

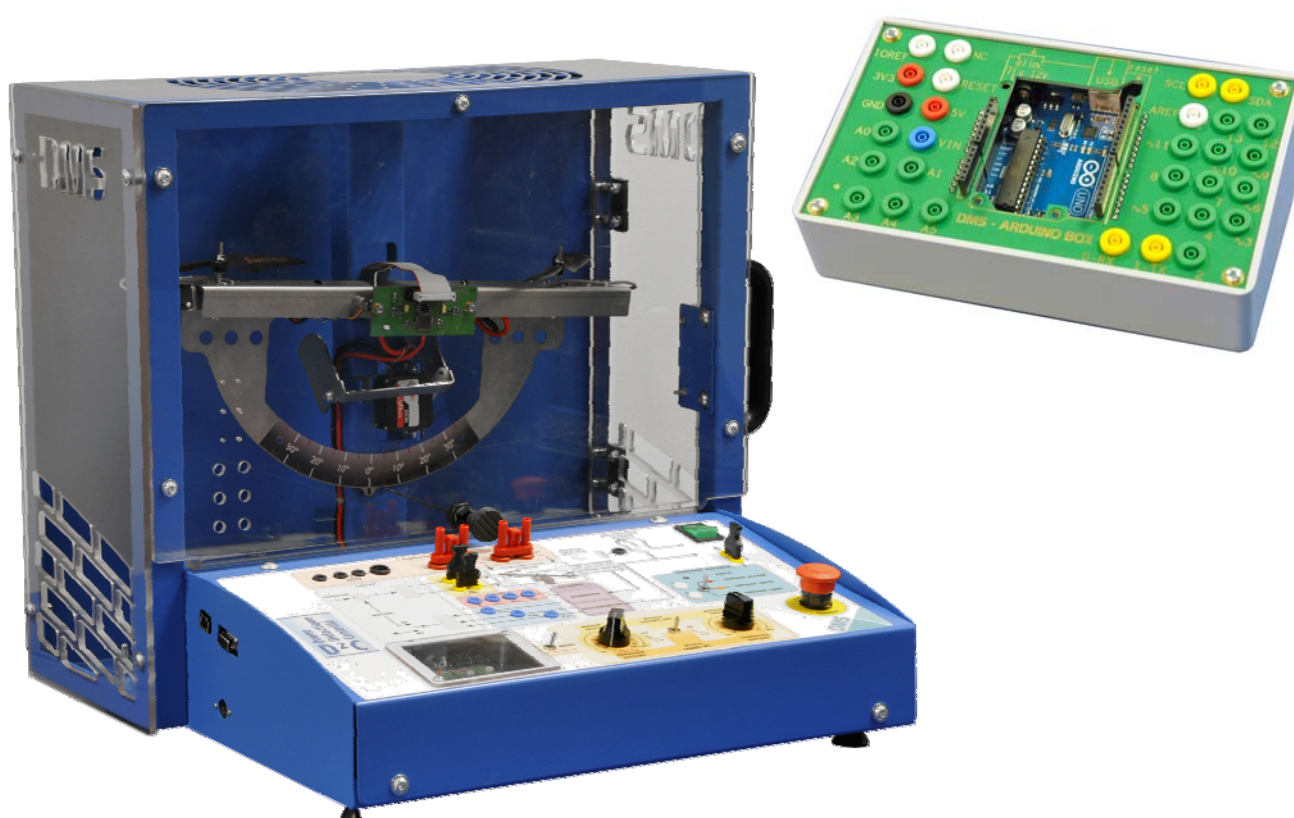
# D<sup>2</sup>C

## Drone Didactique Contrôlé

### TP CPGE

**Optimiser l'asservissement de tangage  
du drone didactique**

**TP 2-2 « Etude en simulation de la boucle  
d'asservissement de position du drone didactique »**





Préambule : pourquoi une boucle d'asservissement de position ?

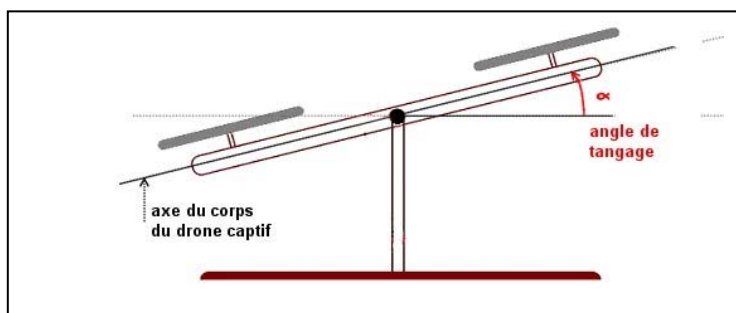
Obtenir le vol stable d'un quadrirotor n'est pas chose facile ; la mise en place de boucles d'asservissement autour de la centrale inertielle et de correcteurs dans le micro-contrôleur permettent d'atteindre cet objectif.

Pour pouvoir réaliser un vol en translation, le drone doit pouvoir être placé dans une position inclinée (voir la vidéo : [Quadrirotor-pilotage-en-position.avi](http://youtu.be/5g1YTMuls0w) : <http://youtu.be/5g1YTMuls0w>).

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

Nous verrons dans les différents TP d'asservissement de tangage proposés que les boucles d'asservissement bien réglées permettent d'obtenir de bonnes performances dans le contrôle du tangage du drone.

Le travail proposé porte sur le réglage en simulation par logiciel, de cet asservissement de position de tangage.



## TP 2-2 « Etude en simulation de la boucle de position du drone didactique »

**TP 2-2 :** Le fil directeur du travail proposé est l'analyse et l'amélioration des performances de la boucle de position de tangage, avec différents choix dans la chaîne de retour, ou dans la chaîne directe :

- 1- Travail sur la boucle d'asservissement de position **sans** boucle interne de vitesse :
  - 1-1 travail sur la boucle de retour : Comparaison des réponses temporelles : accéléro filtré ( visu de l'effet retard du filtre passe-bas)/ filtre complémentaire avec constante de temps du gyro
  - 1-2 Travail sur la chaîne directe et la stabilité de l'asservissement :
    - 1-2-1 analyse du schéma-bloc ;
    - 1-2-2 stabilisation du système : correcteur à avance de phase
- 2- Travail sur la boucle d'asservissement de position **avec** boucle interne de vitesse :
  - 2-1 Mise en évidence de l'effet positif de la boucle interne
  - 2-2 Mise en place d'un correcteur PI (Proportionnel Intégral).

### Conditions matérielles de réalisation du TP :

Disposer d'un logiciel de simulation d'automatique comme :

- Scilab-Xcos avec la boîte à outils « CPGE »,
- Matlab-Simulink avec la boîte à outils « Simulink Control Design ».

