



ENSICAEN  
6, bd maréchal Juin  
F-14050 Caen cedex 4

**2<sup>ème</sup> année**  
**Filière Electronique & Physique Appliquée**  
**Majeure SATE**

---

# **TRAVAUX PRATIQUES**

- COMMANDE PREDICTIVE**

Olivier GEHAN

---

2017-2018

## Sommaire

- Tp n°1 Asservissement numérique en position d'une antenne  
(non-traité en séance)*
- Tp n°2 Prédiction Optimale*
- Tp n°3 Commande prédictive à un pas d'un robot de prospection*
- Tp n°4 Commande Prédicative d'un système de transmission flexible  
A l'aide du logiciel Simart*
- TP n°5 Implémentation d'une loi de commande R-S-T sous  
Labwindows / CVI*
- Tp n°6 Asservissement de procédés pilotes*

## TP n°1

### Asservissement numérique en position d'une antenne

Ce BE est consacré à l'asservissement en position angulaire d'une antenne pilotée par un moteur à courant continu commandé en tension. La modalisation de ce moteur a déjà été faite en TD de Représentation des Signaux et Systèmes en première année.

#### Modélisation

- La résistance et l'inductance du circuit d'induit du moteur ont pour valeurs respectives  $R = 15 \text{ Ohms}$  et  $L = 8 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ .
- Le rotor possède un moment d'inertie  $J = 5 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$  et le coefficient de frottements visqueux est  $f = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$ .
- Le coefficient de proportionnalité entre le couple moteur et le courant induit a pour valeur  $k = 30 \cdot 10^{-3}$ .
- L'antenne est fixée directement sur l'arbre du moteur sans rapport de réduction. Le couple résistant généré par l'antenne peut être assimilé à une perturbation de commande.

Le moteur à courant continu représente l'actionneur du système à commander. Sa fonction de transfert continue est donnée par

$$G_{\text{actionneur}}(p) = \frac{1}{k} \frac{1}{1 + \tau_m p}$$

L'antenne étant positionnée directement sur l'arbre moteur, la position angulaire de l'antenne est l'intégrale de la vitesse de l'arbre moteur. La fonction de transfert du système à commander est ainsi donnée par

$$G(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{1}{k} \frac{1}{1 + \tau_m p} \frac{1}{p}$$

où  $y(p)$  et  $u(p)$  sont les transformées de Laplace de la position angulaire de l'antenne et de la tension d'alimentation du moteur.

#### Cahier des charges

L'objectif du BE est de réaliser un asservissement numérique en position de l'antenne répondant au cahier des charges suivant

- un suivi de consigne **sans erreur statique** caractérisé par une dynamique assimilable à un **système du second ordre caractérisé par son coefficient d'amortissement  $\xi_p=1$  et sa pulsation naturelle  $w_p$  à choisir.**
- un rejet asymptotique de perturbation **de type échelon** en sortie (perturbation de positionnement de l'antenne) et en entrée (couple de charge sur l'antenne) dont la dynamique dominante est assimilable à un **système du second ordre caractérisé par son coefficient d'amortissement  $\xi_r = 1$  et sa pulsation naturelle  $w_r$  à choisir.**
- Des marges de robustesse usuelles.
- Lorsque les différents points précédents du cahier des charges sont respectés, des dynamiques de poursuite et de régulation les plus rapides possibles.

Nous rappelons enfin que la loi de commande aura la structure usuelle suivante

$$S(z^{-1})D(z^{-1})u(t) + R(z^{-1})y(t) = T(z^{-1})y^*(t + d + 1)$$

où  $y^*(t)$  représente la consigne à suivre qui sera générée à partir du modèle de référence suivant

$$A^*(q^{-1})y^*(t) = B^*(q^{-1})u^*(t)$$

où  $u^*(t)$  représente la séquence de point de consigne à suivre, en l'occurrence un échelon.

## 1 Ecriture du programme sous Matlab / Simulink

Pour répondre à ce cahier des charges, vous écrirez sous Matlab un programme qui réalise les points suivants (**démarche strictement identique à celle que vous avez utilisée en Travaux Pratiques de Systèmes Asservis**)

- 1 Choisir la période d'échantillonnage  $T_e$  en fonction de la bande passante souhaitée en boucle fermée.
- 2 Détermination de la fonction de transfert échantillonnée bloquée  $G_r(z^{-1}) = z^{-d-1} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}$  du système à commander et récupération des polynômes  $B(z^{-1})$  et  $A(z^{-1})$ .



*Matlab gère les polynômes comme des vecteurs, que ce soit en continu ou en discret. Lorsque l'on désire utiliser une notation en  $z^{-1}$ , le polynôme est décrit par les coefficients des puissances croissantes de la variable  $z^{-1}$ .*



*Pour la suite du programme, attention de récupérer les polynômes exprimés en  $z^{-1}$  car toute la synthèse sera réalisée à l'aide de cette forme.*

3 En fonction des paramètres du cahier des charges, calcul du polynôme caractéristique  $P_c(z^{-1})$  et du modèle de perturbation  $D(z^{-1})$  afin de répondre à l'objectif de régulation. Le polynôme  $D(z^{-1})$  est un paramètre de synthèse mais le  $P_c(z^{-1})$  doit être calculé automatiquement par votre programme.

