

## MODÉLISATION D'UN SYSTÈME DRONE D2C

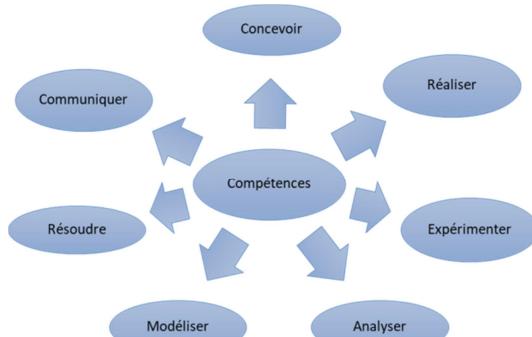
### 1 PRÉSENTATION

#### 1.1 Objectifs

Les objectifs sont:

- De modéliser un système asservi ;
- D'analyser l'effet d'un correcteur sur le comportement d'un système

#### 1.2 Contexte pédagogique



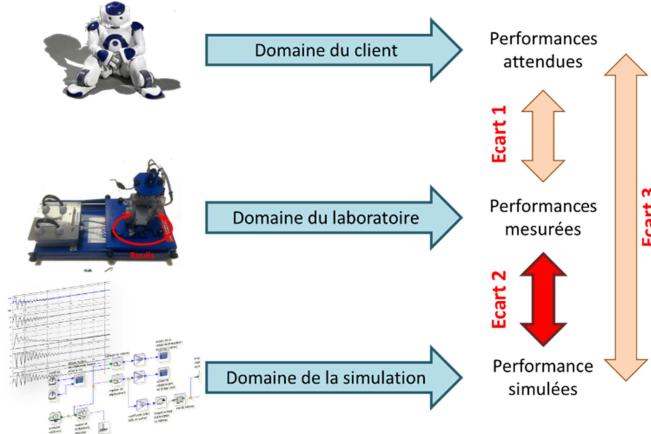
#### Modéliser :

- Mod 2 : Proposer un modèle de connaissance et de comportement
- Mod 3 : Valider un modèle.

#### Expérimenter

- Proposer et justifier un protocole expérimental
- Mettre en œuvre un protocole expérimental

#### 1.3 Évaluation des écarts



L'objectif de ce TP est de comparer principalement les écarts entre performances mesurées et simulées.

## 2 PRÉSENTATION DU SYSTÈME RÉEL

### 2.1 Le drone

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 inertie, et de traitements numériques dans le microcontrôleur permettent d'atteindre cet objectif.

L'étude de cette stabilisation est l'objet de ces travaux autour de l'asservissement de tangage.

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

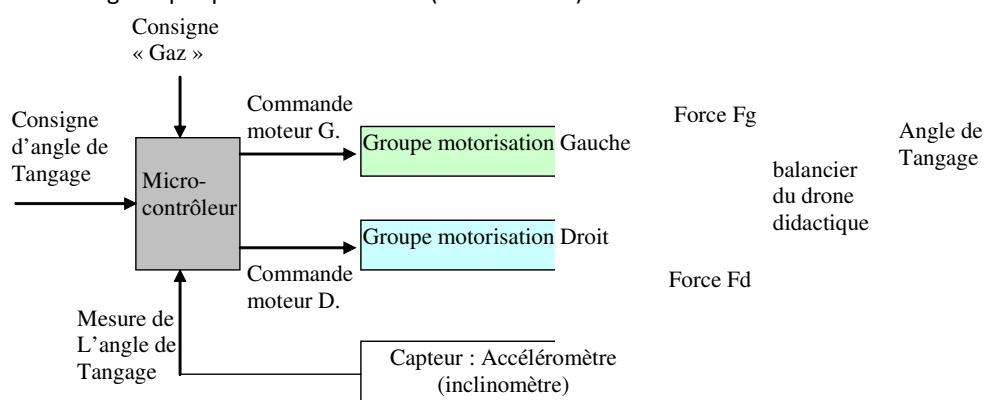
## 3 ÉTUDE EXPÉIMENTALE DE LA BOUCLE DE POSITION DU DRONE DIDACTIQUE

### Objectifs

- travail sur les constituants de la boucle de position avec l'accéléromètre en boucle de retour, puis fusion de données avec le gyromètre ;
- expérimentation avec une démarche prospective pour ajuster les coefficients d'un correcteur à avance de phase dans la boucle de position.
- travail sur le système avec l'ajout de la boucle interne de vitesse;
- expérimentation pour montrer l'efficacité de cette boucle interne (après réglage des correcteurs).

### 3.1 Commande en boucle de position

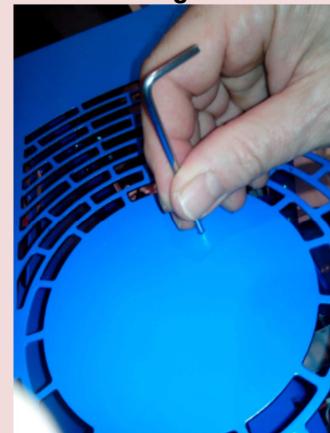
Le schéma-bloc ci-dessous permet de présenter la boucle d'asservissement autour du microcontrôleur de la « carte pupitre », dans le cas d'une commande « en position ». Le microcontrôleur reçoit la consigne d'angle de tangage, ainsi que la mesure de l'angle capté par l'accéléromètre (inclinomètre) de la centrale inertie du drone didactique.



### Objectifs : expérimenter pour montrer l'intérêt d'une boucle d'asservissement lors du contrôle de la position de tangage du drone

- Il s'agit dans un premier temps de commander le drone en « boucle ouverte », en réalisant une commande manuelle de chacun des moteurs séparément, à l'aide des potentiomètres du pupitre ; une action de déstabilisation reproduisant l'effet d'une turbulence sera générée à l'aide de la « tige de déstabilisation ».
- La commande du système sera placée en « boucle fermée »; la commande de tangage ne sera réalisée qu'avec le potentiomètre « commande tangage », et la même action avec la « tige de déstabilisation » sera réalisée.

### Placement de la tige de stabilisation



### Activité expérimentale 1 :

*Condition expérimentales en boucles ouvertes :*

- système branché ; interrupteur « 0/1 » sur 1 , « Arrêt Général » déverrouillé.
- connexion USB avec le PC pas nécessaire ;
- 3 cavaliers noirs commande moteurs et bloqueur en place.
- 2 cavaliers rouges alimentation moteurs en place.
- tige de mesure d'effort (sous le moteur droit) enlevée ;
- porte d'accès aux moteurs fermée ;
- bouton « commande bloqueur » sur « tangage libre » ;
- bouton « PC/MANU » sur MANU
- bouton BO/BF sur « Boucle ouverte » ;
- potentiomètre « MOTEUR GAUCHE » en position gauche (0%) ;
- potentiomètre. « MOTEUR DROIT » en position gauche (0%).
  
- Régler les potentiomètres de commande moteurs autour de 25% et ajuster l'un d'eux pour obtenir une position angulaire stable autour de +10° mesurée en sens antihoraire ; agir sur le balancier avec la « tige de déstabilisation » ; constater et noter sur votre compte-rendu, l'effet par rapport à l'objectif du maintien de la position préalablement réglée.
  
- Retirer la « tige de déstabilisation » après la manipulation.

### Activité expérimentale 2 :

*Condition expérimentales en boucle fermée :*

- système branché ; interrupteur « 0/1 » sur 1 , « Arrêt Général » déverrouillé.
- connexion USB avec le PC pas nécessaire ;
- 3 cavaliers noirs commande moteurs et bloqueur en place.
- 2 cavaliers rouges alimentation moteurs en place.
- tige de mesure d'effort (sous le moteur droit) 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) ;
- potentiomètre. « COMMANDE TANGAGE » en position centrale (0).
  
- Régler le potentiomètre « commande moteurs » autour de 25%, puis ajuster le potentiomètre « commande tangage » pour obtenir une position angulaire stable autour de +10° mesurée en sens anti-horaire ; agir sur le balancier avec la « tige de déstabilisation » ; constater et noter sur votre compte-rendu, l'effet par rapport à l'objectif du maintien de la position préalablement réglée, et la différence par rapport à l'expérimentation en boucle ouverte.
  
- Retirer la « tige de déstabilisation » après la manipulation.

### 3.2 L'accéléromètre : un capteur d'angle imparfait

La fiche d'information de l'accéléromètre présente les éléments de prise d'information disponibles dans la boucle d'asservissement de position. En plus des éléments présentés sur cette fiche, l'information délivrée par le capteur accéléromètre peut être traitée par un **filtre passe-bas** de fréquence ajustable.