Doivent être à disposition :

- Le document « [fiche description - D2C](#) »
- Le document « [Fiche-d\\_information-accelerometre.pdf](#) »
- Le document « [Fiche-d\\_information-gyrometre.pdf](#) »

Les fichiers de simulation pour Scilab-Xcos : [D2C\\_simulation\\_boucle\\_position\\_0.zcos](#)  
[D2C\\_simulation\\_2boucles\\_0.zcos](#)

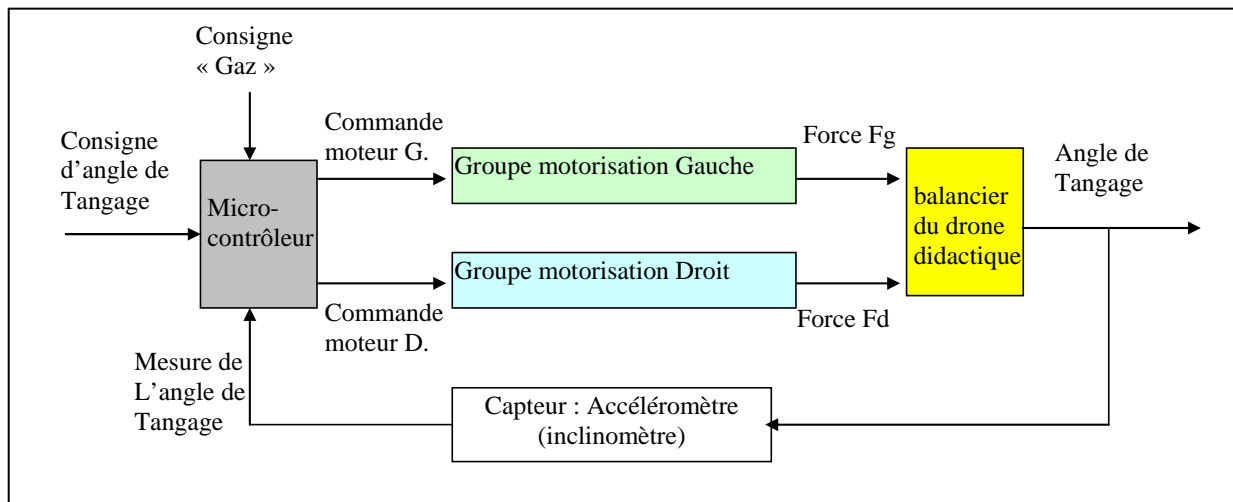
Ou les fichiers de simulation pour Matlab : [D2C\\_simulation\\_boucle\\_position\\_0.slx](#)  
[D2C\\_simulation\\_2boucles\\_0.slx](#)

Ou les fichiers de simulation pour un autre logiciel si aucun des deux précédents n'est utilisé.

1- Première partie : Travail sur la boucle d'asservissement de position, **sans** boucle interne.

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

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



Le

micro-contrôleur reçoit la consigne d'angle de tangage, ainsi que la mesure de l'angle capté par l'accéléromètre (inclinomètre) de la centrale inertielle du drone didactique.

### 1-1 Travail sur la boucle de retour

#### 1-1-1 filtrage du signal retourné par l'accéléromètre

Le document du dossier technique « **fiche-d\_information-accelerometre.pdf** » présente les données du constructeur concernant le capteur « accéléromètre » utilisé en « inclinomètre » dans le drone.

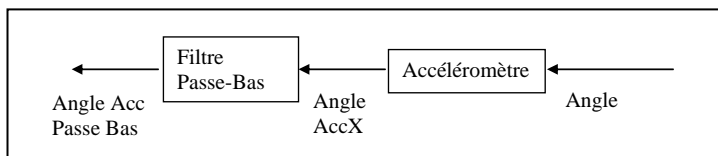
Néanmoins, les expérimentations réalisées sur le drone ont montré que l'accéléromètre utilisé en inclinomètre capte toutes les vibrations associées au fonctionnement des moteurs du drone, et que ces vibrations ne permettent pas d'utiliser ce capteur sans filtrage.

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

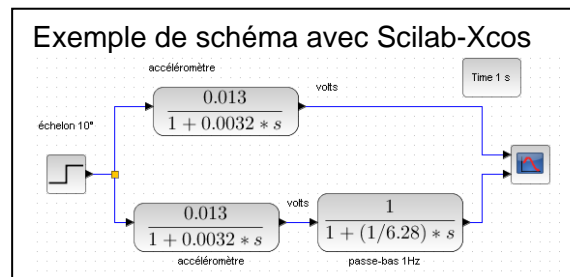


### Travail 1 :

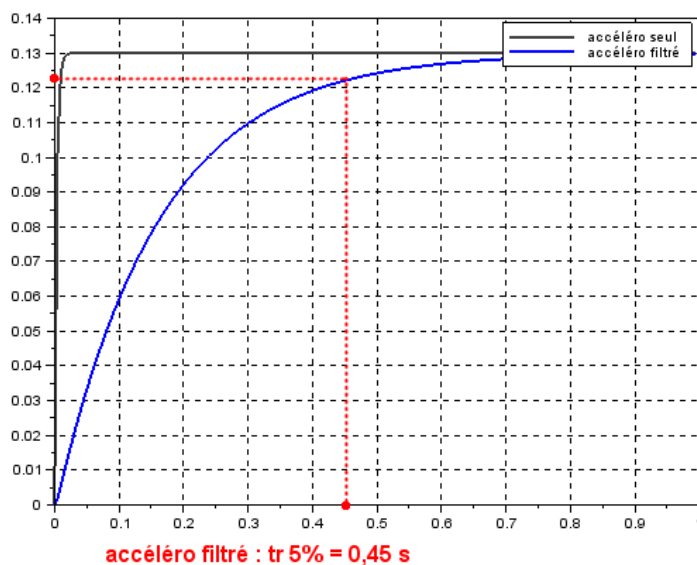
(les réponses seront rédigées puis présentées oralement soit lors de la synthèse finale auprès de professeur, soit auprès des camarades du groupe de travail « en îlot »). Utiliser le logiciel de simulation de votre laboratoire pour mettre en place un schéma-bloc (voir l'exemple ci-contre) permettant de tracer la réponse temporelle sur 1 seconde, à un échelon de  $10^\circ$  :

- 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.



**Corrigé :**



Dans le cas de l'accéléromètre seul, le temps de réponse est calculé à partir de la bande passante ; La bande passante étant de 50 Hz, la pulsation de cassure du diagramme de Bode de l'accéléromètre est de :  $50 \times (2 \pi) = 314 \text{ rad/s}$  ; sa constante de temps est donc  $\tau_{\text{acc}} = 1/\text{pulsation de cassure (en radians/s)} = 0,0032 \text{ s}$  le temps de réponse à 5% est 3 x la constante de temps, donc  $\text{tr}_{5\%\_acc} = 0,0096 \text{ s}$  (= environ 1/100<sup>ème</sup> de seconde) ;