4 Calcul des polynômes  $S(z^{-1})$  et  $R(z^{-1})$ , solutions de l'équation de Bezout suivante

$$A(z^{-1})S(z^{-1})D(z^{-1}) + z^{-d-1}B(z^{-1})R(z^{-1}) = P_c(z^{-1})$$

Rq : Utiliser la fonction `bezou_z.m`

5 En fonction des paramètres du cahier des charges, calcul du polynôme  $T(z^{-1})$  et du modèle de référence  $\frac{B^*(z^{-1})}{A^*(z^{-1})}$  pour résoudre l'objectif de poursuite.

6 Affichage des fonctions de sensibilité du système de commande afin d'analyser les performances fréquentielles du système de commande en régulation et en poursuite.

N.B : Utiliser la fonction `sensibilites_z.m`

7 Affichage du (ou des) diagrammes utiles pour la mesure des marges de robustesse

- a. Marge de Gain
- b. Marge de retard

Enfin, vous complèterez le schéma Simulink ***regulation\_antenne.mdl*** afin de

- réaliser le schéma complet d'asservissement.
- Ajouter le signal de consigne
- Ajouter les signaux de perturbations d'entrée et sortie



*Les paramètres de simulation du schéma Simulink devront éventuellement être modifiés. En particulier, le système de commande est entièrement réalisé sous forme échantillonnée, le pas de simulation doit donc être constant et égal à la période d'échantillonnage.*

## 2 Synthèse du régulateur

Ajuster les paramètres de synthèse de la loi de commande afin d'obtenir un asservissement répondant au cahier des charges imposé.



*Afin d'analyser les effets de chaque signal d'excitation de la boucle d'asservissement (consigne, perturbation de commande ou perturbation de sortie), les instants d'apparition des différents échelons seront décalés dans le temps.*

*Rappelons que cela ne génère aucune perte de généralité grâce au théorème de superposition.*

### **3 Prise en compte de saturations sur l'actionneur par une structure anti windup**

L'amplitude des perturbations qui affectent le système à commander n'est jamais connue à priori. Une « sous-estimation » de l'amplitude de ces perturbations peut conduire à une saturation de commande dans les régimes transitoires en particulier. Il faut aussi noter que les erreurs de modélisation inéluctables peuvent également être la source d'effet de saturations.

- 1 Compléter le schéma Simulink afin de prendre en compte la saturation de l'actionneur (Ajout d'un bloc saturation sur la commande  $[-5V \quad 5V]$ )
- 2 Augmenter éventuellement l'amplitude de la perturbation de sortie de manière à faire apparaître une saturation de commande pendant un temps non négligeable. En revanche, si le réglage actuel génère une saturation de commande en régime permanent, il est nécessaire de refaire la synthèse. La loi de synthèse n'est pas compatible avec l'instrumentation.
- 3 Durant la période de saturation de la commande, observer l'allure de la commande calculée par le régulateur. Expliquer cette allure.
- 4 Modifier le schéma Simulink et compléter éventuellement le programme Matlab afin de réaliser une nouvelle structure du régulateur avec « anti – windup » (voir p.17 du cours sur la Mise en Œuvre d'un régulateur et Transparent T76)
- 5 Simuler à nouveau. Durant la période de saturation de la commande, observer la nouvelle allure de la commande calculée par le régulateur.

## TP n°1

### Prédiction Optimale

Considérons un système décrit par l'équation aux différences suivantes :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-d-1) + v(t)$$

où  $d+1$  représente le retard global du système (retard physique + retard du bloqueur) et  $v(t)$  est une perturbation qui affecte le système. Cette perturbation est modélisée par l'équation aux différences suivante

$$D(q^{-1})v(t) = C(q^{-1})\gamma(t)$$

## Travail à réaliser

### 1 –Prédicteur à $d+1$ pas sans perturbation

Donner l'expression analytique du prédicteur optimal à  $d+1$  pas lorsque  $v(t) = \gamma(t)$

$$\hat{y}(t/t-d-1)$$

Soit le système de fonction de transfert

$$G(p) = \frac{1.45}{1 + 2.2p}.$$

- Ecrire un programme **calcul\_predicteur.m** qui détermine le modèle échantillonné associé à la période  $T_e = 0,1s$ .
- Compléter le programme **calcul\_predicteur.m** de manière à déterminer les paramètres du prédicteur.
- Vérifier le bon fonctionnement du prédicteur sous simulink lorsque le système **n'est soumis à aucune perturbation. L'entrée  $u(t)$  du système sera un bruit blanc. On complètera le fichier prediction.mdl qui contient déjà le système sous sa forme échantillonnée.**
- Comparez sur un oscilloscope la sortie  $y(t)$  et la sortie prédite  $\hat{y}(t/t-d-1)$
- Comparez sur un oscilloscope la sortie  $y(t-d-1)$  et la sortie prédite  $\hat{y}(t/t-d-1)$

### 2 – Prédicteur à $j$ pas sans perturbation

Rappeler l'expression analytique du prédicteur optimal à  $j$  pas lorsque pas lorsque  $v(t) = \gamma(t)$

$$\hat{y}(t/t-j)$$

- Complétez le programme **calcul\_predicteur.m** de manière à déterminer les paramètres du nouveau prédicteur.
- vérifier son fonctionnement sous simulink (fichier prediction.mdl). **L'entrée du système sera un bruit blanc.**
- Comparez sur un oscilloscope la sortie  $y(t)$  et la sortie prédite  $\hat{y}(t/t-j)$
- Comparez sur un oscilloscope la sortie  $y(t-j)$  et la sortie prédite  $\hat{y}(t/t-j)$

### 3- Système soumis à une perturbation échelon

Le système est maintenant soumis à une perturbation  $v(t)$  de type échelon à l'instant  $t = 50s$ .