#### Objectifs

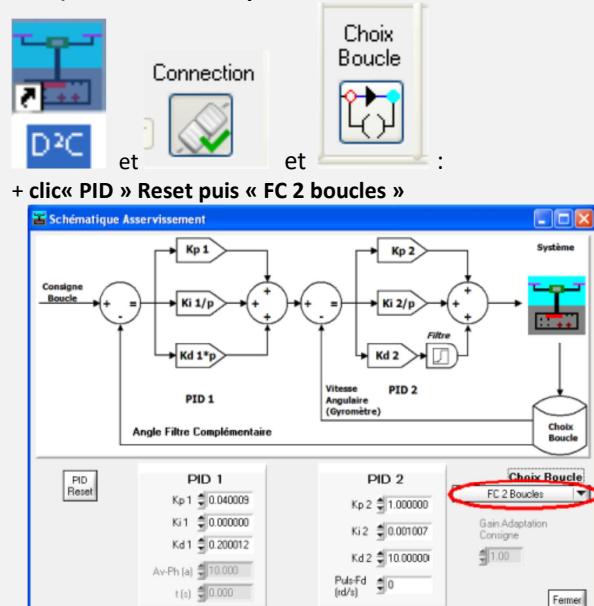
Expérimenter pour montrer l'intérêt de ce filtre passe-bas associé à l'accéléromètre : analyser pour cela les deux grandeurs « Angle AccX » et « Angle Acc Passe Bas », d'une part lorsque les moteurs ne sont pas en fonctionnement, d'autre part lorsque les moteurs sont en action.

#### Activité expérimentale 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 (sous le moteur droit) enlevée ;
- porte d'accès aux moteurs initialement 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%) ;
- 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 : « angle AccX » et « Angle Acc Passe-Bas » :



##### d) Conditions d'expérimentation : « consignes »

Première étape : commande moteurs à 0% : ouvrir la porte et manœuvrer le balancier manuellement ; enregistrer les

Sauve Fenêtre

courbes (icône « sauve fenêtre » , puis nommer le fichier).

Deuxième étape : Fermer la porte ; puis mettre le potentiomètre « commande moteurs » à 30 % ; puis agir sur le potentiomètre « commande tangage » pour faire évoluer la position du balancier ; enregistrer les courbes.

Les graphes enregistrés sont accessibles dans une fenêtre de post-traitement avec l'icône « Affichage Mesures » :

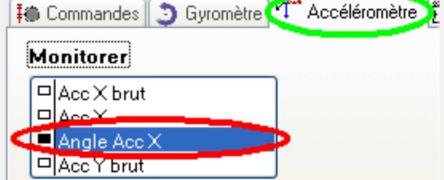
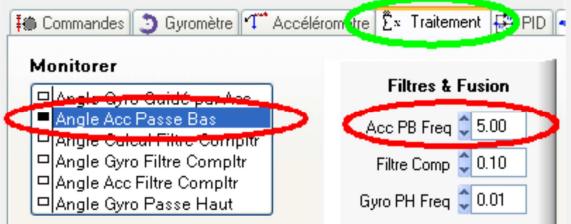


**Objectifs**

Expérimenter pour montrer le retard sur la réponse, apporté par le filtre passe-bas associé à l'accéléromètre : analyser pour cela les deux grandeurs « Angle AccX » et « Angle Acc Passe Bas » pour différentes valeurs de la fréquence de cassure du filtre (réglage : « Acc BP freq »);

Justifier le choix de la fréquence de cassure de ce filtre à 1 Hz, vis-à-vis des deux critères contradictoires : bon filtrage des vibrations / faible retard sur la réponse.

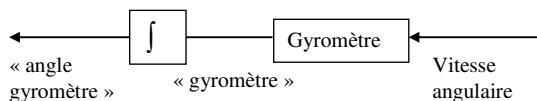
**Activité expérimentale 4**

<b>a) Conditions d'expérimentation « pupitre » et « système »</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> système branché ; interrupteur « 0/1 » sur 1 , « Arrêt Général » déverrouillé.</li> <li><input type="checkbox"/> connexion USB avec le PC en place ;</li> <li><input type="checkbox"/> 3 cavaliers noirs commande moteurs et bloqueur en place.</li> <li><input type="checkbox"/> 2 cavaliers rouges alimentation moteurs en place.</li> <li><input type="checkbox"/> tige de mesure d'effort enlevée ;</li> <li><input type="checkbox"/> porte d'accès aux moteurs initialement fermée ;</li> <li><input type="checkbox"/> bouton « commande bloqueur » sur « tangage libre » ;</li> <li><input type="checkbox"/> bouton « PC/MANU » sur MANU ;</li> <li><input type="checkbox"/> bouton BO/BF sur « Boucle Fermée » ;</li> <li><input type="checkbox"/> potentiomètre « Commande moteurs » en position gauche (0%) ;</li> <li><input type="checkbox"/> - potentiomètre. « Commande tangage » en position centrale.</li> </ul>	<b>b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »</b>  <p>Connection D2C et fonctionnement sans motorisation/</p>
<b>c) Conditions d'expérimentation : « affichage »</b> (cliquer sur « commandes » si pas d'accès direct) monitorer : « angle AccX » et « Angle Acc Passe-Bas » :  	<b>d) Conditions d'expérimentation : « consignes »</b> Porte ouverte et Consignes d'oscillations réalisées manuellement sur le balancier ; Renouveler pour différentes valeurs de « Acc BP freq »  Sauve Fenêtre Pour enregistrer :  et pour exploiter Affichage Mesures 

### 3.3 Le gyromètre : un capteur d'angle rapide mais lui aussi imparfait

Les fabricants de centrales inertielles pallient la lenteur du capteur accéléromètre filtré en exploitant un autre capteur plus rapide : le gyromètre. Une fiche présente ce capteur.

À savoir en complément : le gyromètre est un capteur de vitesse ; pour obtenir la position (« Angle gyromètre »), son signal doit être intégré.



**Un problème apparaît** si la valeur du signal fourni par le gyromètre à l'arrêt ne correspond pas exactement à la valeur zéro du calcul d'intégration, l'écart entre les deux valeurs est accumulé et se traduit par une « dérive » du signal de position obtenu après l'intégration.

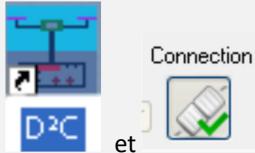
**Objectifs :** Expérimenter pour montrer la dérive du gyromètre.

#### Activité expérimentale 5

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

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



Connection  
et

- fonctionnement sans motorisation

##### c) Conditions d'expérimentation : « affichage »

(cliquer sur « commandes » si pas d'accès direct)  
monitorer : « Gyromètre » (qui est le signal de vitesse angulaire ) et « Angle Gyromètre» qui est le signal intégré :



##### d) Conditions d'expérimentation : « consignes »

Pour visualiser le signal Gyromètre (par curiosité), placer le bouton « commande bloqueur » sur « tangage libre » et agir manuellement sur le balancier.

Pour visualiser la dérive du gyromètre : placer le bouton « commande bloqueur » sur « tangage bloqué »

Mise en garde !! : lorsque le potentiomètre « commande moteurs » est sur 0%, le programmeur du D<sup>2</sup>C a décidé de placer le signal de l'accéléromètre dans la variable « Angle Gyromètre », pour éviter que le phénomène de dérive ne conduise à des écarts trop importants lors du démarrage. En conséquence : Il faut tourner le potentiomètre. « Commande moteurs » pour faire apparaître le phénomène de dérive du gyromètre, sur la variable « Angle Gyromètre ». modifier éventuellement l'échelle d'affichage entre -10° et +10° pour voir plus précisément.



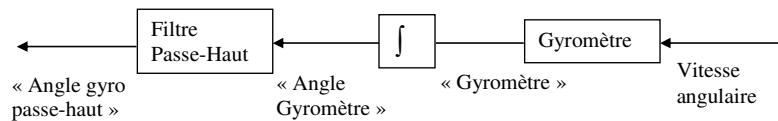
Sauve  
Fenêtre



Affichage  
Mesures

Pour enregistrer : et pour exploiter

En plus des éléments présentés dans la fiche sur le gyromètre, l'information délivrée par le capteur gyromètre peut être traitée par un **filtre passe-haut** de fréquence ajustable.



**Objectifs :** Expérimenter pour montrer l'effet positif apporté par le filtre passe haut sur la réponse du gyromètre.  
Justifier l'intérêt d'utiliser simultanément les deux capteurs accéléromètre et gyromètre, en précisant dans quel domaine de fréquence chacun pourra être exploité avec le plus de bénéfice.

### Activité expérimentale 6

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

- idem que le travail précédent

#### b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »



#### c) Conditions d'expérimentation : « affichage »

(cliquer sur « commandes » si pas d'accès direct)

monitorer : « **Gyromètre** » (qui est le signal de vitesse angulaire) et « **Angle Gyromètre** » qui est le signal intégré :

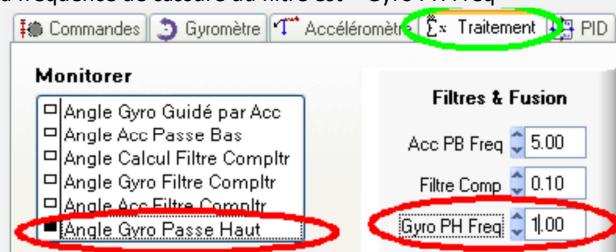


#### d) Conditions d'expérimentation : « consignes »

On n'oubliera pas de tourner le potentiomètre. « Commande moteurs » pour faire apparaître le phénomène de dérive du gyromètre, sur la variable « Angle Gyromètre ». Modifier éventuellement l'échelle d'affichage entre -10° et +10° pour voir plus précisément.