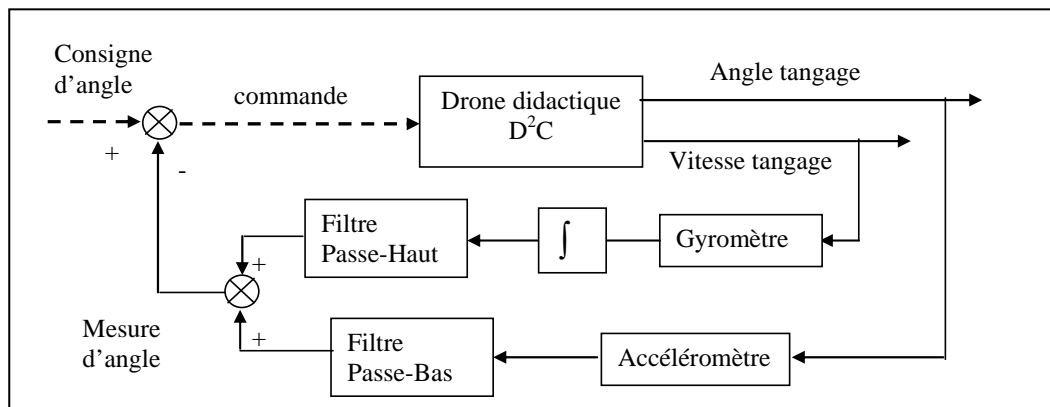
Dans le cas de l'accéléromètre filtré, la réponse est voisine de celle du premier ordre avec le pôle dominant qui est celui apporté par le filtre passe-bas ; le temps de réponse à 5% est d'environ 0,45 s.

Temps de réponses comparés : accéléromètre  $\approx 0,01\text{s}$  ; accéléromètre filtré  $\approx 0,45\text{s}$  ; on observe clairement que le filtre apporte de la lenteur dans la prise de mesure.

**1-1-2 apport d'un deuxième capteur : le gyromètre**

Les concepteurs du drone exploitent un autre capteur dans la centrale inertielle qui est le gyromètre C'est un capteur de vitesse angulaire de tangage dont on intègre le signal pour obtenir la position de tangage (voir le document « [fiche-d\\_information-gyrometre.pdf](#) »).

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 « [fiche-d\\_information-gyrometre.pdf](#) » indique les caractéristiques suivantes :

- Sensibilité du gyromètre : 0,00667 V/(°/s) ;
- Bande passante du gyromètre : 75 Hz

Le document « [fiche-d\\_information-accelerometre.pdf](#) » indique les caractéristiques suivantes :

- Sensibilité de l'accéléromètre : 0,013 V/degré ;
- Bande passante de l'accéléromètre : réglée à 50 Hz et filtre passe bas à 1 Hz.

### Travail 2 :

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

### Corrigé :

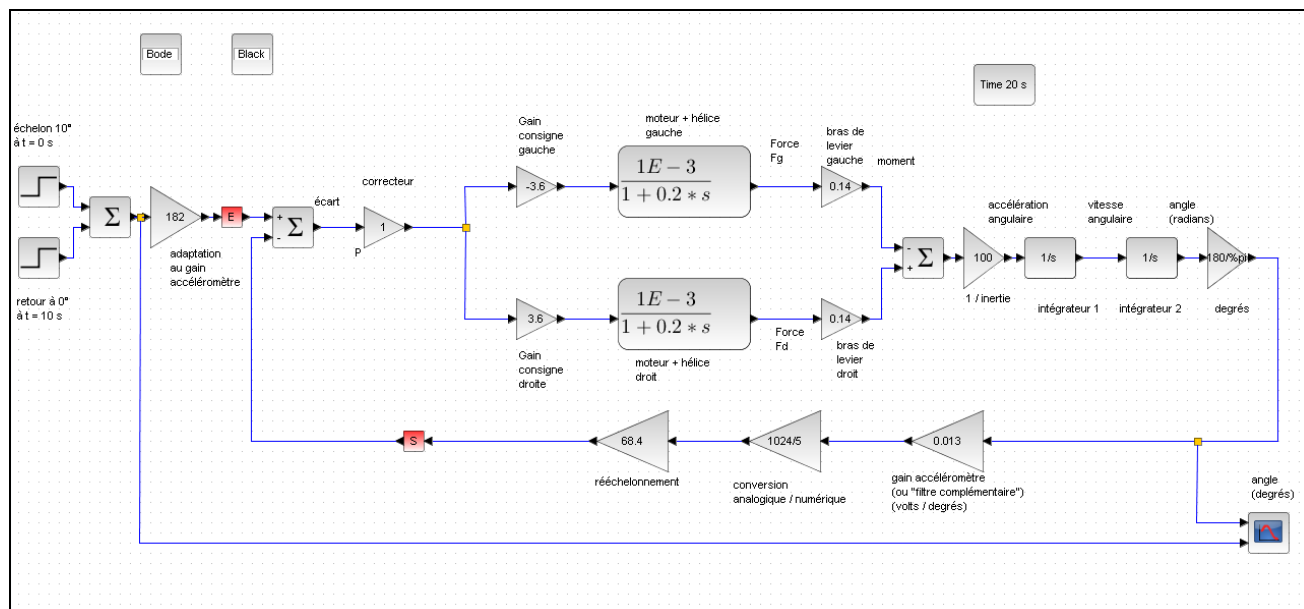
$$FT_{\text{filtrecomplémentaire}} = \frac{0,013}{1 + (1/(2 \times \pi \times 75)) \cdot p} = \frac{0,013}{1 + 0,0021 \cdot p}$$

## 1-2 Travail sur la chaîne directe et la stabilité de l'asservissement

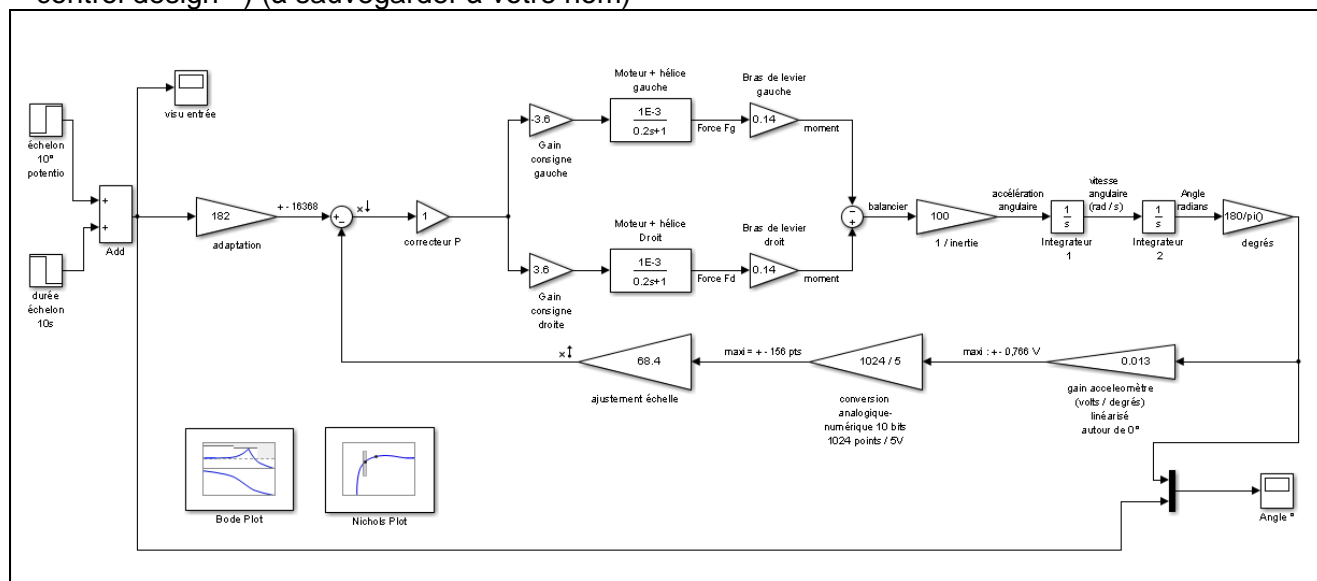
### 1-2-1 analyse du schéma-boc

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

(fichier « [D2C\\_simulation\\_boucle\\_position\\_0.zcos](#) » pour Scilab-Xcos v.5.4.1 avec la toolbox « CPGE ») (à sauvegarder à votre nom)



