

# Commande d'un processus de suspension magnétique



La suspension magnétique Didastel

Réalisé par Lulu XI

Yuan WANG

Encadré par Aziz Nakrachi

## **Remerciement**

**Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimer nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.**

**Nous souhaitons tout d'abord remercier nos encadrants le professeur Aziz Nakrachi, qui nous ont encadrés avec patience durant la réalisation de ce projet de cette année. Ses conseils nous ont été bien utiles, notamment pour la rédaction de ce mémoire.**

**Nous exprimons également notre gratitude aux membres de la soutenance, qui nous ont honorés en acceptant de juger ce projet.**

**Enfin nous tenons à remercier l'ensemble du corps enseignant d'Informatique, Microélectronique, Automatique.**

# Sommaire

I.	Introduction	
	Objectifs .....	1
	Description du système .....	1
II.	Modélisation	
	Partie électrique .....	2
	Partie mécanique .....	3
	Capteur de position .....	3
	Fonction de transfert globale .....	3
III.	Analyse du système	
	Analyse .....	4
IV.	Correcteur par avance de phase	
	Etude d'un correcteur à avance de phase .....	4
	Résultat de simulation .....	6
V.	Real-time Windows target	
	Fonctionnement .....	6
VI.	Retour d'état par placement de pôles	
	L'espace d'état .....	8
	Réalisation sur Matlab .....	9
	Résultat de simulation .....	10
VII.	Observateur	
	Analyse théorique .....	11
	Réalisation sur Matlab .....	12
	Résultat de la simulation pour l'état X et la sortie Y .....	12
VIII.	Logique floue	
	Choix des Fonctions d'appartenances .....	13
	Règles du correcteur .....	14
	Résultat de simulation .....	15
IX.	Conclusion	
	Bilan .....	16
	Perspectives.....	16
X.	Annexe	

# I. Introduction

## 1. Objectifs

Le but de notre projet est de consister à chercher différentes méthodes pour contrôler et stabiliser un système de suspension magnétique, un système de 3<sup>ème</sup> ordre.

Ce rapport sera divisé en trois parties distinctes. En première partie, une présentation du projet, incluant la description et la modélisation du système qu'on étudie. Le système étudié ici est de faible puissance, la stabilisation du système est un problème principal à résoudre. Par la suite prendra place le corps du rapport. Les aspects techniques et éléments de conception relatifs au projet y seront présentés. Cette partie présentera les différentes méthodes de contrôler le système surtout le stabiliser qui sont l'objectif principale. Il est donc question de mettre en œuvre une commande du système de suspension magnétique DIDASTEL à l'aide du logiciel Simulink et de Real Time Windows Target. De même, la programmation et la simulation et la mise en plan seront présentées en détail. Ensuite, un bilan des activités suivra afin de présenter les connaissances acquises ou utilisées pendant le projet. Un bref coup d'œil sur l'échéancier sera fait, suivi d'une analyse du déroulement du projet. Finalement, pour clôturer le rapport, une conclusion en regard des objectifs sera faite et certaines recommandations pour des travaux futurs seront proposées.

## 2. Description du système

La suspension magnétique est une technologie avec laquelle l'objet est suspendu par la force électromagnétique. Elle est utilisée dans plusieurs domaines par exemple un système de train magnétique (à Shanghai, Chine). La suspension magnétique constitue un système instable en boucle ouverte en effet chacun sait qu'un objet face à un électroaimant est soit attiré complètement soit tombe irrémédiablement et qu'il n'est pas naturel de maintenir l'objet sans contact.

Ce système est divisé en 3 parties. Pour la partie électro-aimant, on injecte d'abord une tension qui va sûrement créer un courant électrique, le champ magnétique ainsi créé provoque une force qui soutient le ballon dans la position désirée.

Deuxièmement, le capteur de position peut mesurer la position du corps sans contact, et ici dans le projet, c'est un capteur optique.

Et la dernière partie, nous disposons également d'une boîte de contrôle, avec un PID intégré. Elle est connectée à l'ordinateur par une carte PCI-6221.