Observer le signal « Angle gyro Passde-Haut », d'une part lorsque « Gyro PH Freq » = 0,1 Hz ; d'autre part pour « Gyro PH Freq » mise à 1 Hz. À cette fréquence, l'effet de suppression de la dérive devrait se faire sentir rapidement.

et « **Angle gyro passe haut** » qui est le signal filtré ; la fréquence de cassure du filtre est « **Gyro PH Freq** »



Sauve Fenêtre

Affichage Mesures

Pour enregistrer : et pour exploiter .

### 3.4 La fusion de données : une solution de bon compromis

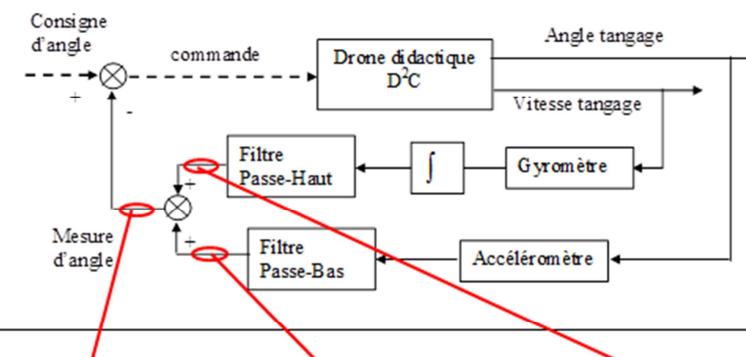
On se propose dans la suite du TP, d'exploiter chacun des deux capteurs accéléromètre et gyromètre avec l'association de filtre qui rend chacun d'entre eux le plus performant :

$$\text{l'accéléromètre avec son filtre passe-bas : } PB(p) = \frac{1}{1 + \tau_c \cdot p};$$

$$\text{le gyromètre avec son filtre passe-haut : } PH(p) = \frac{\tau_c \cdot p}{1 + \tau_c \cdot p}.$$

On choisira la même fréquence de cassure  $\tau_c$  pour chacun d'entre eux, à 1Hz et on se propose de les associer dans la boucle de retour, de la façon suivante (dans ce cas l'association est nommée « filtre complémentaire »).

L'interface IHM du drone didactique permet de visualiser les trois variables ci-dessus associées à ce « filtre complémentaire ».



Angle Calcul Filtre Compltr      Angle Acc Filtre Compltr      Angle Gyro Filtre Compltr

#### Activité (expérimentale) 7

Tracer le diagramme de Bode (diagramme de gain) de chacun des filtres et montrer qu'avec cette solution de filtre complémentaire, la totalité du signal « Angle tangage » pourra être récupérée dans le signal « Mesure d'angle », sans les inconvénients vus précédemment pour chaque capteur (dans la limite de la bande passante des capteurs). Pour information : La bande passante des capteurs est obtenue dans le dossier technique :

- Gyromètre : 75 Hz ;
- Accéléromètre : réglée à 50 Hz (possible jusqu'à 500 Hz).

**Objectifs :** Expérimenter pour montrer l'effet bénéfique du filtre complémentaire.

### Activité expérimentale 8

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

- système branché ; interrupteur « 0/1 » sur 1 , « Arrêt Général » déverrouillé.
- connexion USB avec le PC en place ;
- tige de mesure d'effort enlevée ;
- 3 cavaliers noirs commande moteurs et bloqueur en place.
- **2 cavaliers rouges alimentation moteurs enlevés.**
- bouton « commande bloqueur » sur « tangage libre » ;
- bouton « PC/MANU » sur MANU ;
- 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 »

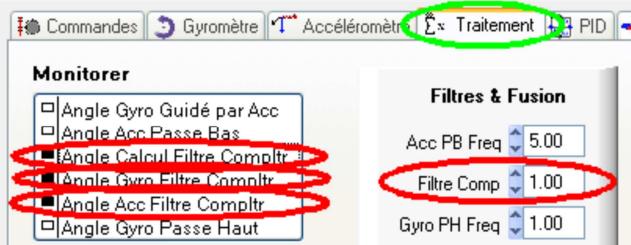


- fonctionnement sans motorisation

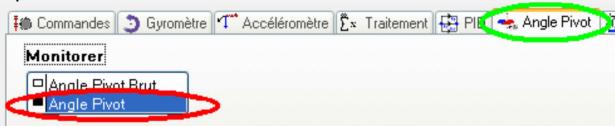
#### c) Conditions d'expérimentation : « affichage »

(cliquer sur « commandes » si pas d'accès direct)

monitored : les trois grandeurs associées au « filtre complémentaire » :



- et la grandeur « pivot » du capteur de référence de la liaison pivot :



#### d) Conditions d'expérimentation : « consignes »

On n'oubliera pas de tourner le potentio. « Commande moteurs » pour faire apparaître la variable « Angle Gyro filtre complémentaire ».

modifier éventuellement l'échelle d'affichage entre -30° et +30° pour voir toute l'évolution.

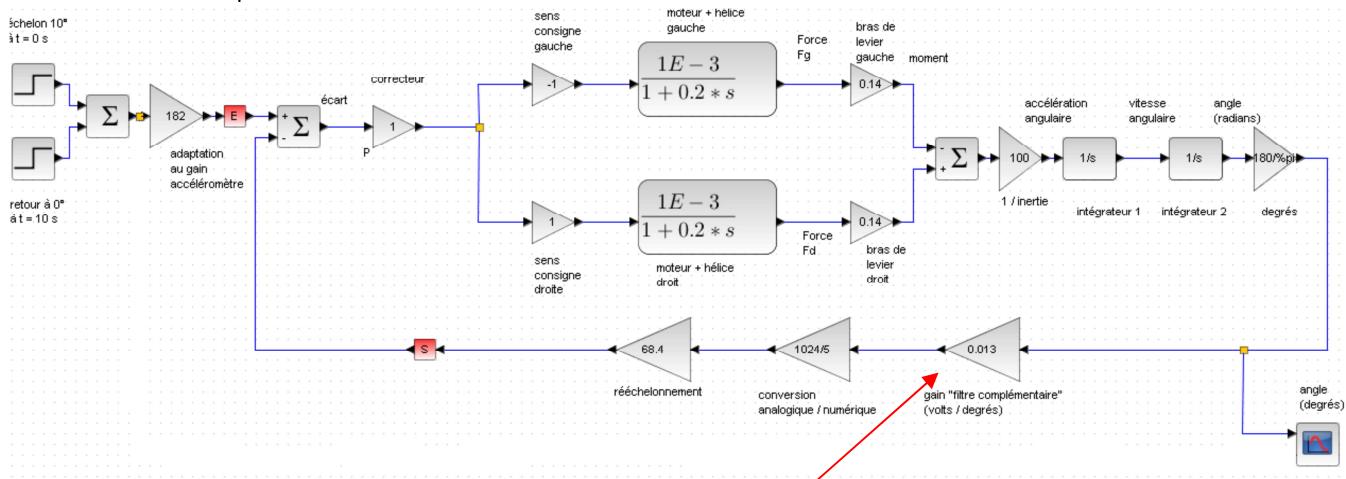
- Choisir une valeur de la pulsation de cassure du filtre complémentaire : 1 Hz ;
- Exécuter manuellement un mouvement brusque du balancier ;
- Observer les signaux « Angle calcul Filtre Compltr », « Angle Acc filtre compltr » et « Angle Gyro filtre Compltr » pour constater l'amélioration de qualité de la réponse de l'angle fourni par la centrale inertie à travers le filtre complémentaire (par rapport à l'accéléromètre en début de mouvement ; par rapport au gyromètre, en fin de mouvement).



### 3.5 Expérimentation sur le correcteur à retard de phase

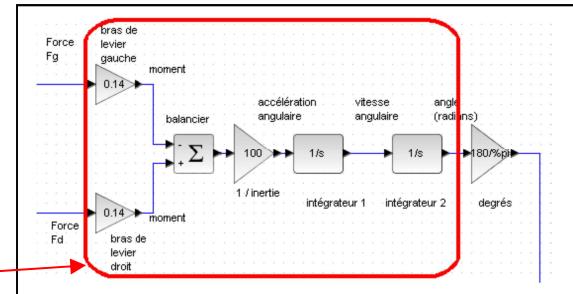
#### 3.5.1 La boucle d'asservissement de position avec le filtre complémentaire :

Des études sur les composants du système D2C ont permis de mettre en évidence la structure de la boucle d'asservissement de position :



On observe que :

- ❑ la boucle de retour est constituée du filtre complémentaire (dont on n'a conservé que le gain qui est le gain de l'accéléromètre) et de différents gains de conversion et de rééchelonnement du signal.
- ❑ la chaîne directe est constituée d'un correcteur proportionnel que l'on va modifier, puis d'une partie modélisant les deux moteurs, puis d'une partie modélisant le comportement dynamique du balancier du drone (figure ci-contre).