- Compléter le schéma Simulink de manière à faire apparaître une perturbation  $v(t)$  échelon à  $t = 50s$ . Exécuter et Conclure.
- Rappeler l'expression du prédicteur optimal à  $j$  pas lorsque le système est soumis à une perturbation dont le modèle est connu soit  
$$\hat{y}(t/t-j)$$

- Compléter le programme **calcul\_predicteur.m** de manière à déterminer les paramètres de ce nouveau prédicteur. Le polynôme  $C(q^{-1})$  est un paramètre de synthèse qu'il faut choisir. **On choisira toutes ses racines réelles, stables et bien amorties.**
- Modifiez si besoin le schéma **prediction.mdl** et vérifiez que la prédiction à  $j$  pas est améliorée.
- Le polynôme  $C(q^{-1})$  a une grande influence sur les performances du prédicteur lorsque la perturbation apparaît. Modifier  $C(q^{-1})$  en « ralentissant » ses racines et observer les conséquences sur la qualité de la prédiction.

### 4- Système soumis à une perturbation sinusoïdale

Le système est maintenant soumis à une perturbation  $v(t)$  sinusoïdale de pulsation 2 rad/s à partir de l'instant  $t = 20s$ .

- Modifiez le schéma Simulink de manière à faire apparaître une sinusoïdale  $v(t)$  à  $t = 20s$ . Étudier à nouveau les performances du prédicteur du cas n°3 dans ce cas.
- Calculer les paramètres d'un nouveau prédicteur dans le fichier **calcul\_predicteur.m** de manière à prendre en compte une perturbation sinusoïdale. Vérifier que la



prédiction à j pas est améliorée.

### 5– Système soumis à une perturbation sinusoïdale et une perturbation échelon

Réaliser un prédicteur à j pas lorsque le système est soumis à une perturbation sinusoïdale de pulsation 2 rad/s et une perturbation échelon. Réalisez l'essai sous Simulink en appliquant la perturbation sinusoïdale à  $t = 20s$  et la perturbation échelon à  $t = 50s$ .

### 6– Essai en temps – réel

Nous allons utiliser le coffret analogique et notamment le système du 1<sup>er</sup> ordre. Sa fonction de transfert est  $G(p)$ .

- Tester le comportement du prédicteur à j pas (calculé avec un modèle de perturbation échelon) sous Simulink. Le fichier **temps\_réel.mdl** contient les Blocs nécessaire à l'envoi et la mesure d'une tension sur le coffret (envoi de l'entrée, mesure de la sortie). Il faut simplement
  - Exécuter le programme **init\_carte.m** avant le schéma Simulink (ce fichier ouvre la communication entre Matlab et la carte d'acquisition).
  - Compléter alors le fichier **temps-réel.mdl** avec le schéma de simulation de votre prédicteur (copier coller de votre fichier prediction.mdl).
  - Comparez sur un oscilloscope la sortie  $y(t-j)$  et la sortie prédite
  - Comparez sur un oscilloscope la sortie  $y(t-j)$  et la sortie prédite
- Modifier le schéma Simulink de manière à rajouter une perturbation de sortie de type échelon à  $t = 50s$ . Comparez à nouveau la sortie du procédé et la sortie du prédicteur.  
Conclusion.

## TP n°3

### Commande prédictive à un pas d'un robot de prospection

Ce TP est associé aux TD intitulés

- Télécommande prédictive d'un robot de prospection
- Analyse d'un système de commande prédictive

L'objectif est de réaliser un asservissement d'un système appelé **Robot de prospection** à partir d'une approche de type **commande prédictive à un pas**.

Le système est décrit dans le texte de TD « Télécommande prédictive d'un robot de prospection ». Il s'agit d'un robot piloté à distance à l'aide d'un joystick qui doit permettre de guider la trajectoire du robot sur le site (la lune) où il est situé. Le manipulateur fournit donc des consignes en position qui sont comparées à la position actuelle du robot. Cette information est obtenue par transmission radio des données du capteur de position. Bien entendu, les informations subissent un retard de transmission dans les deux sens (mesure et envoi).

#### Paramètres du système

- Le temps de transmission des données est estimé à 1.28s et le temps de calcul de la commande à 5ms.
- La fonction de transfert du robot manipulateur **sur le site** est donnée par
$$G(p) = \frac{1}{1+1.5p}$$
- La trajectoire du robot est perturbée par des imperfections du sol qui peuvent être approximées par signaux de type échelon d'amplitudes et d'instant d'occurrence aléatoires.

On demande de réaliser un asservissement numérique de ce système sous Matlab / Simulink en utilisant un système de commande prédictive à un pas. Le cahier des charges est le suivant :

- Assurer la stabilité du système de commande
- Assurer des marges de robustesse satisfaisantes en l'occurrence
  - $MM > -6\text{dB}$
  - $MR > T_e$
- Assurer le suivi de consigne de type échelon sans erreur statique en présence des effets perturbatoires.
- Assurer le suivi de consigne avec un dépassement inférieur à 5%.
- Le temps de réponse du système sera ajusté de manière à optimiser la rapidité du système tout en respectant les précédents points du cahier des charges.
- Une énergie de commande « raisonnable »

### *Synthèse du système de commande*

On utilisera les notations du cours à savoir la forme suivante pour la fonction de transfert échantillonnée – bloquée du système à commander

$$G(z^{-1}) = z^{-d-1} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}$$

Afin de résoudre le problème de commande proposé, on propose de suivre la démarche suivante :

1 - Définir les variables A, B et d qui représentent respectivement  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$  et le retard d. Définir la valeur de la période d'échantillonnage  $T_e$ .