## II. Modélisation

### 1. Partie électrique

Pour simplifier le système, nous allons modéliser cette partie par une inductance  $L$  en série avec une résistance. Alors on peut obtenir l'équation temporelle de la partie électrique :

$$K_1 \cdot U = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt}$$

En utilisant la transformée de Laplace, nous l'écrivons sous la forme :

$$G_1 = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{K_1}{1 + \tau_e \cdot p}$$

Avec  $K_1 \approx 0.24 \text{ A/V}$  et  $\tau_e = L / R \approx 1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$

## 2. Partie mécanique

La force magnétique  $F$  est engendrée par le courant  $I$  qui parcourt la bobine et dépend aussi de la position  $X$ .

$$m \cdot \frac{d^2 X}{dt^2} = m \cdot g - F(X, I)$$

$$F(X, I) = a \cdot I(t) + b \cdot X(t)$$

Ici la masse du ballon est faible, la gravité  $mg$  est donc négligeable devant l'accélération.

$$a \cdot I(t) + b \cdot X(t) = -m \cdot \frac{d^2 X}{dt^2}$$

En posant  $\tau_m^2 = m / b$  et  $K_2 = -a / b$  on obtient donc

$$G_2 = \frac{X(p)}{I(p)} = \frac{K_2}{1 - \tau_m^2 \cdot p^2}$$

Avec  $K_2 \approx -25,8$  et  $\tau_m \approx 0,05$  ms

## 3. Capteur de position

La position du ballon varie entre -40mm et 0mm. Et le signal obtenu varie entre -10V et 0V. La fonction de transfert s'écrit :

$$G_3 = \frac{U(p)}{X(p)} = K_3$$

Avec  $K_3 = 0.25$  V/mm

## 4. Fonction de transfert globale

$$G = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = \frac{-K}{(1 + \tau_e \cdot p) \cdot (1 - \tau_m^2 \cdot p^2)}$$

Avec  $K \approx 1.55$ ,  $\tau_m \approx 0.05$  ms et  $\tau_e \approx 10^{-3}$  ms

### III. Analyse du système

#### 1. Analyse

La fonction de transfert globale montre clairement que le système possède 3 pôles

$$p_1 = \frac{-1}{\tau_e}, p_2 = \frac{-1}{\tau_m}, p_3 = \frac{1}{\tau_m}$$

Parce qu'il existe un pôle  $p_3$  qui est positif, donc ce système est instable.

Pour bien étudier ce système plus précisément, nous avons créé ce système et vu le diagramme de Nyquist en Boucle Ouverte, la courbe est autour du point critique (-1), selon le critère de revers, nous avons sû que notre système est instable, et à partir du diagramme de Nyquist, nous plaçons jusqu'à ce point à gauche du lieu. Pour stabiliser notre système, nous allons choisir le correcteur à avance de phase.

A cette étude on ajoute celle du BODE, on a vu que  $H(j\omega_0) = 0$  dB où la phase est de  $-189^\circ$ . Selon le critère, nous désirons une phase supérieure à  $-180^\circ$  à ce point, donc suivant nous allons introduire un correcteur à avance de phase pour stabiliser ce système.

### IV. Correcteur par avance de phase

#### 1. Etude d'un correcteur à avance de phase

Considérons un système dont fonction de transfert en boucle ouverte est  $H(j\omega)$ . En boucle fermée le système aura pour fonction de transfert :

$$C(j\omega) = \frac{H(j\omega)}{1 + H(j\omega)}$$

Pour la bille sur le rail, la fonction de transfert est :  $H(j\omega) = KO / (j\omega)^2$

Dans une première approche simplifiée de la stabilité, on considère que la limite de

la stabilité pour ce type de système en boucle fermée, est atteint quand le dénominateur devient nul :  $1+H(j\omega)=0$  soit encore :  $H(j\omega)=-1=1 \cdot \exp(-j\pi)$ .

Quand le système laisse le point critique (-180°, 0dB), le système devient localement stable.

Donc nous avons obtenu une nouvelle forme de ce correcteur :

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

Ici on sait  $\alpha < 1$

Et après on détermine les coefficients  $\alpha, \tau$  correcteur

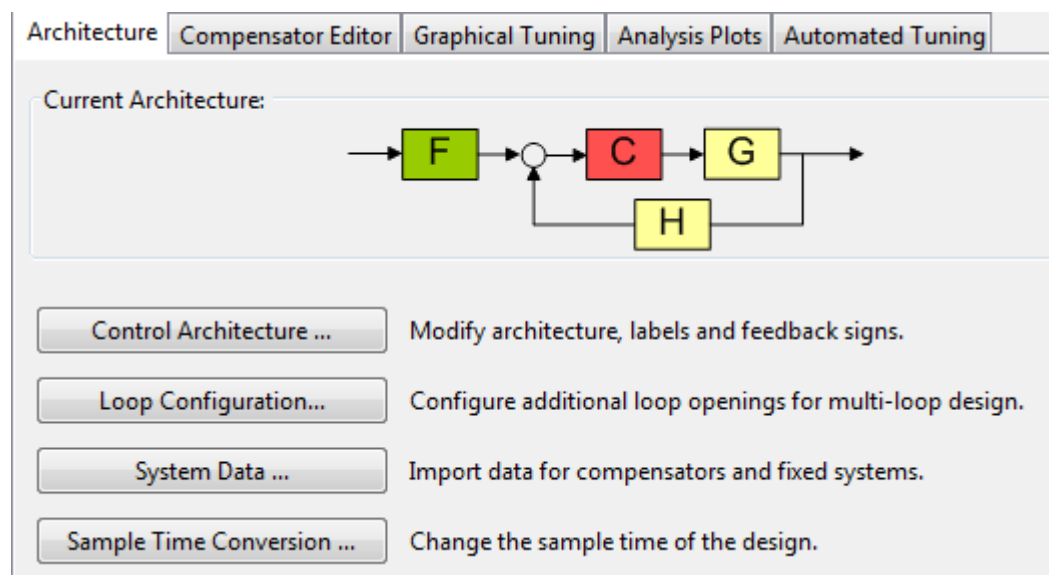
$$\Delta\varphi = \text{Acrsin}\left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha}\right) \text{ soit finalement } \alpha = \frac{1-\sin(\Delta\varphi)}{1+\sin(\Delta\varphi)}$$