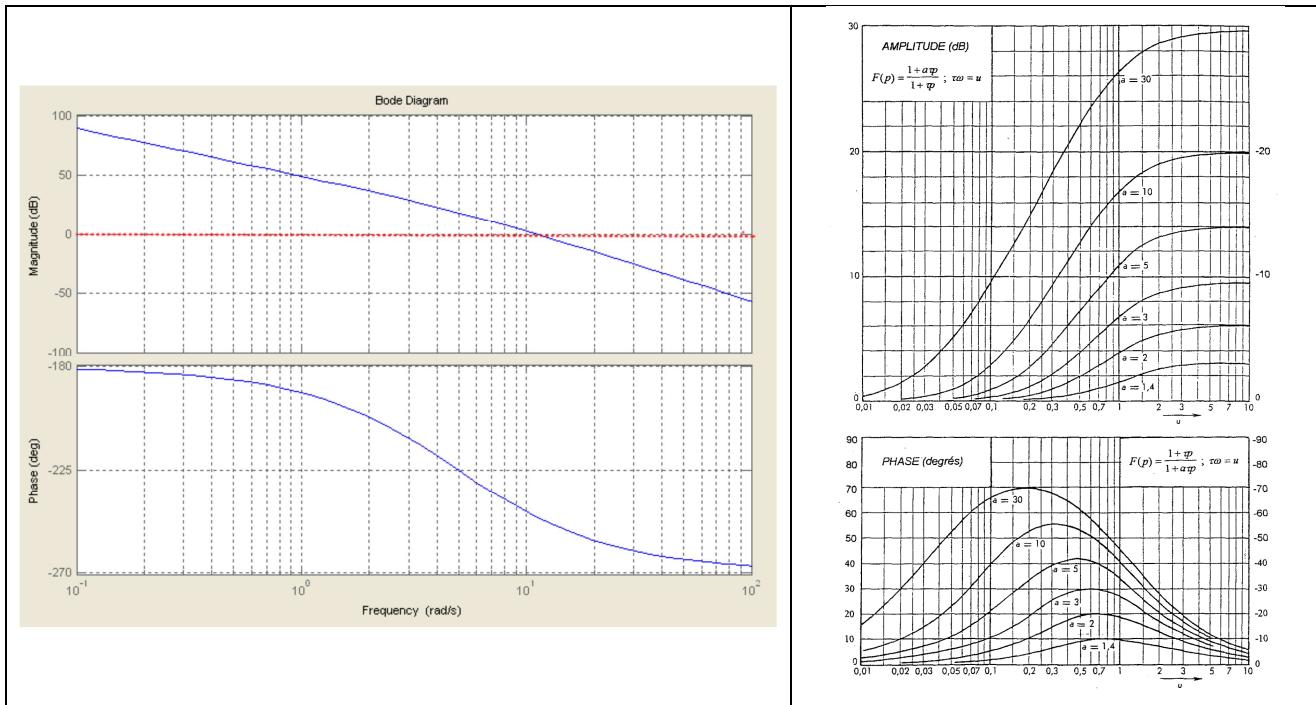


#### Activité expérimentale 9

- ❑ À l'aide d'une équation du principe fondamental de la dynamique, justifier la présence de chaque bloc présent dans le rectangle de la figure ci-dessus.
- ❑ En déduire la « classe » de la fonction de transfert en boucle ouverte, et donner votre point de vue sur sa stabilité.

### 3.5.2 Diagramme fréquentiel avec et sans correcteur à avance de phase

Le diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) du système est présenté ci-dessous (à gauche). Le diagramme de Bode (gain et phase) du correcteur à avance de phase  $C(p) = \frac{1+a\tau p}{1+\tau p}$  est présenté ci-contre pour différentes valeurs de  $a$  et  $\tau$ .



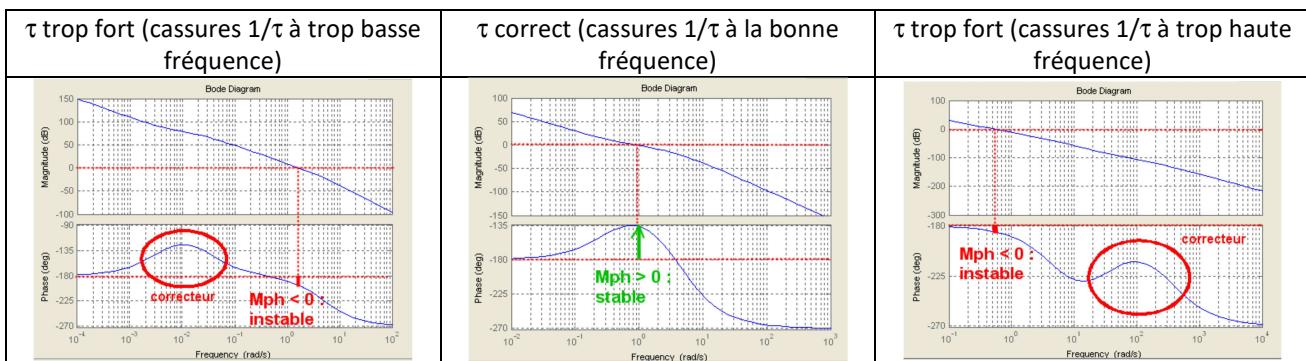
#### Activité expérimentale 10

En observant que ce correcteur procure une avance de phase sur une certaine bande de fréquence, expliquer comment la mise en série de ce correcteur avec un gain pur permettrait de stabiliser le système avec une marge d'au moins  $45^\circ$  en ayant une bande passante en BO à 1rad/s

### 3.5.3 L'expérmentation

**Objectifs :** Pour obtenir le maximum d'avance de phase, on choisit  $a = 10$  pour l'expérmentation. L'objectif est de montrer que l'on peut expérimentalement stabiliser le système avec ce correcteur.

La difficulté est qu'il est très difficile de trouver la bonne valeur de  $\tau$ , puisque si elle est trop faible ou trop forte, de part et d'autre de la valeur optimale, le système est instable (figures ci-dessous).



## Activité expérimentale 11

Protocole opératoire proposé :

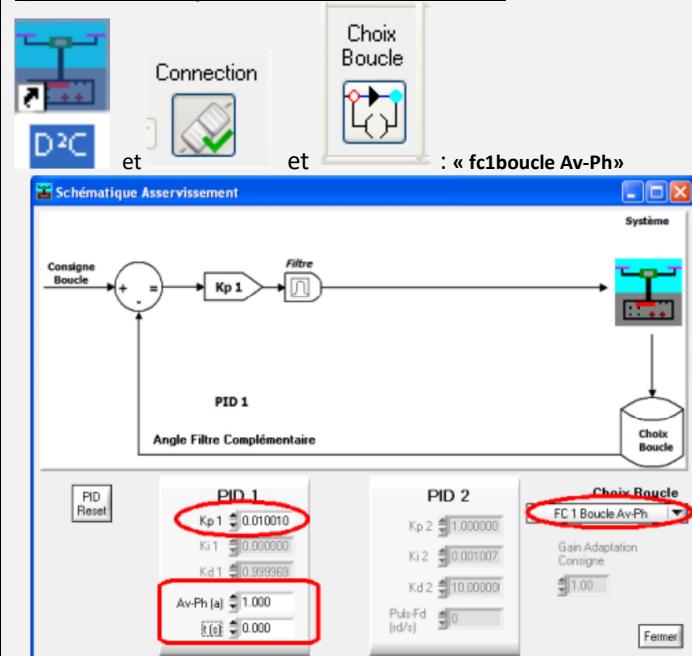
- 1- avec les réglages  $a = 1$  et  $\tau = 0$ , trouver un gain proportionnel permettant d'avoir un système suffisamment réactif, mais avec une instabilité légère (**KP entre 0,008 et 0,01** doit convenir) ;
- 2- Avec la valeur « **a = 10** », tester quelques valeurs de  $\tau$  (entre 1 et 30) pour montrer que l'une d'entre elles permet d'obtenir un système stable.
- 3- Pour la valeur obtenue, effectuer quelques commandes manuelles de tangage et donner votre impression sur la nervosité (rapidité) du système ainsi réglé.

### 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 »** ;
  - potentio « Commande moteurs » au début en position gauche (0%), puis à 25% pour les expériences ;
  - potentio. « Commande Tangage » en position centrale ;
- Utiliser la « tige de déstabilisation » pour générer une petite impulsion qui va écarter le système de sa position initiale.