(fichier « **D2C\_simulation\_boucle\_position\_0.slx** » pour Matlab 2013a avec la toolbox « simulink control design ») (à sauvegarder à votre nom)



Attention : certains de ces schéma-blocs seront peut-être à reconstruire selon la version du logiciel de simulation disponible dans votre laboratoire !

### Travail 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.

### Corrigé :

La constante de temps du filtre complémentaire : 0,0021 s est très faible par rapport à la constante de temps de la motorisation de 0,2 s.

En isolant le balancier,

On recense les actions mécaniques suivantes :

- force développée par chaque moteur à l'extrémité du balancier ;
- action du support à travers la liaison pivot (frottement négligé) ;
- action de la pesanteur (CDG supposé sur l'axe de rotation).

En écrivant l'équation des moments, en un point de l'axe de rotation et en projection sur cet axe, on obtient :

$$b.Fd - b.Fg = J.\ddot{\theta} \quad (\text{avec } b : \text{bras de levier} ; J : \text{moment d'inertie du balancier} ; \theta : \text{position angulaire}).$$

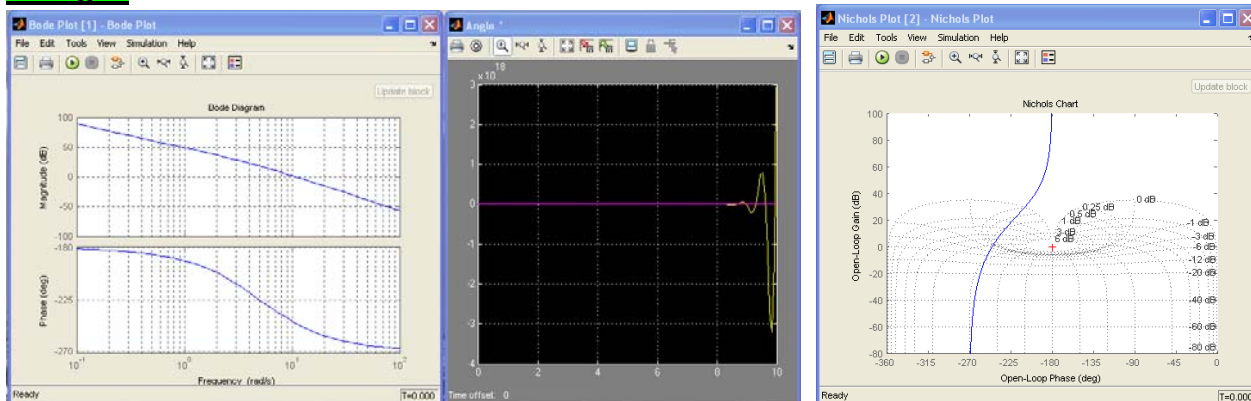
En transformée de Laplace :  $b.Fd(p) - b.Fg(p) = J.p^2.\theta(p) \rightarrow \theta(p) = [b.Fd(p) - b.Fg(p)] \frac{1}{J.p^2}$  d'où le schéma-bloc.



#### Travail 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).

#### Corrigé :

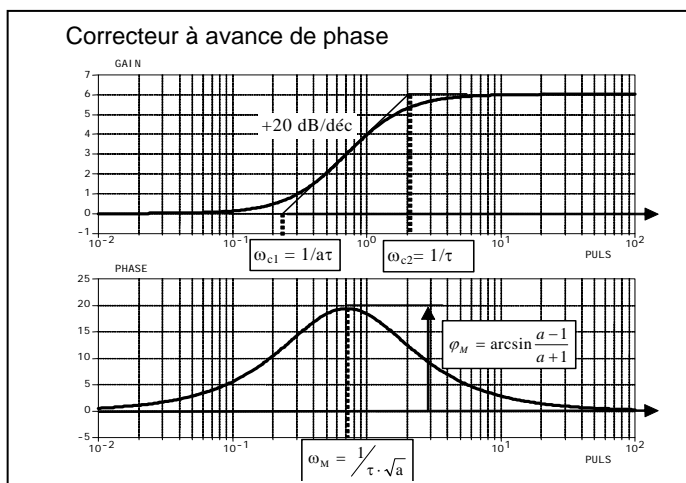
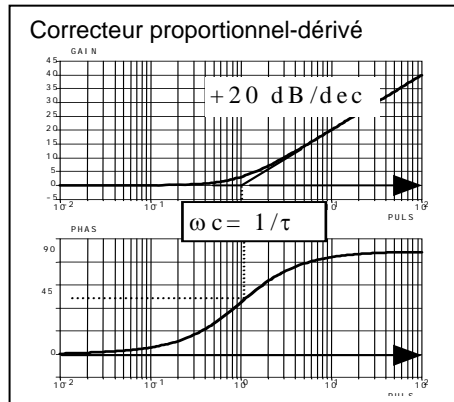
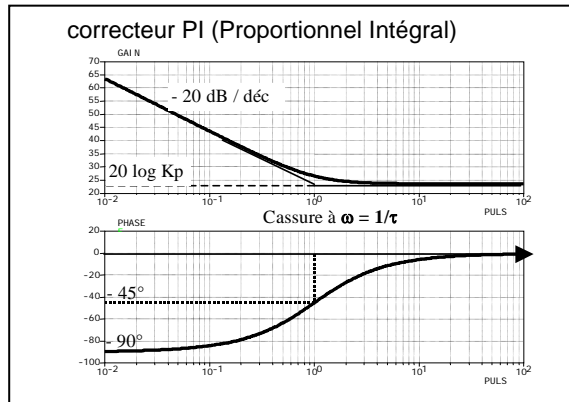


la marge de phase est négative ; la marge de gain infinie ; le système est instable quelle que soit la valeur du correcteur proportionnel.

Ceci est dû à la présence de deux intégrateurs dans la chaîne directe qui génèrent un déphasage de  $-180^\circ$  dans le tracé des lieux de transfert de la FTBO, et donnent l'instabilité.

#### 1-2-2 stabilisation du système

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



### Travail 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.

### Corrigé :

La stabilité peut être obtenue en faisant en sorte que le déphasage de la FTBO soit supérieur à  $-180^\circ$  lorsque le gain vaut 0dB.

Ceci ne peut être obtenu qu'avec des correcteurs qui possèdent une courbe de phase positive, et dont la valeur s'ajoutera à celle du système.