On choisit  $\tau$  pour que la zone de pulsation concernée par l'avance de phase maximale se situe autour du point critique.

$$\text{On a alors } \omega = \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{\alpha}} \text{ donc } \tau = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{\alpha}}$$

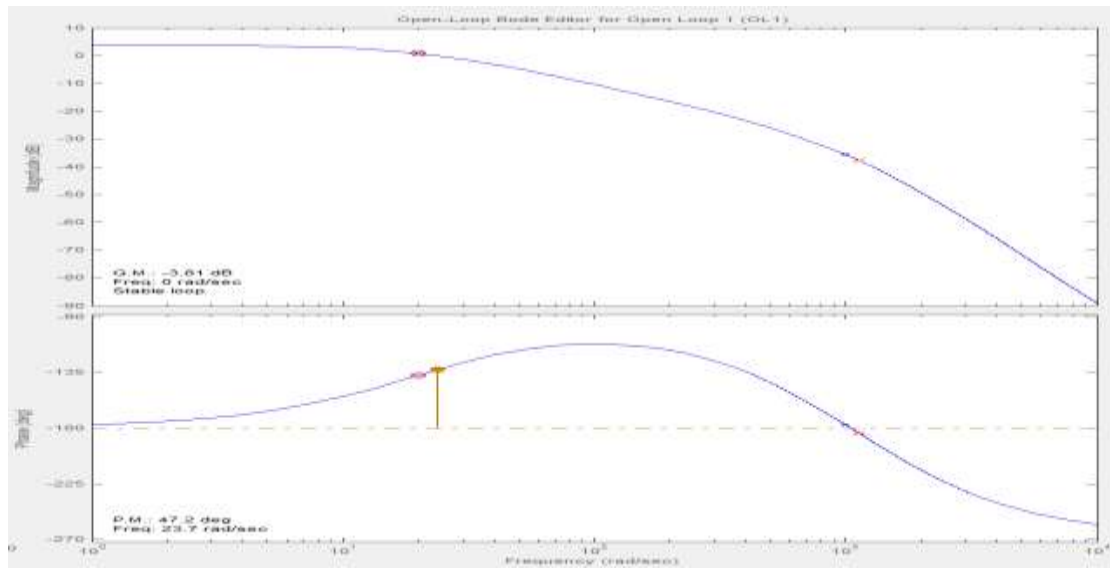
Ici on a mis le gain  $K=1$

Dans la partie précédente SISO, on va ajouter le correcteur





## 2. résultat de simulation



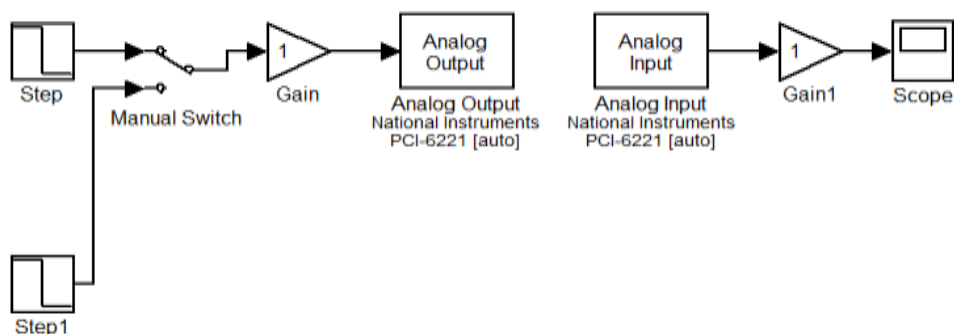
Dans le diagramme BODE, quand  $H(j\omega)=0\text{dB}$ , la phase est supérieur à  $-180^\circ$ , et ce système est stable.