### b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »

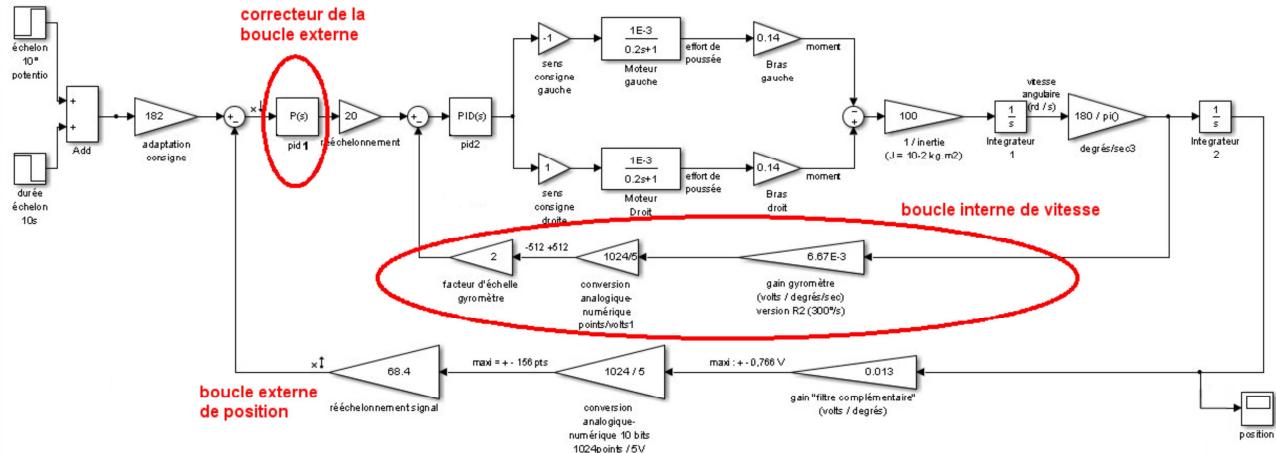


## 4 TRAVAIL SUR LE SYSTÈME À BOUCLE DE POSITION ET BOUCLE INTERNE DE VITESSE

On se propose de montrer qu'il est possible d'obtenir un système plus performant que celui réglé précédemment ; ceci en utilisant une boucle interne « de vitesse », avec le gyromètre en plus de la boucle externe et la fusion de données.

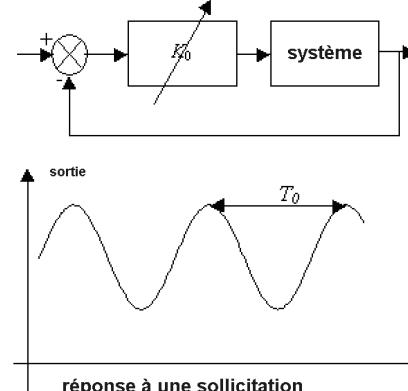
### 4.1 Analyse du schéma-blocs

La boucle interne est optimisée dans un autre TP et utilisée telle que proposée ci-dessous. Pour la boucle externe, c'est le correcteur PID1 qui est l'objet des travaux proposés.



### 4.2 Ajustement du correcteur

Le correcteur PID2 sera utilisé avec les réglages par défaut du système. Le travail porte sur le PID 1. On se propose de suivre la « méthode de réglage de Ziegler-Nichols fréquentielle ». Cette méthode convient particulièrement bien aux systèmes instables en boucle ouverte. L'expérimentation se fait sur le système bouclé avec un simple gain proportionnel qui doit être stable. Le principe est de modifier la valeur du gain par essai-erreur jusqu'à atteindre la limite de stabilité (phénomène de pompage). Il reste à relever le gain limite  $K_0$  obtenu et à mesurer la période  $T_0$  des oscillations de la réponse obtenue.



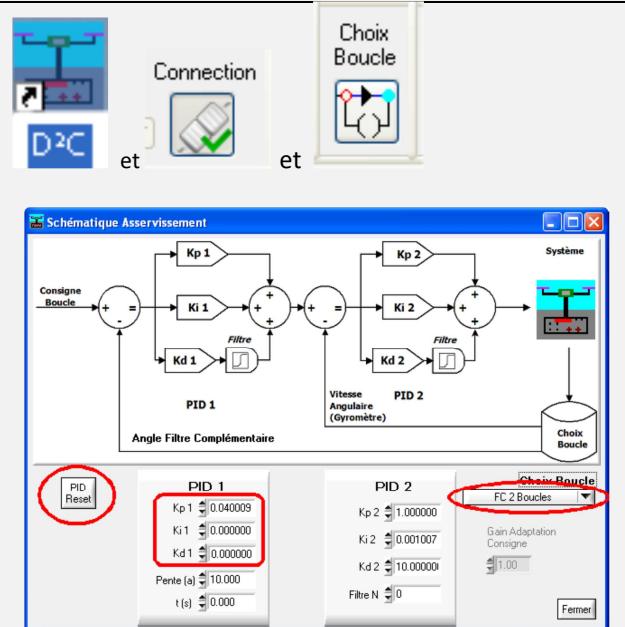
Les réglages suggérés par la méthode fréquentielle de Ziegler-Nichols sont récapitulés dans le tableau suivant :

	$K_p$	$K_I$	$K_D$
correcteur P	$0,5 K_0$		
correcteur PI	$0,45 K_0$	$1,5 K_p/T_0$	
correcteur PID	$0,6 K_0$	$2 K_p/T_0$	$K_p T_0/8$
Pas de dépassement	$0,2 K_0$	$2 K_p/T_0$	$K_p T_0/3$

**Activité expérimentale 12 – A**

Mettre en service le système D2C, lancer l'interface d'acquisition et de pilotage D2C\_IHM et régler les asservissements comme suit :

- cliquer sur « **PID reset** » pour remettre en place les réglages d'usine ;
- faire le « **choix boucle** » avec « **FC 2 boucles** » pour utiliser le filtre complémentaire et les 2 boucles imbriquées ;
- **mettre  $Ki1 = 0$  ;  $Kd1 = 0$ ,**
- **conserver la valeur de  $Kp1$ ,**
- **ainsi que celles du PID2.**

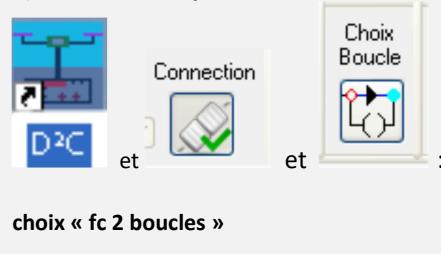


Appliquer la méthode pour déterminer le **gain limite  $Ko$**  et la **période  $T_0$  des oscillations**.

Précaution : la vitesse « Commande moteurs » devra être choisie entre 20 et 30 % pour éviter les vibrations parasites de la « carte mesures », qui ont tendance à réduire les performances du filtre complémentaire.

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

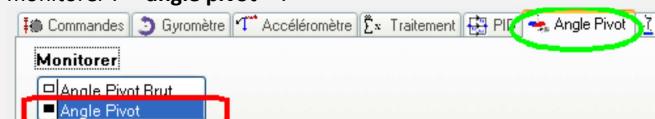
- système branché ; interrupteur « 0/1 » sur 1 , « Arrêt Général » déverrouillé.
- connexion USB avec le PC en place ;
- 3 cavaliers noirs commande moteurs et bloqueur en place.
- 2 cavaliers rouges alimentation moteurs en place.
- tige de mesure d'effort enlevée ;
- porte d'accès aux moteurs fermée ;
- bouton « commande bloqueur » sur « tangage libre » ;
- bouton « PC/MANU » sur MANU**
- bouton BO/BF sur « Boucle fermée » ;**
- potentio. « Commande Tangage » en position centrale ;
- potentio « Commande moteurs » en position gauche (0%) ; puis ajusté entre 20 et 30 % pour limiter bruits et vibrations.

**b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »**


**choix « fc 2 boucles »**

**c) Conditions d'expérimentation : « affichage »**

(cliquer sur « commandes » si pas d'accès direct)  
monitored : « **angle pivot** » :



et éventuellement « **angle calcul filtre compl.** » :


**d) Condition d'expérimentation : « consignes »**

pas de consignes PC, mais évolution progressive du coefficient  $Kp1$ (pour changer de valeur repasser par une valeur nulle à chaque fois) sur l'interface ; l'évolution est instantanée.

enregistrer les courbes (icône « sauve fenêtre », puis nommer le fichier).

Les graphes enregistrés sont accessibles dans une fenêtre de post-traitement avec l'icône « Affichage Mesures » :



On cherchera pour la suite à exploiter les valeurs de réglage proposées par Ziegler-Nichols, pour éviter les dépassements.