2 – Complétez le programme précédent afin de déterminer les paramètres d'un prédicteur à un pas du système de fonction de transfert  $G(z^{-1})$  (voir Question 1 du TD)

3 – Utilisez le schéma Simulink du TP précédent (prédiction linéaire) de manière à tester la prédiction à un pas sur le système  $G(z^{-1})$ . Vérifier les performances du prédicteur en présence :

- d'une entrée  $u(t)$  de type échelon et sans perturbation
- d'une entrée  $u(t)$  de type sinusoïdale et sans perturbation
- d'une entrée  $u(t)$  de type sinusoïdale avec perturbation échelon (l'instant d'occurrence de la perturbation sera choisi en milieu de simulation)

4- La fonction de transfert  $\frac{H(z^{-1})}{W'(z^{-1})} = \frac{H(z^{-1})}{W'(z^{-1})} \frac{1}{D(z^{-1})}$  peut être considérée comme la mise en cascade d'une pondération fréquentielle permettant notamment de filtrer le bruit de mesure et le modèle interne des perturbations. La pondération fréquentielle est généralement choisie sous la forme

$$\frac{H(z^{-1})}{W'(z^{-1})} = \frac{1 - \beta z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}}$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres de synthèse.

4.a Utilisez le schéma Simulink pour réaliser un essai en boucle ouverte sur le système avec une consigne et des perturbations nulles. En revanche, le bruit de capteur est additionné à la sortie du système.

4.b Réaliser une analyse spectrale de la sortie du capteur pour déterminer la largeur spectrale du bruit.

4.c Déterminer  $\alpha$  et  $\beta$  de manière à synthétiser un filtre  $\frac{H(z^{-1})}{W'(z^{-1})} = \frac{1 - \beta z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}}$  qui permet de filtrer ce bruit de mesure tout en ayant la bande passante la plus large possible.

5- Le filtre précédemment synthétisé doit stabiliser le système non retardé d'après l'équation de Bezout suivante (voir TD)

$$A(z^{-1})W'(z^{-1})D(z^{-1}) + B(z^{-1})H(z^{-1}) = P(z^{-1})$$

La méthode de synthèse utilisée ne conduit pas obligatoirement à un régulateur stabilisant et assurant un système de commande répondant au cahier des charges en terme de rapidité et d'amortissement.

5.1 Compléter le programme Matlab pour générer le polynôme  $P(z^{-1})$ . Observer alors la position des pôles de la boucle fermée.

5.2 La pondération fréquentielle précédent va être modifiée de la manière suivante

$$\frac{H(z^{-1})}{W'(z^{-1})} = \mu \frac{1 - \beta z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}}$$

où  $\mu$  est scalaire.

Déterminer une valeur de  $\mu$  adéquate au regard du cahier des charges par la méthode du Lieu des racines (fonction **rlocus** de Matlab)

6 – Complétez le programme de manière à déterminer les polynômes  $Rd(z^{-1})$  et  $Rn(z^{-1})$  et  $Rp(z^{-1})$  de la forme standard du correcteur linéaire équivalent (voir question 3 du TD)

7 – Complétez le programme de manière à créer les fonctions de transfert reliant (voir question 4 du TD)

- la sortie  $y(t)$  à la consigne  $y^*(t)$
- la sortie à une perturbation  $v(t)$  **de sortie**
- la commande au bruit de mesure

Afficher les diagrammes de Bode de ces deux fonctions de transfert.

*Que pensez-vous de la spécification du cahier des charges concernant le rejet de perturbations ?*

*Que pensez-vous de la spécification du cahier des charges concernant le suivi de consigne échelon ?*

Afficher les pôles et zéros de la seconde fonction de transfert.

*Que pensez-vous de la spécification du cahier des charges concernant le rejet de perturbations ?*

*Justifier la valeur des pôles par rapport au résultat de la question 4.*

8 – Complétez le schéma *Simulink* de manière à réaliser l'asservissement demandé (voir page 1 du TD). Analyser les performances du système de commande et préciser les points du

cahier des charges qui sont respectés et ceux qui ne le sont pas. Le schéma Simulink contiendra les deux schémas possible pour cet asservissement :

La forme faisant apparaître le prédictor à  $d+1$  pas

La forme usuelle  $Rd(z^{-1})$ ,  $Rn(z^{-1})$  et  $Rp(z^{-1})$

Cela vous permettra notamment de valider vos calculs de polynômes.

9 – Modifier éventuellement les paramètres de synthèse de l'asservissement afin de répondre au mieux au cahier des charges.

## TP n°4

### Commande Prédicative d'un système de transmission flexible A l'aide du logiciel Simart

Ce travail porte sur la synthèse d'une loi de commande pour un système de transmission flexible à l'aide du logiciel SIMART.

Le procédé est constitué de trois poulies reliées entre-elles par des ressorts (voir figure 1). L'objectif consiste à asservir la position angulaire de la troisième poulie sur celle de la première tout en rigidifiant le système. Notons que les procédés présentant des modes flexibles sont relativement nombreux (systèmes mécaniques à ressort, à courroie, satellites, etc.).