## V. **Real-time Windows Target**

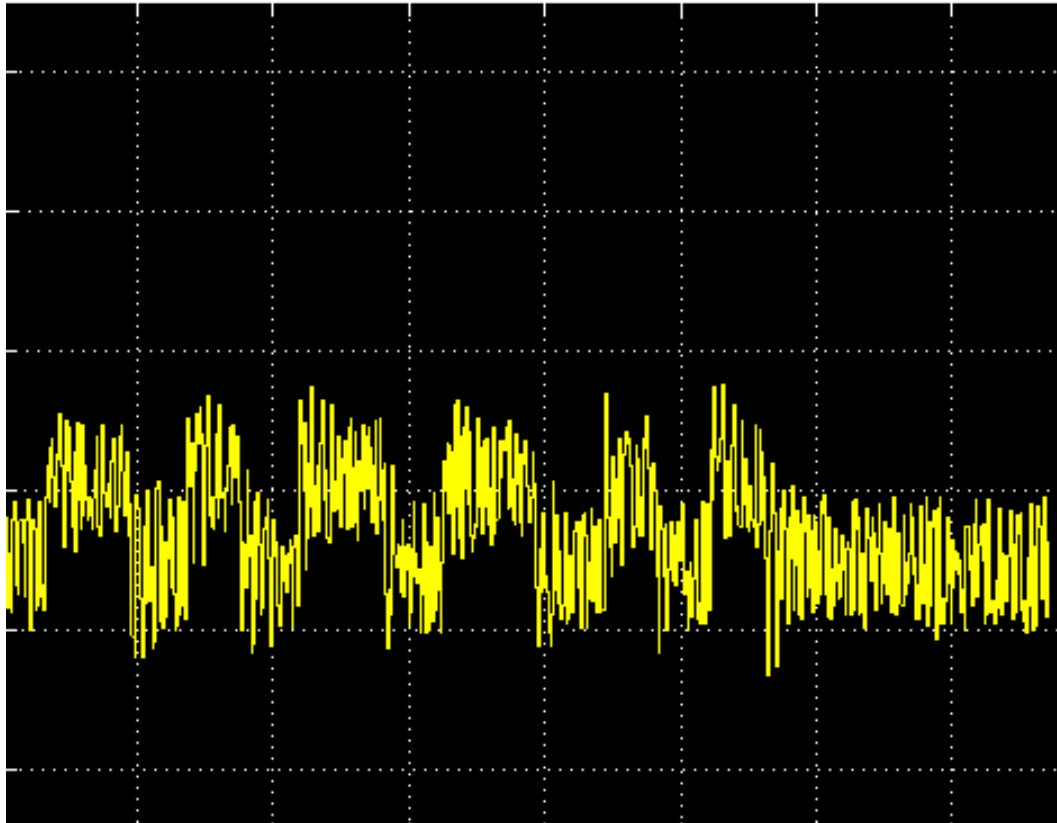
### 1. Fonctionnement

A l'aide du bloc analog output et analog input, nous pouvons lier le système appliquer ordinateur par la carte PCI-6221

Un configuration de real-time windows target est nécessaire. Maintenant nous pouvons appliquer ce correcteur sur le système de la suspension magnétique et voir son fonctionnement de la commande



En gardant un temps d'échantillonnage de 0.01, on peut voir que il existe trop de oscillations quand on change la consigne de entre -6v à -7v.



## VI. Retour d'état par placement de pôles

Le principe est de déterminer une commande telle que les pôles du système de la fonction de transfert du système bouclé soient convenablement placés dans le plan complexe et satisfassent des spécifications d'amortissement et de rapidité. On cherche à annuler leur partie imaginaire qui induit des oscillation et à augmenter leur partie réelle pour que le système soit rapide. Le but est donc de réaliser un asservissement modifiant convenablement la matrice d'état du système.

## 1. L'espace d'état

Dans cette étude on envisage la réalisation d'une commande par retour d'état. Pour la suite étudier cette représentation.