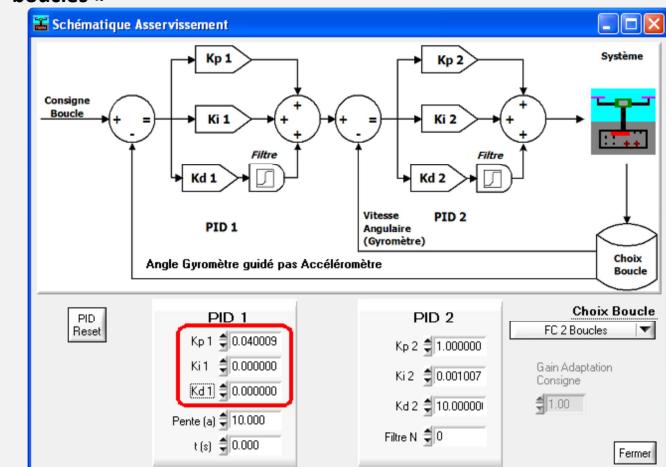
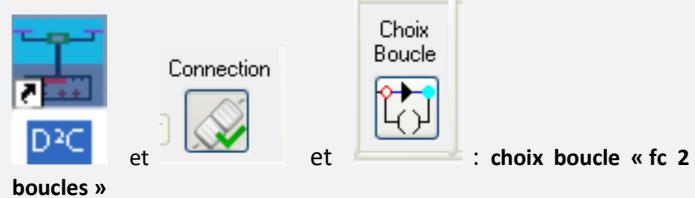
## Activité expérimentale 12 – B

Régler la correction proportionnelle ; Enregistrer la réponse temporelle aux créneaux.

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

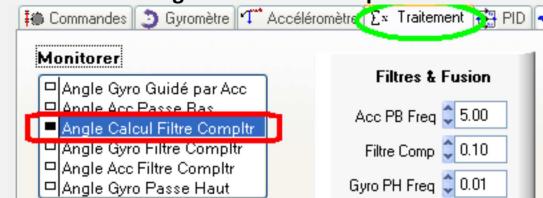
### b) Conditions d'expérimentation « choix boucle »



### c) Conditions d'expérimentation : « affichage »

(cliquer sur « commandes » si pas d'accès direct)

monitored : « angle calcul filtre compl. » :



et « consigne tangage PC » :

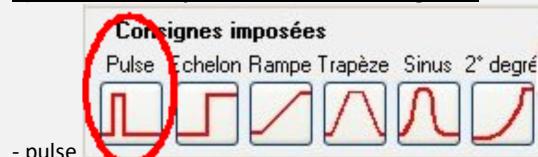


Une fois la mesure réalisée, les résultats seront enregistrés et une fenêtre de post-traitement s'affichera ;

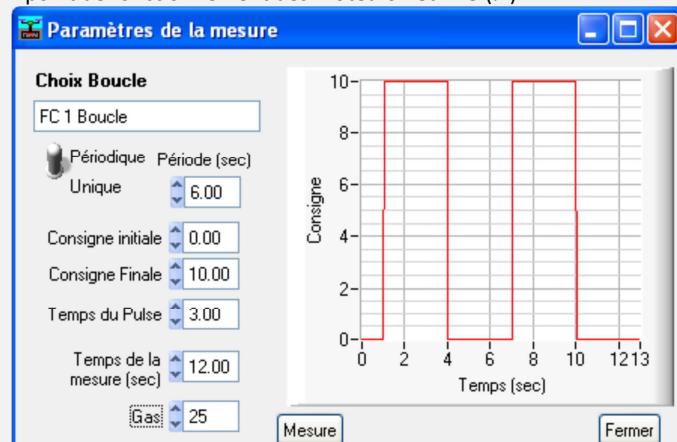
un accès aux résultats enregistrés est toujours possible ultérieurement avec l'icône « Affichage Mesures » :



### d) Condition d'expérimentation : « consignes »



- consigne initiale : 0 ; consigne finale 10° ;
- temps pulse : 3 s ; temps mesure : 12s ;
- point de fonctionnement des moteurs : Gaz 25 (%)



- cliquer sur « mesure » : donner un nom au fichier ; la mise en mouvement se fait dès le clic sur « Enregistrer »

**Activité expérimentale 12 – C**

Régler la correction PI ; (attention : la valeur du coefficient  $K_i$  trouvé par la méthode de Ziegler-Nichols est à diviser par 3125 pour l'implantation dans l'interface du D2C) ; Enregistrer la réponse temporelle aux créneaux ; indiquer la nature de l'amélioration apportée par cette correction (placée en amont des perturbations de couple) ; adapter éventuellement l'expérimentation.

**Activité expérimentale 12 – D**

Au final, compléter le réglage par la mise en place du coefficient dérivé pour obtenir un PID complet ; Enregistrer la réponse temporelle aux créneaux ; noter l'amélioration apportée. (indication : pour une vitesse « Gaz » 25 %, un jeu de coefficients performant peut être :  $K_p = 0,05$  ;  $K_i = 0,0004$  ;  $K_d = 0,2$  ).

## 5 ANALYSE DES ÉCARTS ENTRE LE MODÈLE ET LE RÉEL

**Activité de 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, mettre en évidence les écarts entre le comportement réel et le comportement simulé.

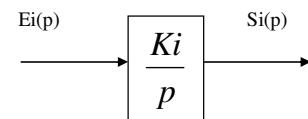
Les critères d'analyse proposés sont :

- la précision de la mise en position ;
- la rapidité de la mise en position ;
- 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 ou plusieurs explications aux écarts constatés.

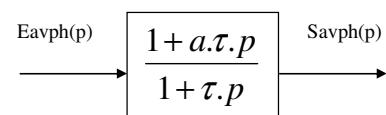
**Nota :** concernant les correspondances de coefficients du **correcteur intégral** entre simulation et expérimentation : la relation de récurrence mise en place dans le programme du système  $D^2C$  pour la correction intégrale est :

$S_{i_n} = S_{i_{n-1}} + K_i \cdot E_{i_n} \cdot T_e$   $T_e$  étant la période d'échantillonnage choisie à 3,2 millisecondes. En conséquence, pour le coefficient  $K_i$  on a la relation :  $K_i(D^2C) = K_i(\text{simulation}) \times 3,2 \cdot 10^{-3}$  ; ou encore :  $K_i(D^2C) = K_i(\text{simulation}) / 312,5$



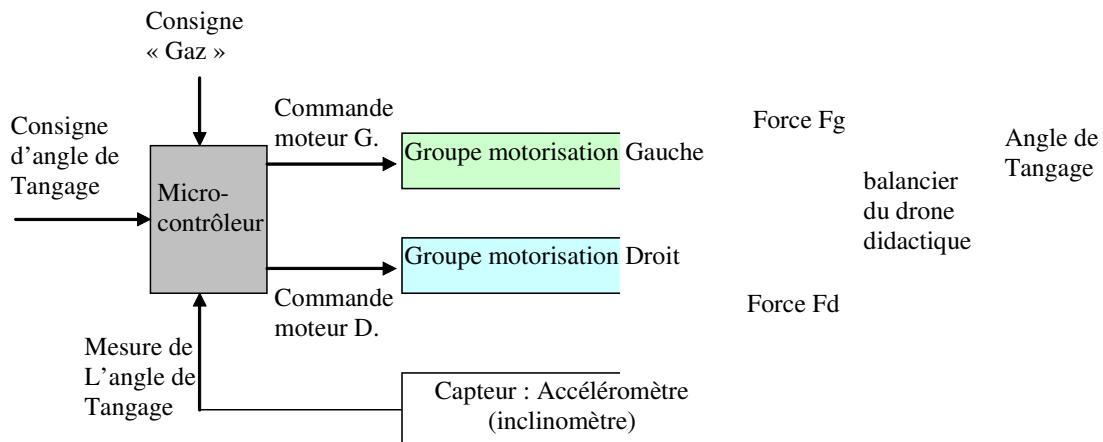
**Nota :** concernant les correspondances de coefficients du **correcteur à avance de phase** entre simulation et expérimentation.

La relation de récurrence mise en place dans le programme du système  $D^2C$  pour la correction à avance de phase et le fait que la période d'échantillonnage est choisie à 3,2 millisecondes nécessite que l'on applique la relation suivante :  $t(D^2C) = \tau(\text{simulation}) / 3,2 \cdot 10^{-3}$  ; ou encore :  $t(D^2C) = \tau(\text{simulation}) \times 312,5$



## 6 SIMULATION – TRAVAIL SUR LA BOUCLE D’ASSERVISSEMENT DE POSITION, SANS BOUCLE INTERNE.

Le document du dossier technique 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 microcontrôleur de la « carte pupitre », dans le cas d’une commande simple « en position ».



Le microcontrôleur reçoit la consigne d’angle de tangage, ainsi que la mesure de l’angle capté par l’accéléromètre (inclinomètre) de la centrale inertiale du drone didactique.

### 6.1 Travail sur la boucle de retour

#### 6.1.1 Filtrage du signal retourné par l'accéléromètre

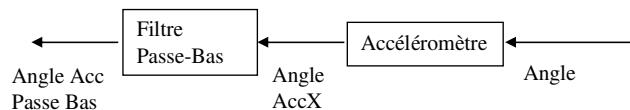
Le document du dossier technique présente les données du constructeur concernant le capteur « accéléromètre » utilisé en « inclinomètre » dans le drone.

Néanmoins, les expérimentations réalisées sur le drone ont montré que l’accéléromètre utilisé en inclinomètre capte toutes les vibrations associées au fonctionnement des moteurs du drone, et que ces vibrations ne permettent pas d’utiliser ce capteur sans filtrage.