On ne peut donc utiliser que le correcteur « proportionnel-dérivé », ou le correcteur « à avance de phase ».

On se propose d'utiliser le correcteur à avance de phase de fonction de transfert  $C(p) = \frac{1+a\tau p}{1+\tau p}$  ;

### Travail 6 :

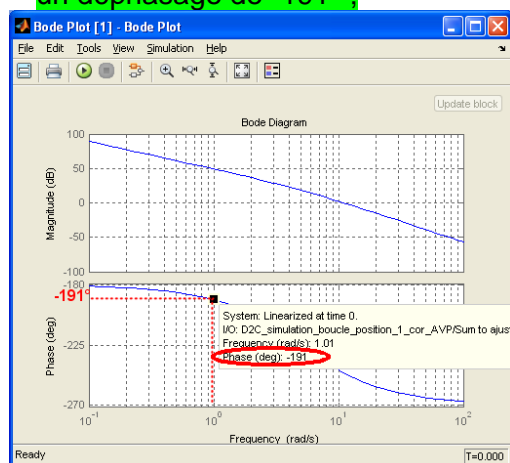
Utiliser l'abaque du correcteur à avance de phase pour montrer que les valeurs suivantes :

$a = 10$  ;  $\tau = 0,3$  , 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  $\frac{1}{\tau\sqrt{a}}$  )

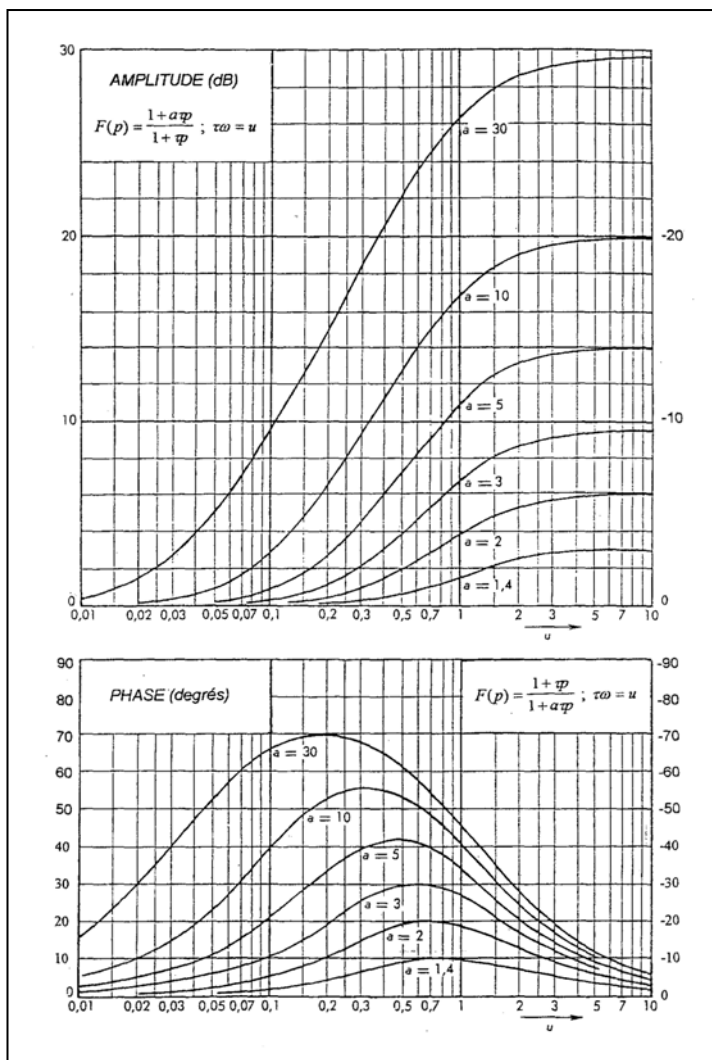
### Corrigé :

D'après l'abaque, le choix de  $a = 10$  permettra d'avancer la phase de  $55^\circ$  ;  
A la pulsation de 1 rd/s, le système possède un déphasage de  $-191^\circ$  ;



Si on place l'avance de phase maximum du correcteur sur cette pulsation, le déphasage deviendra égal à  $-191 + 55 = -136^\circ$  ;

Il ne restera plus qu'à ajuster le gain proportionnel pour avoir 0 dB à cette pulsation pour que le système possède la bonne marge ( $> 45^\circ$ ).



On souhaite maintenant ajuster le correcteur proportionnel P ;

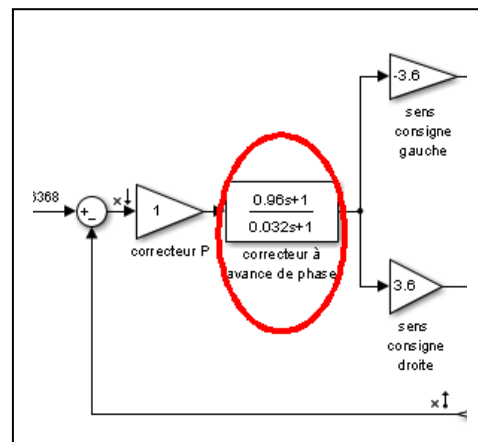
### Travail 7 :

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  $P = 1$  ;

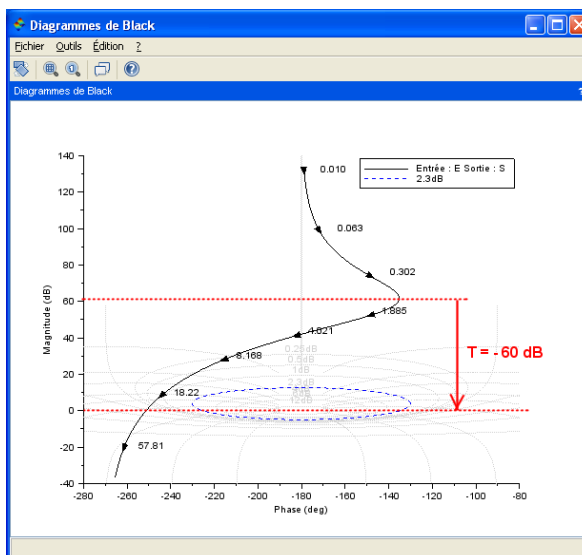
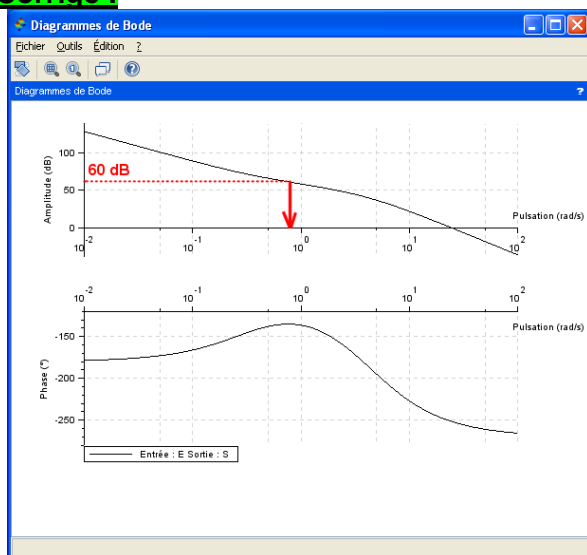
A partir des tracés de Bode (ou de Black), choisir alors la valeur de P pour obtenir le maximum de marge de phase du système corrigé.