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t)$$

$$Y(t) = C \cdot X(t)$$

La réalisation d'une nouvelle commande de la forme

$$U(t) = l \cdot y_c - k \cdot X$$

Donc

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot (l \cdot y_c - k \cdot X)$$

$$= (A - B \cdot k) \cdot X(t) + B \cdot l \cdot y_c$$

$$Y(t) = C \cdot X(t)$$

K est la matrice dont le rôle est de déplacer les pôles à A-Bk. Cette matrice doit avoir des valeurs propres à partie réelle négative

On pose que  $X_1$  : la position du ballon

$X_2$  : la vitesse du ballon

$X_3$  : le courant dans la bobine

Les états  $\dot{X}_1 = X_2$

$$\dot{X}_2 = \frac{X_1}{\tau_m^2} + K_2 \cdot \frac{X_3}{\tau_m^2}$$

$$\dot{X}_3 = -\frac{X_3}{\tau_e} + K_1 \cdot \frac{U}{\tau_e}$$

La sortie  $Y = K_3 \cdot X_1$

Finalement les matrices d'état sont suivantes :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{\tau_m^2} & 0 & \frac{K_2}{\tau_m^2} \\ K_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

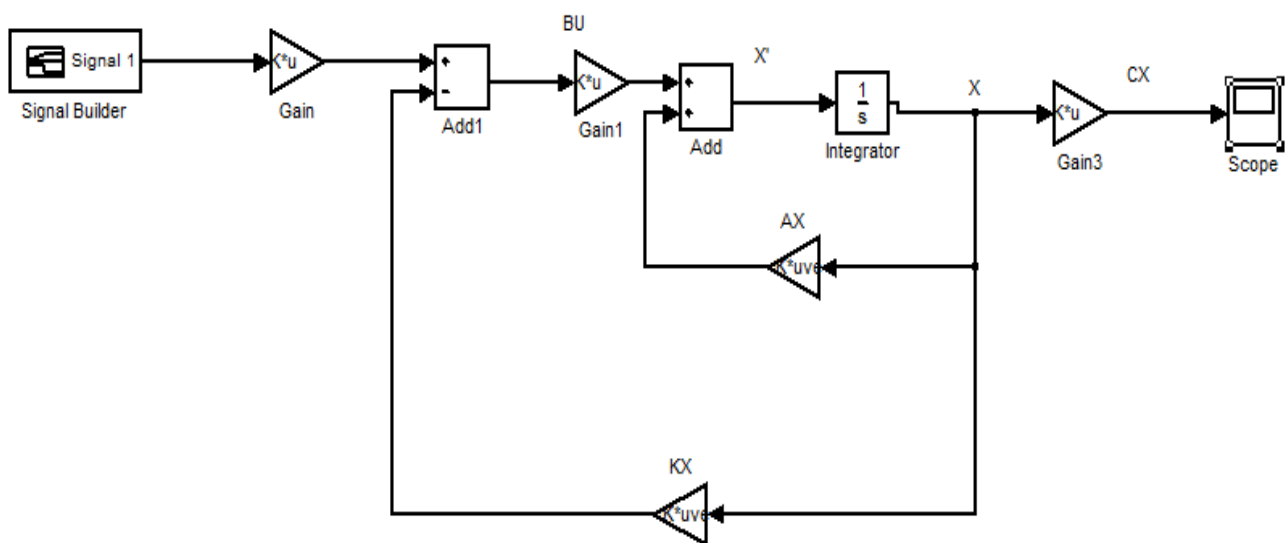
$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_1}{\tau_e} \end{bmatrix}$$

$$C = [K_3 \quad 0 \quad 0]$$

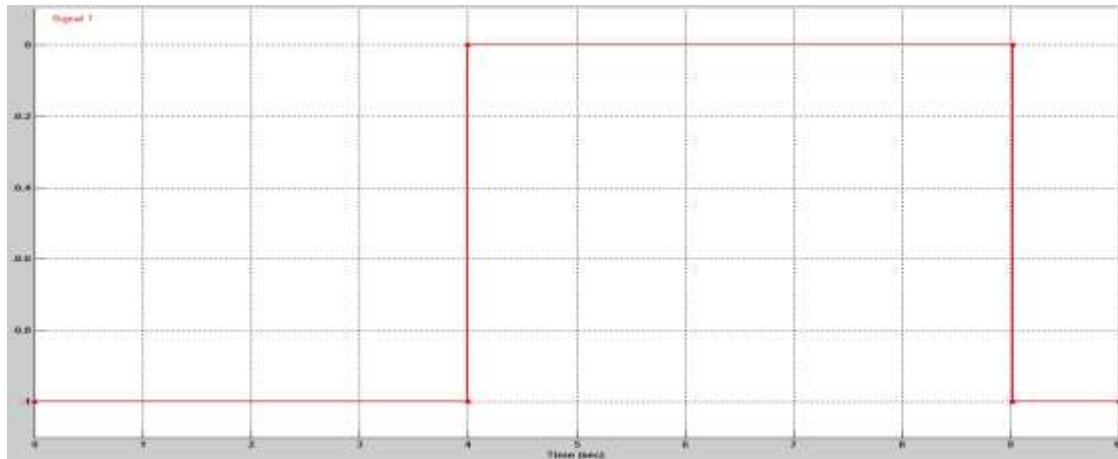
## 2. Réalisation sur Matlab

Ce système doit être stable si et seulement si les pôles tous ont une partie réelle négatives, et dans notre système il a déjà existé un pôle  $p_1 = -\frac{1}{\tau_e}$  donc nous allons déplacer les deux autres pôles.