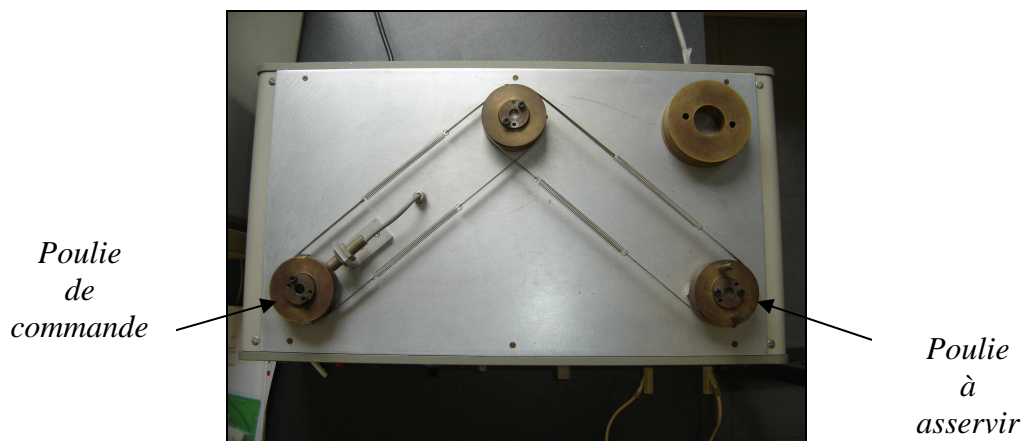


Figure 1 : système de transmission flexible

Pour une période d'échantillonnage  $T_e = 0.05s$ , la fonction de transfert échantillonnée – bloquée du système est donnée par

$$G(z^{-1}) = z^{-d-1} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = z^{-3} \frac{0.28239 + 0.833375z^{-1} + 0.30297z^{-2}}{1 - 0.486315z^{-1} + 0.53863z^{-2} - 0.406852z^{-3} + 0.810484z^{-4}}$$

Notez que le système présente un retard pur  $d$  de deux périodes d'échantillonnage qui s'additionne à celui associé au bloqueur.

*Remarque : l'identification du modèle de commande a été réalisée conformément à la méthodologie qui sera étudiée en 3<sup>ème</sup> année à partir d'un jeu de données entrée – sortie recueilli sur le procédé (méthode d'optimisation au sens des moindres carrés)*

## COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE

### 1 / Ouvrir Simart

- 1 / tools      record                      reference sequence, input, output
- 2 / tools      preferences                      Log X, Log Y, Grid on
- 3/ Control      Adaptive control
- 4/ Entrer le plant model en discret
- 5 / Tools      transfer                      transférer le plant model dans le control model
- 6/ control      adaptive control                      GPC
- 7/ vérifier que le control model est bien identique au plant model
- 8/ Afficher les pôles et zéros du control modèle  
(*Analysis / Poles et zéros / control model*)

### 2 / Poursuite parfaite

**La poursuite parfaite peut théoriquement être réalisée à partir d'une commande prédictive à un pas dans le cas où la pondération de commande  $\lambda$  est nulle. Il s'agit alors d'une « commande à variance minimale ».**

- 1/ GPC design
  - hc = 1
  - Choisir hi et hp pour effectuer une commande prédictive à un pas
  - Précompensateur      unitary feedback
  - Observer      build 5 racines en 0.2 (choix de  $C(z^{-1})$ )
  - Control weighting       $\lambda = 10^{-8}$  (zéro machine)
- 2 / reference
  - Carré de période 10s, amplitude 1
  - Numerator et denominator : build 2 racines en 0.8 ( choix du modèle de poursuite)
- 3/ Simulation      close
- 4 / afficher la sortie du système : conclusion
- 5 / Observer la position des pôles et zéros du système de commande. Qu'en déduisez vous quand à la stabilité d'une commande à variance minimale ?
- 6/ Refaire une simulation en régulation
  - Amplitude du signal de reference : 0
  - Output disturbance de type echelon (periode 10, amplitude 0.2)
- 7/ conclure

### 3 / Robustesse maximale

**Reprendre le travail précédent avec hp = 30**

1 / Choisir les horizons  $h_c = 1$ ,  $h_i = d+1$

2/ mettre 5 racines en 0.5 pour l'observateur  
Lancer la simulation en régulation, puis Stock Output

3/ Afficher les pôles et zéros de la boucle fermée. Quels sont les pôles dominants en boucle fermée ?

4/ Afficher le diagramme de Bode des fonctions de sensibilité

5/ mettre 5 racines de l'observateur en 0.8, lancer la simulation en régulation, puis stock output

6/ Afficher les pôles et zéros de la boucle fermée. Quels sont les pôles dominants en boucle fermée ?

7/ Afficher le diagramme de Bode des fonctions de sensibilité

8/ mettre 5 racines de l'observateur en 0.2, lancer la simulation en régulation

9/ Afficher le diagramme de Bode des fonctions de sensibilité et observer maintenant l'influence des pôles de l'observateur  $C(z^{-1})$ .

10 / Tools display output, output1, output2 :

- observer l'influence de  $C(z^{-1})$  sur la dynamique de régulation
- constater l'apparition d'oscillations dans certains cas. Pourquoi ? conclure quand à l'influence de la dynamique de  $C(z^{-1})$  sur la dynamique de régulation

#### 4 / Compromis rapidité/ robustesse

On prendra pour  $C(z^{-1})$  les pôles de  $A(z^{-1}) D(z^{-1})$  en les accélérant légèrement et en les amortissant soit par exemple 0.5, 0.6+0.2i, 0.6-0.2i, 0.4+0.1i, 0.4-0.1i.

1/ comparer en poursuite les résultats obtenus avec  $h_p = 5, 10, 30$

2 / même chose en régulation

3/ confirmer les résultats obtenus en observant la position des pôles et zéros de chaque boucle fermée

4/ quel est le réglage qui permet au mieux de rigidifier le système ?