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

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.

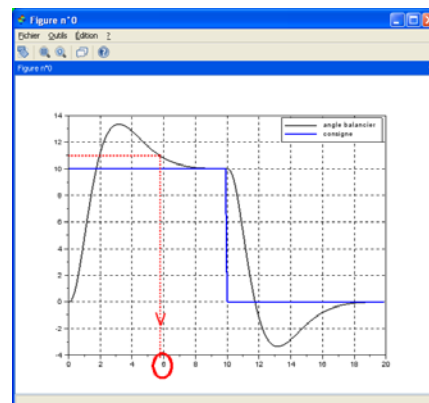
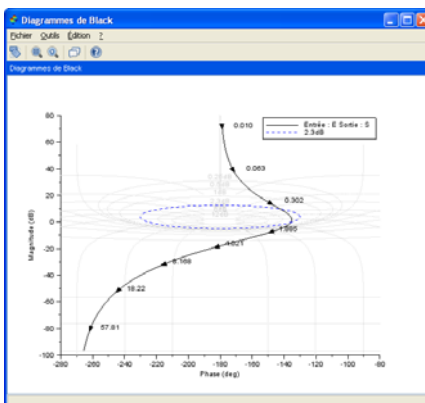
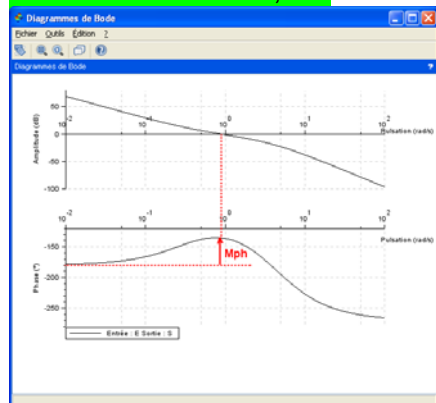


### Corrigé :



Pour obtenir le maximum de marge de phase, il faut que l'avance maximale apportée par le correcteur se situe à 0dB ; pour cela il faut effectuer une translation de  $-60$  dB de la courbe de gain de Bode ou de la courbe de black.

$$\text{Alors } P = 10^{\frac{-60}{20}} = 0,001$$



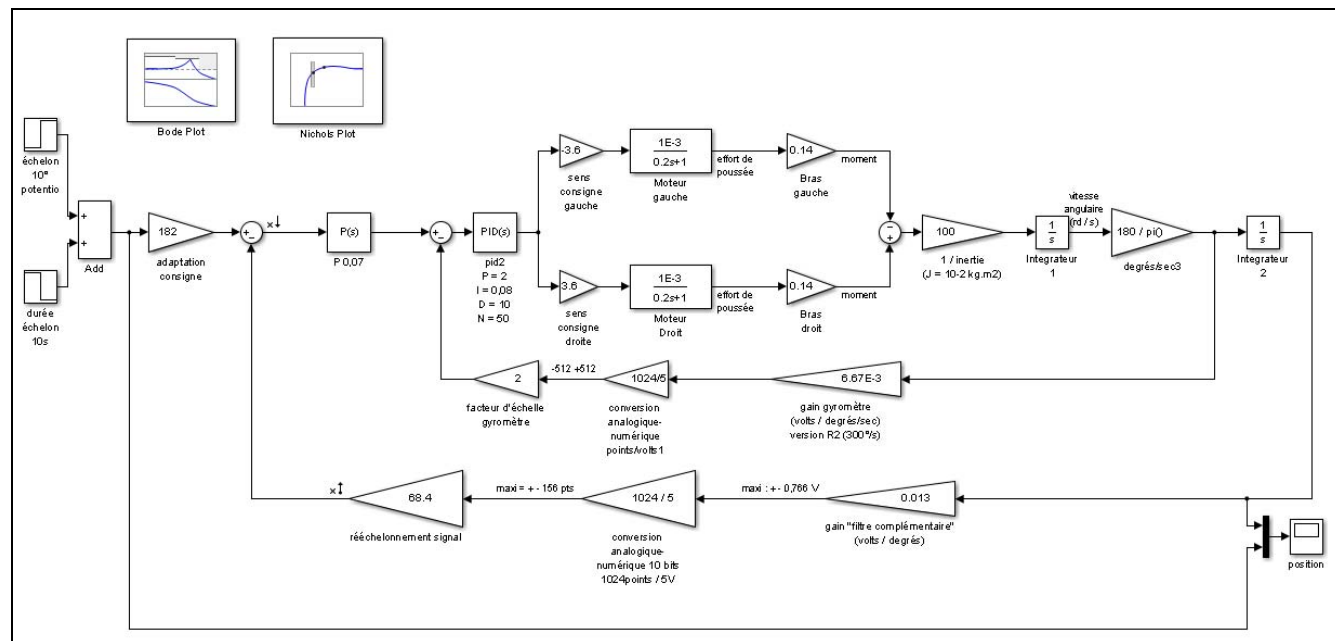
Le temps de réponse à 5% est d'environ 6 secondes : incompatible avec les performances souhaitables pour le pilotage d'un drone.

2- Deuxième partie : Travail sur la boucle d'asservissement de position, **avec** boucle interne.

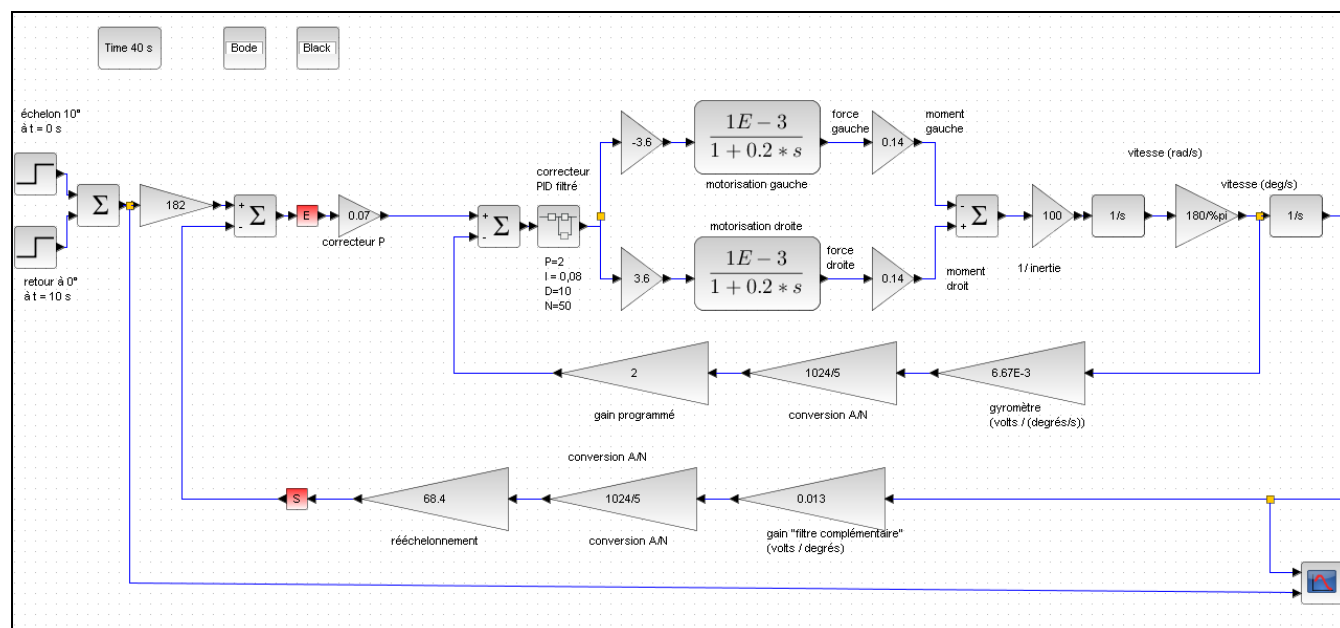
On se propose de montrer qu'il est possible d'obtenir un système plus performant que celui réglé précédemment ; ceci en utilisant une boucle interne « de vitesse », avec le gyromètre en plus de la boucle externe et la fusion de données.