On se propose d’analyser sur une réponse temporelle en simulation, l’effet du filtre passe-bas du premier ordre associé au capteur.

**Données :**

- Bande passante du capteur : réglée à 50 Hz
- Bande passante choisie pour le filtre passe-bas : 1 Hz.



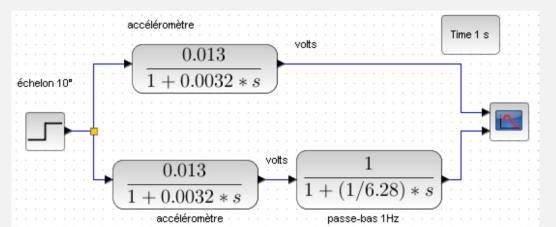
#### Activité de simulation 1

Les réponses seront rédigées puis présentées oralement lors de la synthèse finale.

Utiliser le logiciel de simulation de votre laboratoire pour mettre en place un schéma-bloc (voir l'exemple ci-contre) permettant de tracer la réponse temporelle sur 1 seconde, à un échelon de 10° :

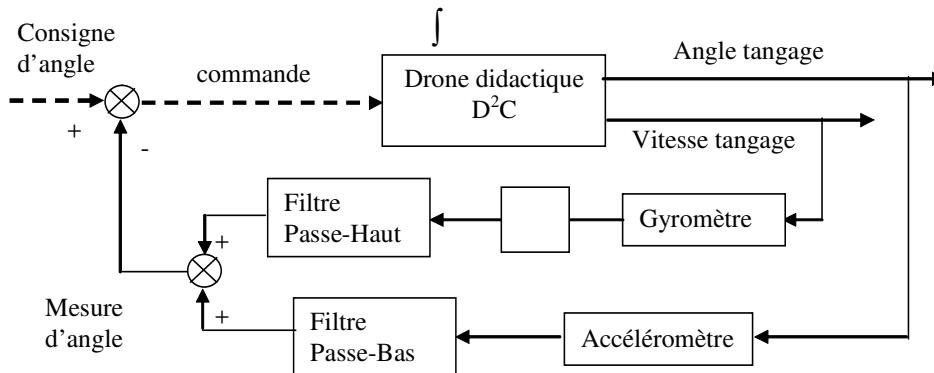
- d'une part pour l'accéléromètre seul,
- d'autre part pour l'accéléromètre filtré.

Mettre en valeur l'effet néfaste apporté par le filtre passe-bas sur la rapidité de la réponse de l'accéléromètre en indiquant le temps de réponse à 5% dans chaque cas.



### 6.1.2 Apport d'un deuxième capteur : le gyromètre

Les concepteurs du drone exploitent un autre capteur dans la centrale inertie qui est le gyromètre. C'est un capteur de vitesse angulaire de tangage dont on intègre le signal pour obtenir la position de tangage. Le schéma-bloc ci-dessous montre la manière dont ce capteur « gyromètre » est associé au capteur accéléromètre pour générer une mesure d'angle très performante.



Lorsque les deux filtres ont la même fréquence de cassure, cette association performante des deux capteurs est nommée « filtre complémentaire ».

**Données :** Lorsqu'on veut modéliser cet ensemble par un système équivalent du premier ordre, on peut considérer que c'est le comportement du gyromètre (capteur rapide) qui définit la constante de temps de l'ensemble, et que c'est le comportement de l'accéléromètre (capteur précis) qui définit le gain statique de l'ensemble.

Le document sur le gyromètre indique les caractéristiques suivantes :

- sensibilité du gyromètre :  $0,00667 \text{ V}/(\text{/s})$  ;
- bande passante du gyromètre : 75 Hz.

Le document sur l'accéléromètre indique les caractéristiques suivantes :

- sensibilité de l'accéléromètre :  $0,013 \text{ V}/\text{degré}$  ;
- bande passante de l'accéléromètre : réglée à 50 Hz et filtre passe bas à 1 Hz.

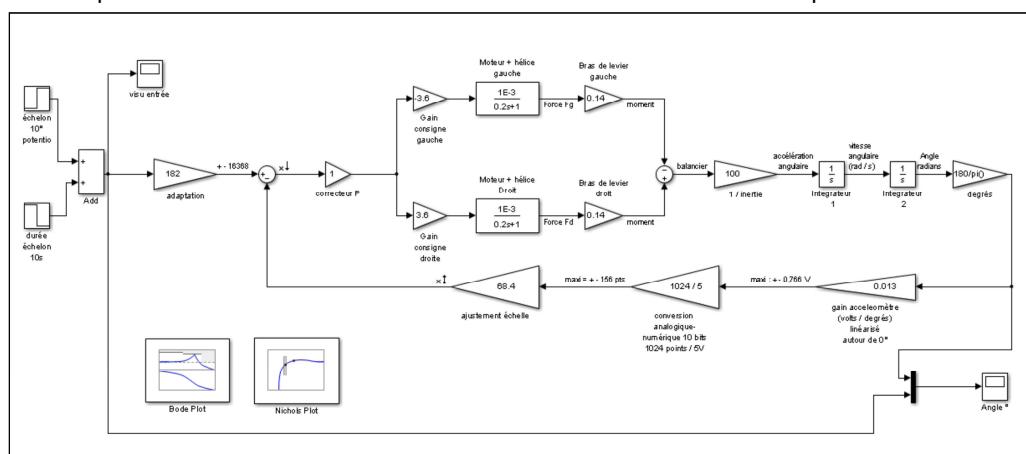
#### Activité de simulation 2

Donner la fonction de transfert du système équivalent du premier ordre du « filtre complémentaire ».

### 6.2 Travail sur la chaîne directe et la stabilité de l'asservissement

#### 6.2.1 Analyse du schéma-bloc

La figure ci-dessous présente le schéma-bloc associé à la boucle d'asservissement de position.



(fichier « [D2C\\_simulation\\_boucle\\_position\\_0.slx](#) » pour Matlab (à sauvegarder à votre nom) **Attention : certains de ces schéma-blocs seront peut-être à reconstruire.**

### Activité de simulation 3

La chaîne de retour ne prend en compte que le gain du filtre complémentaire étudié précédemment ; justifier cette simplification en comparant sa constante de temps avec celle des composants de la chaîne directe.

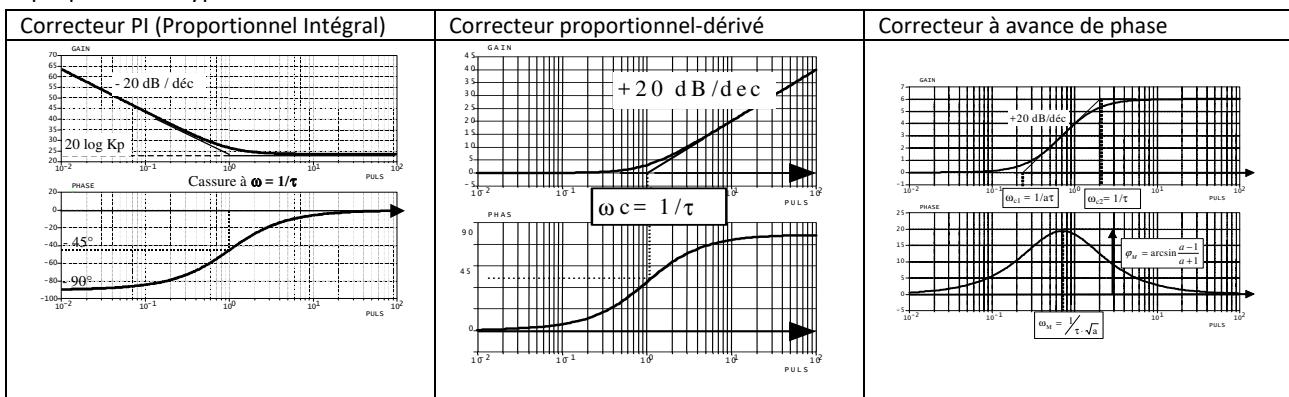
Justifier la composition de chacun des blocs présents dans la chaîne directe, à droite des blocs « moteur + hélice », en exploitant le principe fondamental de la dynamique.

### Activité de simulation 4

Lancer une simulation pour obtenir les diagrammes fréquentiels (Bode et black éventuellement). Analyser les marges de gain et de phase et justifier le fait que le drone avec cette boucle d'asservissement ne peut pas être utilisé avec un correcteur uniquement proportionnel (voir la classe de la FTBO).

## 6.2.2 Stabilisation du système

On propose trois types de correcteurs et leurs lieux de Bode.



### Activité de simulation 5

Choisir les deux correcteurs parmi les trois présentés, qui permettraient d'obtenir un système stable, s'ils étaient installés en série avec le correcteur proportionnel présenté sur les schéma-blocs précédents ; justifier.