5/ Afficher les fonctions de sensibilités de chaque boucle fermée

- Quel est le système qui présente la dynamique de régulation la plus rapide ?
- Ce réglage est – il satisfaisant du point de vue des marges de robustesse ?



6 / Afficher les lieux de Nyquist des différentes boucles. Conclure quand à la robustesse relative des 3 systèmes.

7/ Conserver maintenant le réglage  $h_p = 5$

Afficher les fonctions de sensibilités pour  $\lambda = 10^{-8}$  et  $\lambda = 5$ . Quel est le meilleur choix pour le paramètre  $\lambda$  ?

TP n°5  
Implémentation d'une loi de commande R-S-T sous Labwindows / CVI

L'objectif du TP est l'implémentation d'une loi de commande de type  $Rd(z^{-1}) - Rn(z^{-1}) - Rp(z^{-1})$  avec anti windup sous l'environnement Labwindows / CVI. On demande de réaliser le travail suivant :

1 – Considérons le système de premier ordre du coffret analogique. Sa fonction de transfert est définie par

$$G(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{1.45}{2.3p + 1}$$

Pour ce système, nous avons réalisé un asservissement numérique, à la période d'échantillonnage  $T_e = 0.1s$  qui a conduit aux paramètres suivants

$$Rd(z^{-1}) = [1.0000 \quad -1.6425 \quad 0.9373 \quad -0.2948]$$

$$Rp(z^{-1}) = Rn(z^{-1}) = [0 \quad 0 \quad 2.0464 \quad -1.85192]$$

Le programme `tp_1er_ordre.m` permet de réaliser la synthèse de cet asservissement sous Matlab et affiche les diagrammes de Bode des différentes fonctions de sensibilité. Le fichier de simulation `commande_1er_ordre.simul` permet de tester l'asservissement en simulation en poursuite et régulation.

*Exécutez le programme `tp_1er_ordre.m` de manière à générer tous les polynômes nécessaires. Ce programme détermine en particulier le polynôme caractéristique de la boucle fermée  $Pc(z^{-1})$*

*Exécutez le programme Simulink de manière à simuler la boucle d'asservissement.*

*Ecrire un programme CVI de manière à implémenter l'asservissement d'une loi de commande linéaire avec structure anti windup (voir TPI). Les polynômes  $Rd(z^{-1})$ ,  $Rd(z^{-1})$  et  $Rd(z^{-1})$  seront définis comme des tableaux en variables globales et leur valeurs seront déjà définies au moment de leur déclaration. En revanche, les équations de récurrence permettant de programmer le régulateur seront réalisées indépendamment des valeurs numériques des polynômes.*

2 – Tester votre asservissement en poursuite sur le système du premier ordre et comparez les performances nominales aux performances réelles dans le cas d'une réponse indicielle d'amplitude unitaire.

3 – La commande avec Modèle de Référence sur l'Etat Partiel consiste à réaliser

$$R_p(z^{-1}) = \frac{P_c(z^{-1})B(1)}{B(z^{-1})P_c(1)}$$

3.1 Expliquez **théoriquement** l'intérêt de réaliser cette modification sur l'asservissement.

3.2 Tester ce nouvel asservissement sous Matlab / Simulink. Vérifiez votre réponse du 4.1 en simulation

3.3 Réaliser l'asservissement sous Labwindows / CVI et comparer les performances par rapport à la simulation.

4- Envoyer maintenant une consigne de 8V et observer la sortie du procédé ainsi que la commande. Vérifier que la structure anti windup réalise bien l'objectif qui a conduit à son implémentation.

## TP n°6

### *Asservissement de procédés pilotes*

L'équipe Automatique du GREYC dispose de plusieurs procédés caractéristiques de problèmes standard en Automatique (systèmes de type intégrateurs, oscillants ou présentant des retards). Durant ces TP, l'objectif est de résoudre un objectif de commande pour l'ensemble de ces systèmes en utilisant une approche de type « commande prédictive ». Chaque binôme travaillera sur un système à chaque séance. Chaque expérience fera l'objet d'un compte rendu motivant les choix réalisés, résumant la démarche adoptée et la mise en œuvre du système de commande. Vous commenterez les résultats obtenus, les comparerez au cahier des charges imposé et ferez preuve d'un esprit critique.

La synthèse de la loi de commande sera donc réalisée en utilisant l'approche prédictive que vous avez étudiée en cours et en TD. Vous utiliserez donc tous les résultats issus de ces cours pour réaliser votre asservissement. D'autre, part, deux systèmes permettent d'illustrer et d'utiliser la théorie de l'identification des systèmes LTI que vous étudierez en 3<sup>ème</sup> année.

Le travail de synthèse et de mise en œuvre sera réalisé sous SIMART. Une mise en œuvre définitive sous CVI sera réalisée.

#### **Rappel n°1 : Notion de Point de fonctionnement**

Les algorithmes usuels permettant d'identifier le comportement d'un système et de synthétiser une loi de commande sont linéaires. Les performances réalisées seront proches des performances nominales à condition que le modèle de commande linéaire représente correctement le comportement entrée-sortie du système à commander. Celui-ci présentant généralement des non - linéarités statiques (voir la caractéristique statique) ou dynamiques, un modèle linéaire du système ne sera valide que dans une zone de fonctionnement réduite centrée autour d'un point de polarisation appelé **Point de Fonctionnement**. Autour de ce point de fonctionnement, un modèle linéaire de comportement correspondant au linéarisé tangent doit reproduire le plus fidèlement possible le comportement du système. Bien entendu, le domaine de validité du modèle obtenu dépend de la nature des non – linéarités et de leur importance.