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 : ( $P = 0,07$  donne un réglage satisfaisant).

Fichier Matlab : « **D2C\_simulation\_2boucles\_0.slx** » (à sauvegarder à votre nom)



Fichier Scilab : « **D2C\_simulation\_2boucles\_0.slx** » (à sauvegarder à votre nom)



## 2-1 mise en évidence de l'effet positif de la boucle interne

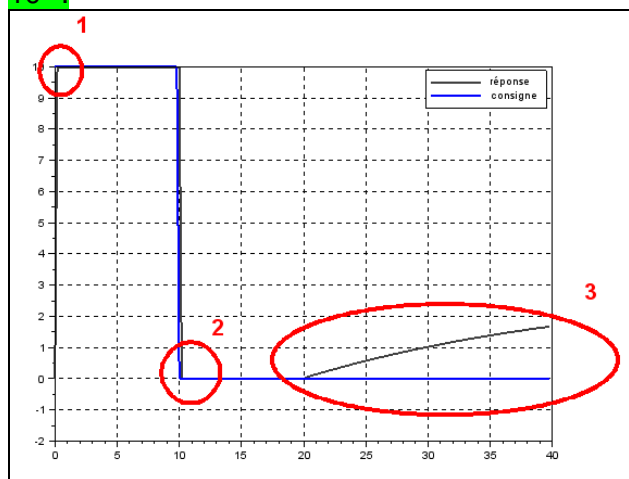
### Travail 8 :

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

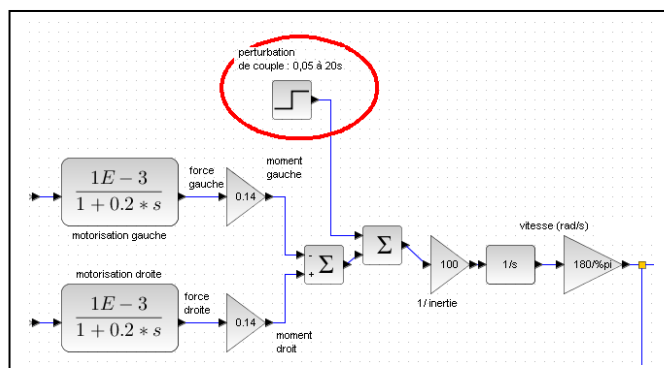
De plus, en ajoutant une perturbation de couple, montrer que le système n'est pas précis lorsque des perturbations de couple s'exercent (turbulences éventuelles sur le drone).

### Corrigé :

Analysons la réponse temporelle à un échelon de  $10^\circ$  :



Les zones 1 et 2 montrent que le comportement lors des variations brutales de consigne est très satisfaisant (pas de dépassement, et un temps de réponse voisin du dixième de seconde) ; par contre la zone 3 montre que le système n'est pas précis lorsque une perturbation de couple s'exerce.



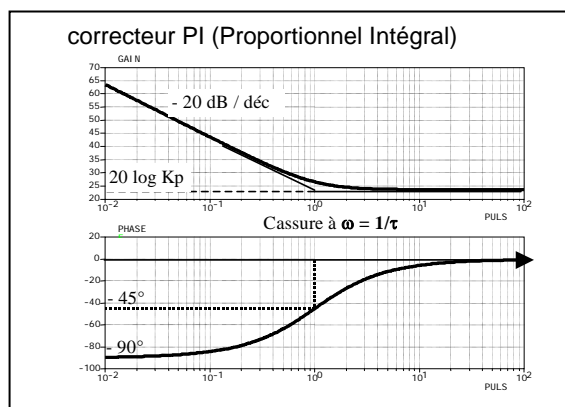
## 2-2 mise en place d'un correcteur PI

### Travail 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.



A noter : les logiciels de simulation utilisent la notation suivante pour le correcteur PI :