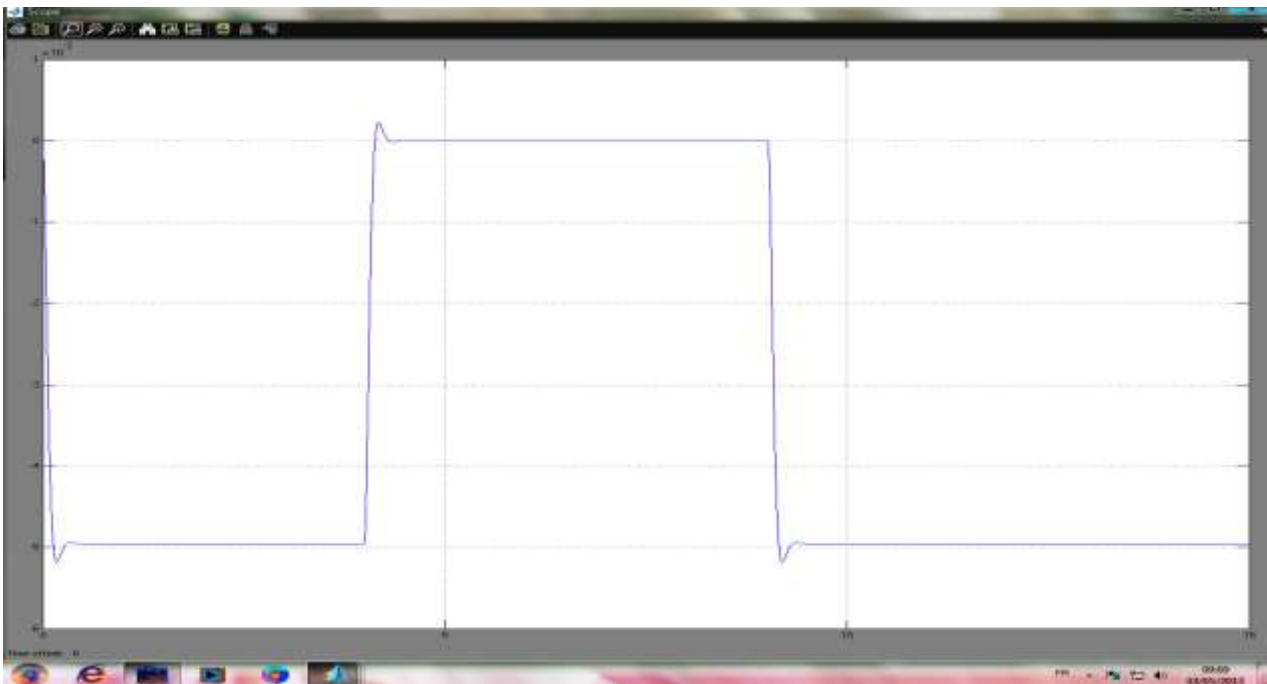
Nous avons pris  $\omega_0 = 25 \text{ rad/s}$  et  $\xi = 0,7$  pour continuer de faire la simulation parce que c'est un bon compromis entre vitesse et dépassement. Ci-dessus c'est le schéma bloc sous matlab :



Pour changer la valeur du consigne automatiquement et bien visualiser ce résultat, nous avons choisit un « signal builder »



### 3. Résultat de simulation



Nous pouvons voir que cette méthode est plus efficace, ce système est stable et aussi il exist un dépassement, le consigne est de -1v à 0v, pour bien visualiser, nous l'avons grandi 5 fois

## VII. Observateur

L'observateur est pour déterminer des grandeurs qui ne peuvent pas être mesurées directement. On cherche ici à déterminer les grandeurs d'état non mesurable, à savoir la vitesse du ballon et le courant dans la bobine. C'est une réplique du système à laquelle est ajoutée une commande proportionnelle qui a le gain  $L$  à l'écart entre le signal de sortie réel et le signal de sortie reconstruit. Le rapport  $Y/U$  et  $Y'/U'$  sont égaux en régime permanent. Parmi les différents type d'observateurs, nous avons choisit un observateur complet et relativement simple à adapter.