**Activité de simulation 6**

On se propose d'utiliser le correcteur à avance de phase de fonction de transfert

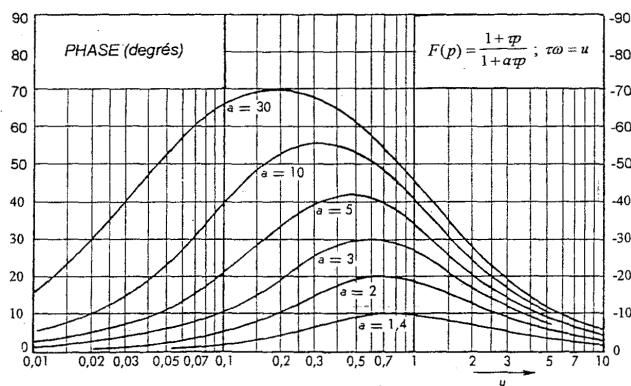
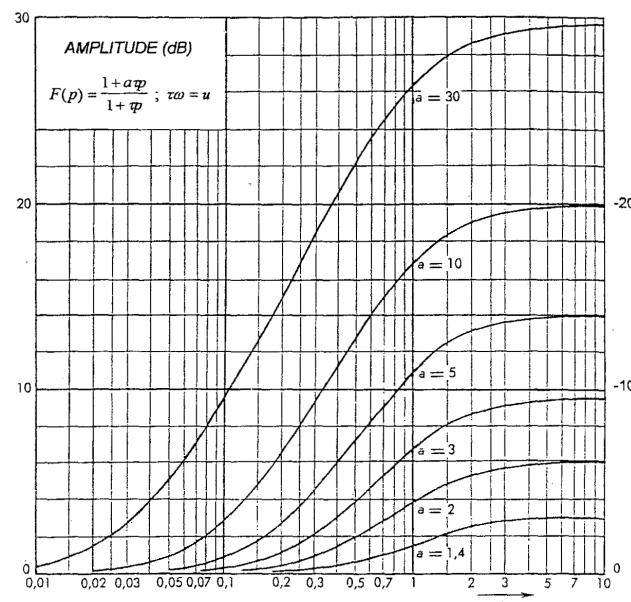
$$C(p) = \frac{1+a\tau.p}{1+\tau.p}$$

Utiliser l'abaque du correcteur à avance de phase pour montrer que les valeurs suivantes :

$a = 10$ ;  $\tau = 0,3$ , permettront d'obtenir une marge de phase du système d'au moins  $45^\circ$  à la pulsation de 1 rd/s.

(rappel : l'avance de phase maximum se produit

à la pulsation  $\frac{1}{\tau\sqrt{a}}$ ).


**Activité de simulation 7**

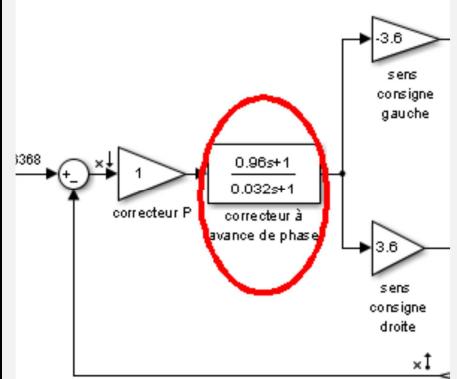
On souhaite maintenant ajuster le correcteur proportionnel P.

Mettre en place le correcteur à avance de phase en série dans la chaîne directe, comme par exemple sur la figure ci-contre.

Réaliser une simulation lorsque le gain proportionnel P est tel que  $P=1$ . À partir des tracés de Bode (ou de Black), choisir alors la valeur de P pour obtenir le maximum de marge de phase du système corrigé.

Valider le résultat en traçant les nouveaux diagrammes et la réponse temporelle sur 20 s, à un créneau de 10s, de  $10^\circ$ .

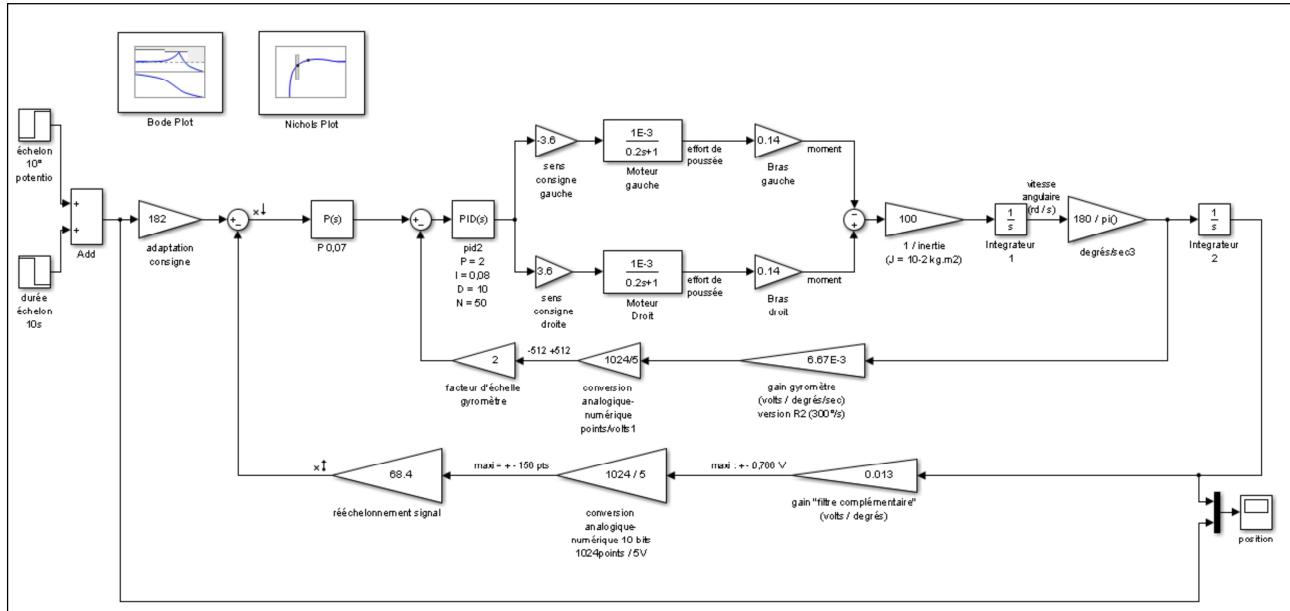
Donner votre point de vue sur le temps de réponse à 5%, vis-à-vis de la rapidité que l'on peut attendre dans la commande du drone avec cette solution.



## 7 TRAVAIL SUR LA BOUCLE D'ASSERVISSEMENT DE POSITION, AVEC BOUCLE INTERNE.

On se propose de montrer qu'il est possible d'obtenir un système plus performant que celui réglé précédemment ; ceci en utilisant une boucle interne « de vitesse », avec le gyromètre en plus de la boucle externe et la fusion de données.

La boucle interne est optimisée dans un autre TP et utilisée telle que proposée ci-dessous :



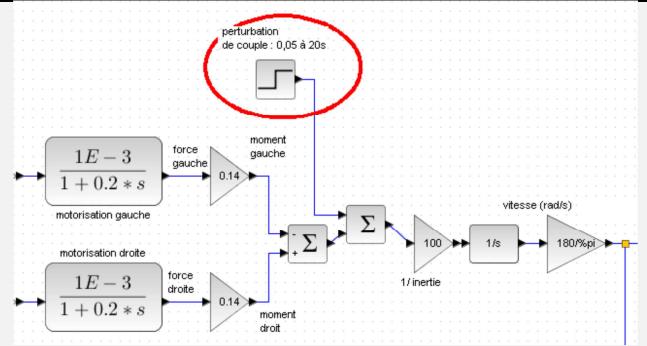
Pour la boucle externe, un correcteur proportionnel est utilisé : ( $P = 0,04$  donne un réglage satisfaisant). Fichier Matlab : « [D2C\\_simulation\\_2boucles\\_0.slx](#) » (à sauvegarder à votre nom)

### 7.1 Mise en évidence de l'effet positif de la boucle interne

#### Activité de simulation 8

Réaliser une simulation pour monter l'effet positif apporté par la boucle interne associée au capteur gyromètre ;

De plus, en ajoutant une perturbation de couple, montrer que le système n'est pas précis lorsque des perturbations de couple s'exercent (turbulences éventuelles sur le drone).



## 7.2 Mise en place d'un correcteur PI

### Activité de simulation 9

Mettre en place sur le schéma-bloc, un correcteur PI (proportionnel intégral) en amont de la perturbation (à la place du correcteur P), qui va permettre de rendre le système précis malgré les perturbations

$$C(p) = \frac{1 + \tau \cdot p}{\tau \cdot p}$$

Démarche proposée : à l'aide du diagramme de Bode ou de Black, choisir la pulsation sur laquelle la cassure du correcteur va venir se positionner, sans que l'ajout de celui-ci ne modifie les marges de gain et de phase existantes.

À noter : les logiciels de simulation utilisent la notation suivante

pour le correcteur PI :  $C(s) = P + \frac{I}{s}$  avec dans cette écriture :

s = la variable de Laplace ; P = coefficient proportionnel ; I = coefficient intégral.