En simulation, les étapes de synthèse de la loi de commande et de simulation de l'asservissement sont toujours réalisées sur le modèle linéaire représentant le fonctionnement du système autour de ce Point de Fonctionnement. Celui – ci n'apparaît donc pas explicitement dans le schéma de Simulation. L'application de la loi de commande sur le procédé réel nécessite de polariser le système autour de ce Point de Fonctionnement.

## Rappel n°2 : Le système à commander

Pour commander un système à l'aide d'un ordinateur, il est nécessaire d'utiliser une carte d'acquisition permettant d'enregistrer la mesure délivrée par le capteur et d'une carte de commande qui permet l'envoi sur les actionneurs des tensions déterminées par l'algorithme de commande. Les applications que vous allez effectuer utilisent toutes une seule carte pour l'acquisition et la commande, carte qui permet l'envoi de signaux électriques (tensions) comprises entre 0 et 10V. D'autre part, la mesure de la sortie est délivrée par un capteur qui possède généralement des non-linéarités ainsi qu'un gain de conversion. Il en est de même pour l'actionneur. Le système à commander est constitué de l'ensemble suivant

### Carte de commande (CNA) / actionneur / système / capteur / carte d'acquisition (CAN)

Les modèles de chacun des systèmes qui sont donnés dans le texte représentent le comportement entrée-sortie du système à commander autour du point de fonctionnement choisi (celui-ci est spécifié pour chaque procédé). En conséquence, vous n'avez pas à vous préoccuper des éventuels gains de conversion pour la synthèse de la loi de commande, ils sont déjà inclus dans le modèle. En revanche, ces gains pourront être utiles afin de déterminer l'amplitude (en V) de la séquence de référence qui permet d'obtenir une sortie physique à une valeur précise (exprimée dans l'unité de la sortie réelle).

## 1 – Commande d'un système de transmission flexible.

Le système à commander est le système de transmission flexible étudié lors du TD de Commande Prédictive sous SIMART. Ce procédé est constitué de trois poulies reliées dans un plan horizontal par des deux jeux de ressorts. La première poulie est entraînée par un moteur à courant continu. Sa position angulaire est commandée par une boucle d'asservissement locale déjà implantée sur la maquette et assimilable à un simple gain. La troisième poulie est munie de charges pouvant prendre différentes valeurs. Le but du TP est de commander la position angulaire de la troisième poulie. La position de cette dernière est mesurée par un capteur. La grandeur de commande est la position de l'axe du moteur entraînant la première poulie. La période d'échantillonnage est fixée à 0.05s.

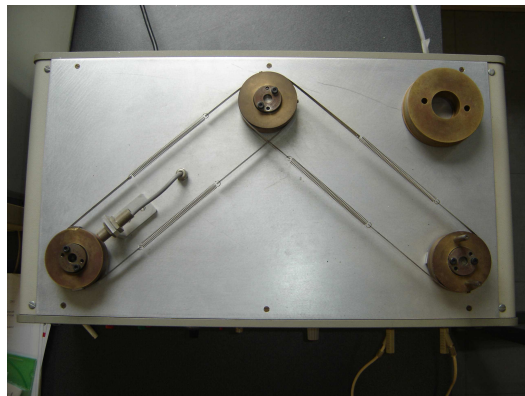


Figure 1 : système de transmission flexible

## Cahier des charges

1. Les signaux de références considérés sont des échelons d'amplitude unitaire. La variation de la position de la troisième poulie doit suivre la référence sans erreur statique significative, avec un temps de réponse de l'ordre de la seconde et un dépassement raisonnable.
2. Un signal de perturbation de type échelon de sortie doit être rejeté le plus rapidement possible.
3. Les variations des signaux de commande doivent être dans la gamme acceptable en l'occurrence [-5V 5V].
4. La loi de commande doit respecter les marges de robustesse usuelles.

La fonction de transfert échantillonnée / bloquée du système est donnée par

$$G(z^{-1}) = z^{-d-1} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = z^{-3} \frac{0.28239 + 0.833375z^{-1} + 0.30297z^{-2}}{1 - 0.486315z^{-1} + 0.53863z^{-2} - 0.406852z^{-3} + 0.810484z^{-4}}$$

## Travail à réaliser

- a. A l'aide du logiciel simart, effectuez une synthèse qui répond au mieux au cahier des charges
- 2 Testez les performances de votre système de commande en poursuite et en régulation sous Matlab Simulink à l'aide du fichier de simulation *simulation\_RST.mdl*
  - 3 Lorsque les performances nominales sont satisfaisantes, réalisez l'essai sur la maquette expérimentale. Pour cela, il faudra compléter le programme Labwindows / CI avec les paramètres de votre régulateur et réaliser l'essai temps – réel. Faire appel à l'enseignant pour cette partie.
  - 4 Pour testez la robustesse de votre système de commande par rapport aux erreurs de modélisation, réalisez un essai en chargeant la poulie n°3 avec les masselottes supplémentaires.

## b. – Commande d'un système « bille-rail ».

L'objectif consiste à asservir en position une bille glissant sur un rail en commandant la position angulaire de ce dernier. On dispose d'un modèle physique simple du procédé qui a été discrétisé à une période d'échantillonnage  $T_e = 0.1s$ . Le modèle obtenu est le suivant

$$G(z) = z^{-1} \frac{0.008619 + 0.008619z^{-1}}{1 - 2z^{-1} + z^{-2}}$$

Ce modèle relie la position angulaire du rail (en Volts) à la position de la bille sur le rail (mesurée en volts à l'aide du capteur résistif). Le rail est lui-même asservi en position par une boucle locale analogique de grande bande passante.