### 1. Analyse théorique

Structure d'observateur :

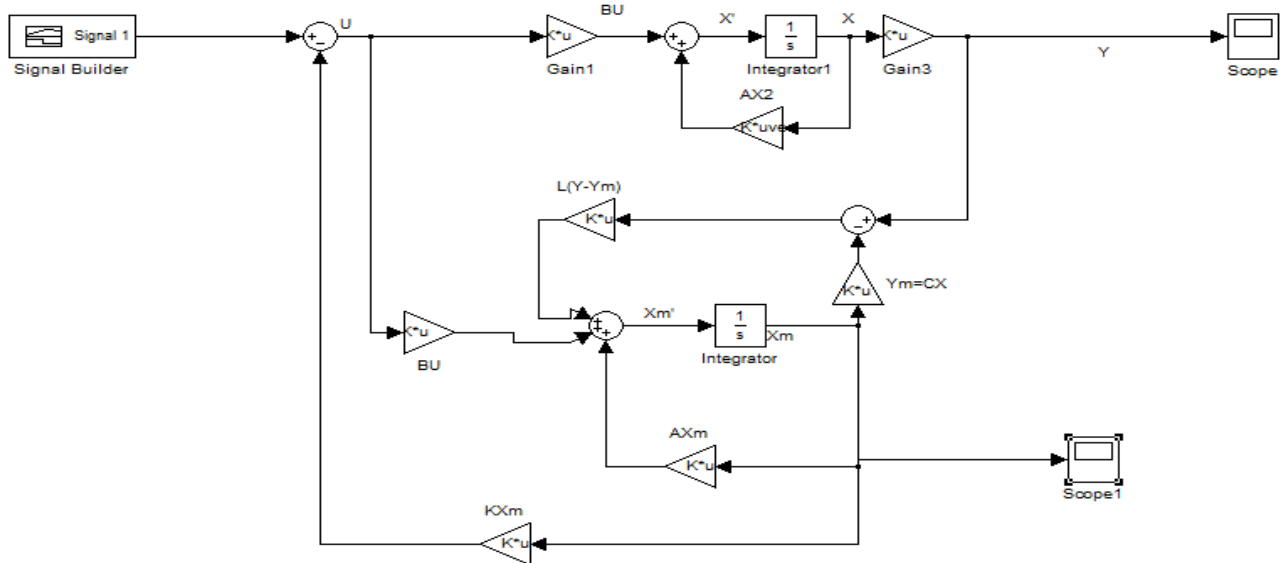
$$\begin{cases} \hat{X}(t) = A \cdot \hat{X}(t) + B \cdot U(t) + L \cdot [Y(t) - C \cdot \hat{X}(t)] & (10) \\ \hat{Y}(t) = C \cdot \hat{X}(t) & (2) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \hat{X}(t) = (A - L \cdot C) \cdot \hat{X}(t) + B \cdot U(t) + L \cdot Y(t) & (11) \\ \hat{Y}(t) = C \cdot \hat{X}(t) & (2) \end{cases}$$

$L$  est le gain d'observateur qui permet de converger  $Y$  vers sa valeur estimée  $\hat{Y}$  et l'erreur sur l'état converge vers à 0, soit  $\hat{X}(t) - X(t)$  vers à 0, pour réaliser l'observateur, nous devons stabiliser notre système par retour d'état premièrement parce que ce système n'est pas stable.

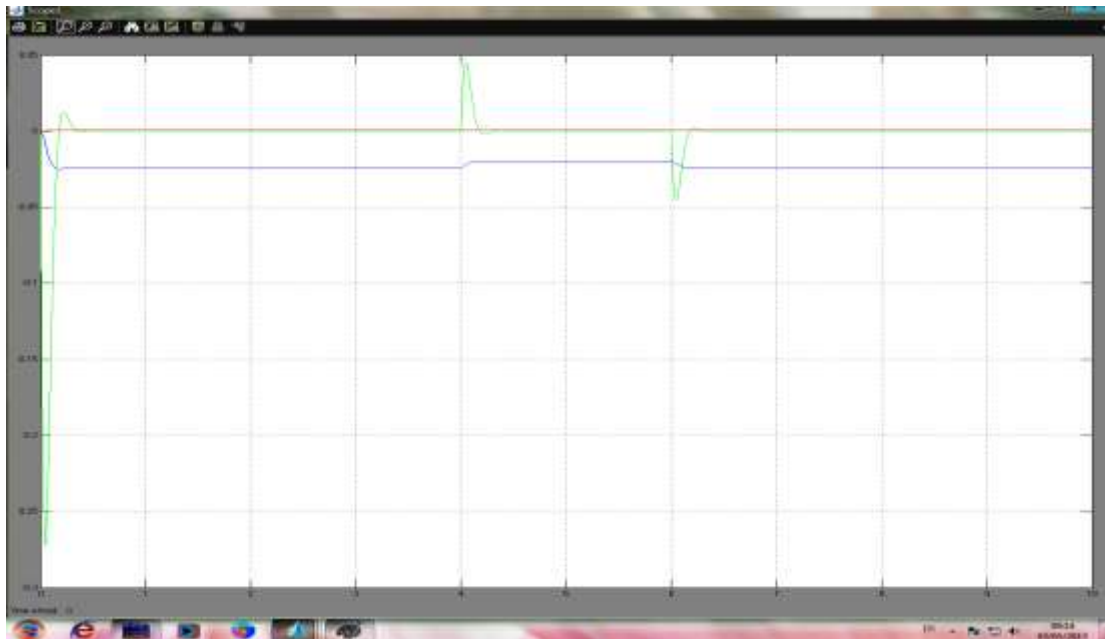
Les valeurs propres de la matrice  $A-LC$  sont suffisamment  $< 0$  pour avoir un amortissement rapide du régime transitoire mais pas trop de façon à éviter que l'observateur n'ait pas tendance à suivre l'évolution des bruits de mesure.

