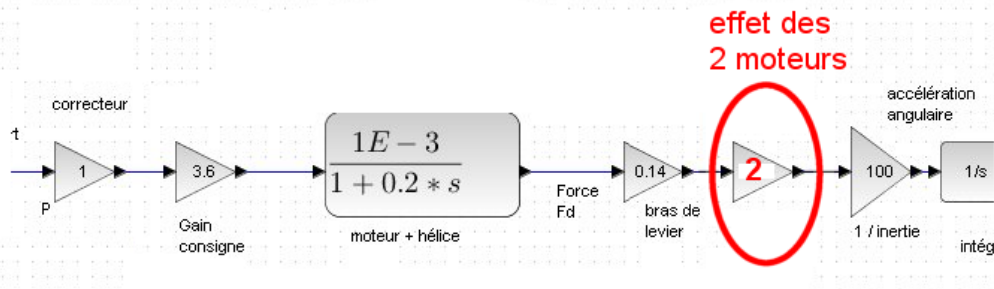
- le moteur droit reçoit une variation de consigne de vitesse positive (pour augmenter sa poussée),
- alors que le moteur gauche reçoit une variation de consigne de vitesse négative (pour diminuer sa poussée).



au final, on doit traiter avec le schéma suivant :



donc, en tenant compte des signes, un schéma équivalent de la chaîne directe pourrait être :



et le calcul de la fonction de transfert en boucle fermée donne :

$$FTBF(p) = 2,73 \cdot \frac{K \cdot 3,6 \cdot \frac{10^{-3}}{1+0,2p} \cdot 0,14 \cdot 2 \cdot 100 \cdot \frac{1}{p}}{1 + (K \cdot 3,6 \cdot \frac{10^{-3}}{1+0,2p} \cdot 0,14 \cdot 200 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{180}{pi} \cdot 6,67 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1024}{5} \cdot 2)} \cdot \frac{180}{pi}$$

$$FTBF(p) = \frac{1}{1 + \frac{p}{15,6 \cdot K} + \frac{1}{78 \cdot K} \cdot p^2} \text{ après simplification}$$

la pulsation propre est :  $\omega_0 = \sqrt{78 \cdot K}$

et le coefficient d'amortissement  $\xi$  est tel que :  $2 \cdot \xi / \omega_0 = 1/15,6 \cdot K$  d'où  $\xi = \frac{0,28}{\sqrt{K}}$

On rappelle l'expression du dépassement en fonction du coefficient d'amortissement :

$$D\% = \frac{s_{\max} - s_{\infty}}{s_{\infty}} = e^{-\frac{\pi \cdot \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

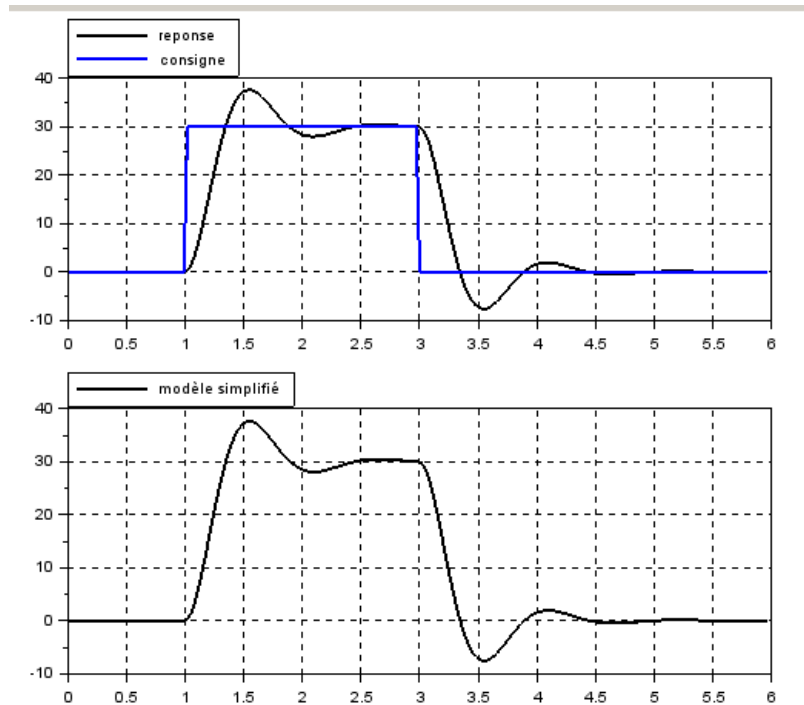
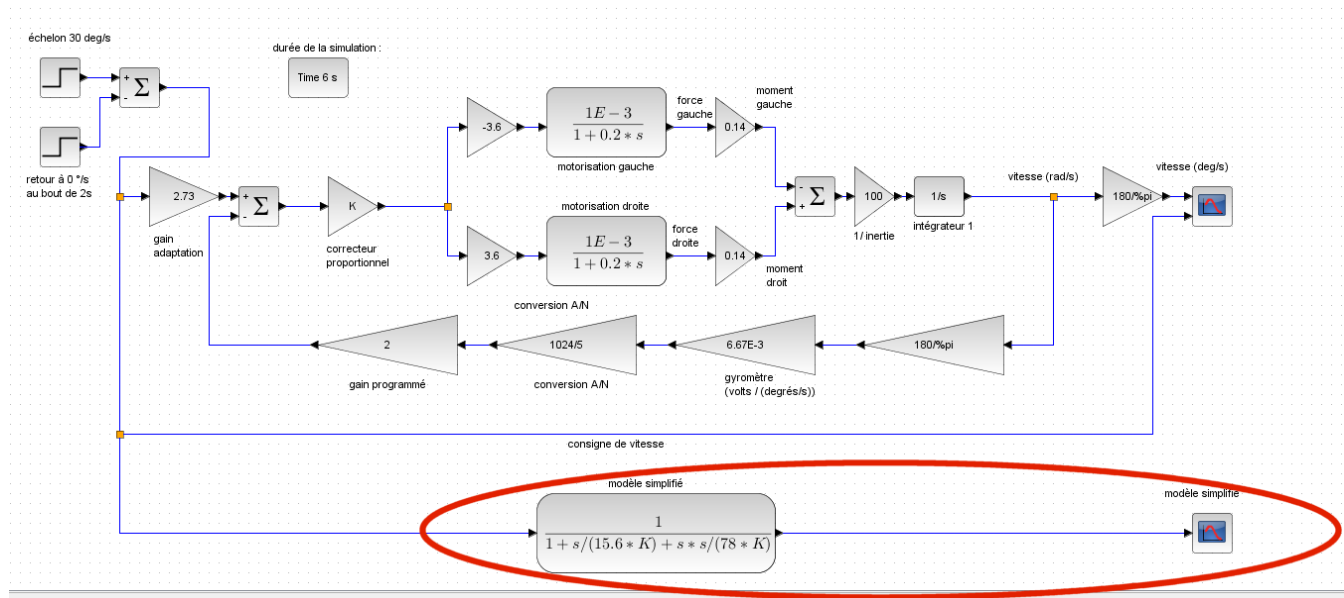
**valider** le résultat obtenu en simulation pour la valeur du coefficient K qui répond au critère de stabilité du cahier des charges.