D'un point de vue automatique, il s'agit d'un système de type « double – intégrateur ». Le cahier des charges est le suivant

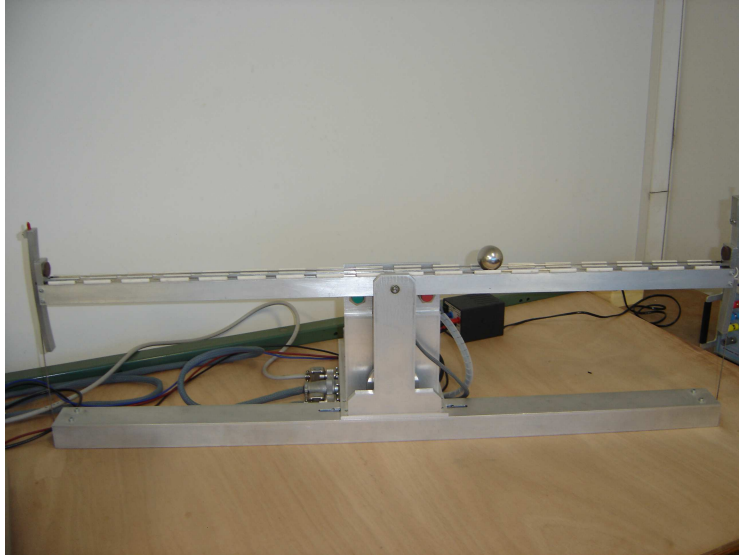


Figure 2 : système « bille-rail »

### **Cahier des charges**

1. Les signaux de références considérés sont des échelons filtrés d'amplitude 2V. La variation de la position de la bille doit suivre la référence sans erreur statique significative avec un dépassement raisonnable. Vous fixerez vous-même la dynamique de poursuite à partir des autres spécifications du cahier des charges
2. Un signal de perturbation de type échelon de sortie doit être rejeté en quelques secondes (5 à 6s)
3. Un signal de perturbation de type échelon d'entrée doit être rejeté en quelques secondes (7 à 8s)
4. Les variations des signaux de commande doivent être dans la gamme acceptable en l'occurrence [-5V 5V] et éviter la saturation
5. La loi de commande doit respecter les marges de robustesse usuelles

### **Travail à réaliser**

a. A l'aide du logiciel Simart, effectuez une synthèse qui répond au mieux au cahier des charges

2 Testez les performances de votre système de commande en poursuite et en régulation sous Matlab Simulink à l'aide du fichier de simulation *simulation\_RST.mdl*

Lorsque les performances nominales sont satisfaisantes, réalisez l'essai sur la maquette expérimentale. Pour cela, il faudra compléter le programme Labwindows / CI avec les paramètres de votre régulateur et réaliser l'essai temps – réel. Faire appel à l'enseignant pour cette partie.

### 3– Commande d'un bras flexible.

Le problème de commande consiste à asservir en position l'extrémité d'un bras en commandant l'alimentation du moteur à courant continu qui pilote la position de la tourelle supportant le bras. Ce système représente à échelle réduite l'asservissement en position du canon d'un char. Il s'agit d'un système instable, présentant des jeux mécaniques importants et des flexibilités (le bras est fixé sur la tourelle par l'intermédiaire de deux ressorts).

On dispose d'un modèle simple du procédé et de son instrumentation donné par la fonction de transfert suivante

$$G(z) = z^{-1} \frac{0.0281 + 0.1278z^{-1} + 0.0513z^{-2} + 0.0013z^{-3}}{1 - 1.2254z^{-1} + 0.5711z^{-2} - 0.3507z^{-3} + 0.005z^{-4}}$$

Ce modèle a été obtenu avec une période d'échantillonnage  $T_e = 0.1s$  autour de la position centrale du bras, correspondant à un point de fonctionnement de 0V en entrée et en sortie. On demande de réaliser la synthèse d'un asservissement qui répond au cahier des charges suivant

1. *Les signaux de références considérés sont des échelons filtrés d'amplitude 1.5V. La variation de la position du bras doit suivre la référence sans erreur statique significative avec un dépassement raisonnable. Vous fixerez vous-même la dynamique de poursuite à partir des autres spécifications du cahier des charges*
2. *Un signal de perturbation de type échelon de sortie doit être rejeté en quelques secondes (2 à 3s)*
3. *Un signal de perturbation de type échelon d'entrée doit être rejeté*
4. *Les variations des signaux de commande doivent être dans la gamme acceptable en l'occurrence [-5V 5V] et d'amplitude la plus faible possible (commande de l'ordre du volt). Du fait de la présence de jeux mécaniques, la commande ne devra pas non plus être trop faible afin d'éviter la zone morte en commande.*
5. *La loi de commande doit respecter les marges de robustesse usuelles*

#### Travail à réaliser

- 1 A l'aide du logiciel Simart, effectuez une synthèse qui répond au mieux au cahier des charges
- 2 Testez les performances de votre système de commande en poursuite et en régulation sous Matlab Simulink à l'aide du fichier de simulation *simulation\_RST.mdl*
- 3 Lorsque les performances nominales sont satisfaisantes, réalisez l'essai sur la maquette expérimentale. Pour cela, il faudra compléter le programme Labwindows / CI avec les paramètres de votre régulateur et réaliser l'essai temps – réel. Faire appel à l'enseignant pour cette partie.