$$C(s) = P + \frac{I}{s}$$

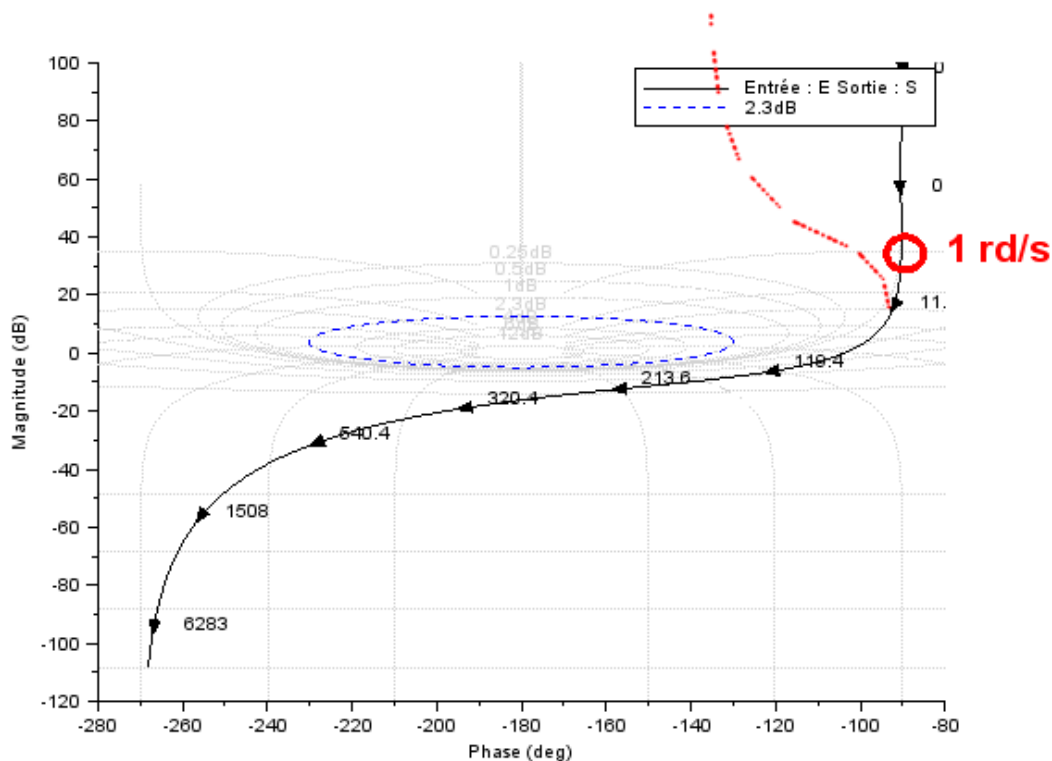
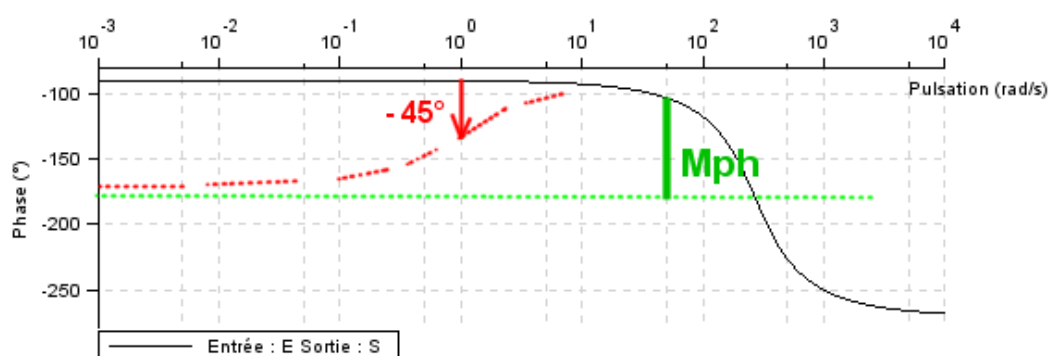
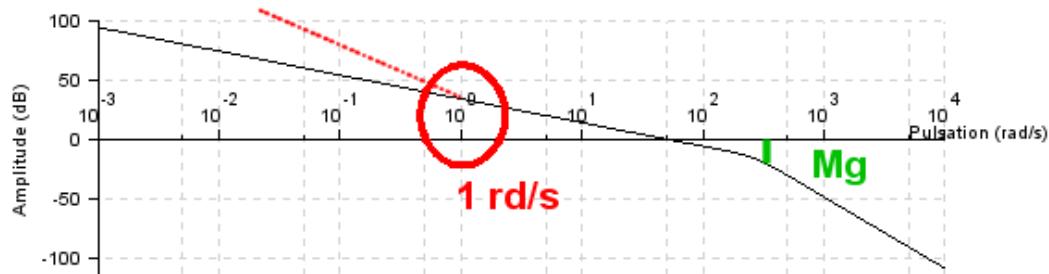
avec dans cette écriture :

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

**Corrigé :**

Analysons les diagrammes de Bode ou de Black :

En positionnant la cassure du correcteur vers 1 rd/s, on fait en sorte que sa mise en place ne modifie pas les marges existantes.

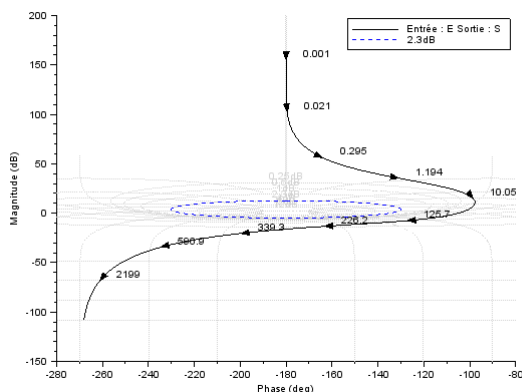
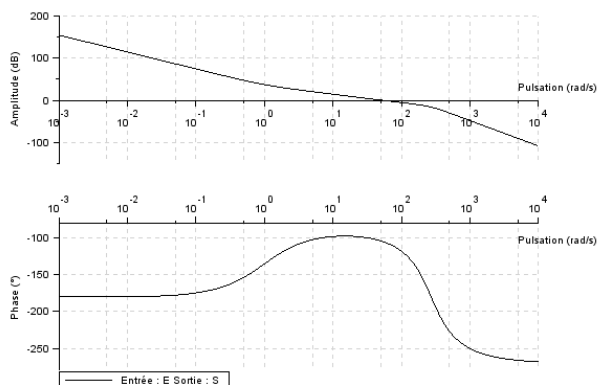




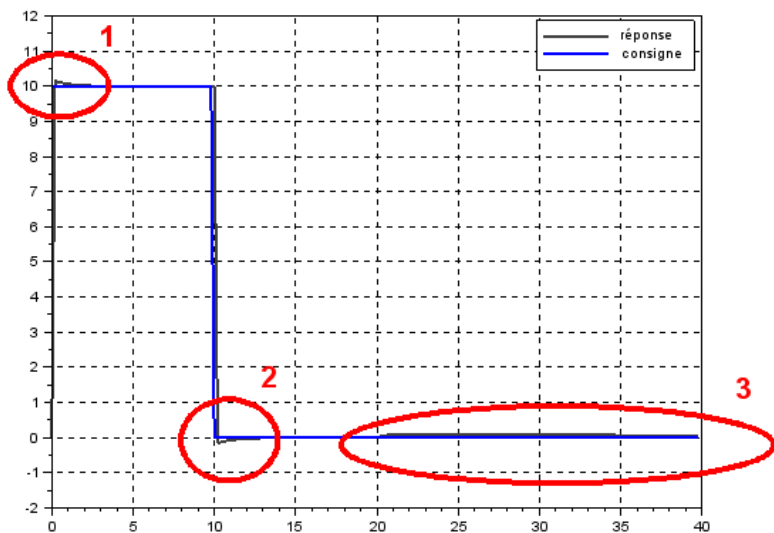
Le correcteur peut s'écrire :  $C(s) = P + \frac{I}{s} = P \frac{1 + \frac{P}{I}s}{s}$

Et on a  $\tau = P/I$  ; comme  $P = 0,04$  et  $1/\tau = 1$  , on obtient  $I = 0,04$  ;

alors :  $C(s) = 0,04 + \frac{0,04}{s} = 0,04 \cdot \frac{1+s}{s}$



vérifions l'effet positif sur la précision par rapport aux perturbations, en analysant la nouvelle réponse temporelle à l'échelon de  $10^\circ$  :



les zones 1 et 2 montrent qu'un faible dépassement est apparu ;  
la zone 3 montre que la perturbation a bien été gommée par l'apport du correcteur PI.

### En conclusion : Il s'agira

- soit dans le cas d'un travail autonome, d'expérimenter sur le système D2C, avec le sujet 2-1 pour confronter les résultats de simulation avec l'expérimentation ;
- soit si le travail est organisé en îlots, de préparer une synthèse avec le groupe qui a réalisé les expérimentations du travail 2-1. Un retour à certaines expérimentations ou simulations peut être utile dans ce cas.