**Corrigé :**

Avec  $K = 0,5$  on obtient  $\xi = 0,4$  ; Pour  $\xi = 0,4$  on obtient  $D\% = e^{-\frac{\pi \cdot \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} = 0,25$  qui est bien la valeur visée au cahier des charges (25 %).

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.

**Corrigé :**



**Le modèle simplifié a bien la même réponse et valide aussi le critère de stabilité.**

## Activité 5 : Synthèse

### Travail 11 :

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

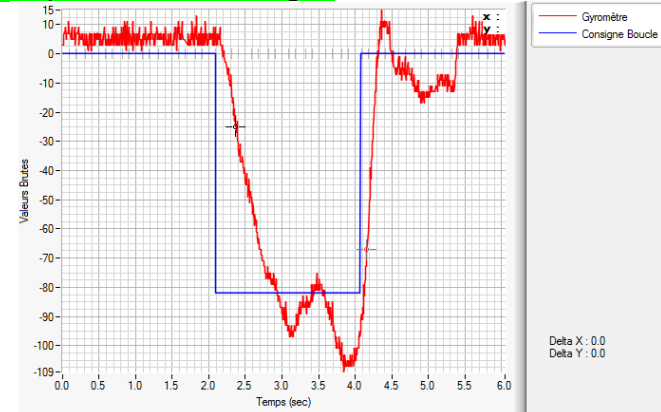
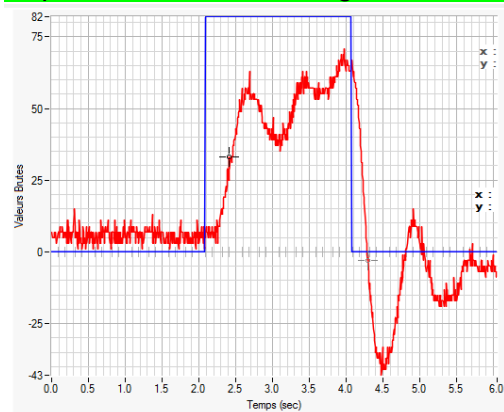
**Régler** dans l'interface de drone didactique le gain Kp2 à la valeur du coefficient « K » obtenu en simulation pour respecter le critère de stabilité du cahier des charges ;

**On règle : Kp2 = 0,5**

**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).

**Déplacement sens anti-trigo :**

**déplacement sens trigo :**



**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).

**les 4 échelons présentés dans les acquisitions ci-dessus donnent une valeur de dépassement en moyenne égale à 25 % et voisine de la valeur de la simulation ;**

**On constate néanmoins une grande variabilité des résultats due à la présence de perturbations sur le mouvement de rotation :**

- mauvais équilibrage du balancier ;
- frottements dans la liaison pivot du balancier ;
- contact de fils à l'arrière du balancier ;
- perturbations dues aux mouvements d'air dans la cage du D2C ...

### 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.