## 2. Réalisation sur Matlab :



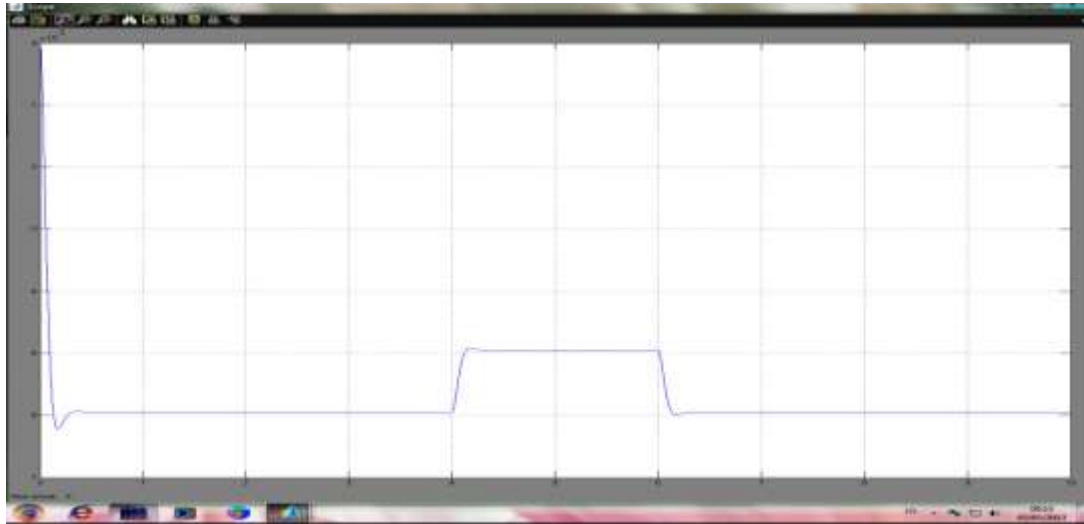
## 3. Résultat de la simulation pour l'état X et la sortie Y

La courbe de X( X1 X2 X3)



On voit ici en bleu la vitesse du ballon et en marron le courant dans la bobine, et donc nous avons déterminé les grandeurs que nous ne pouvons pas mesurer directement.

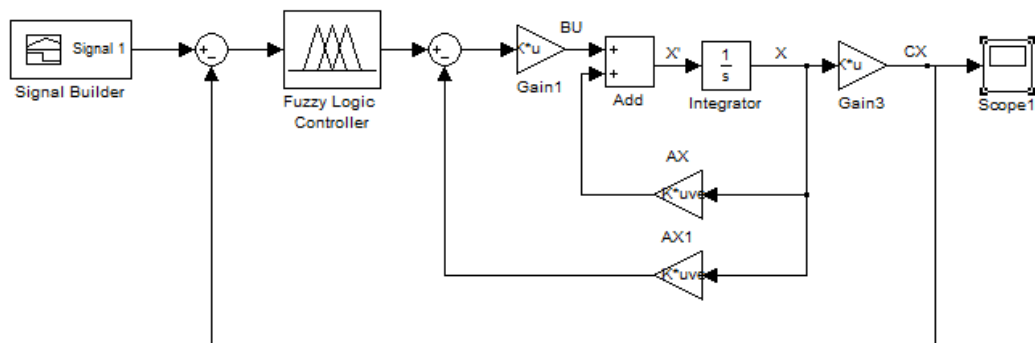
La courbe de Y



Le système réagit très rapidement mais un dépassement significatif à lieu. Il reste bien stable.

## VIII. Logique floue

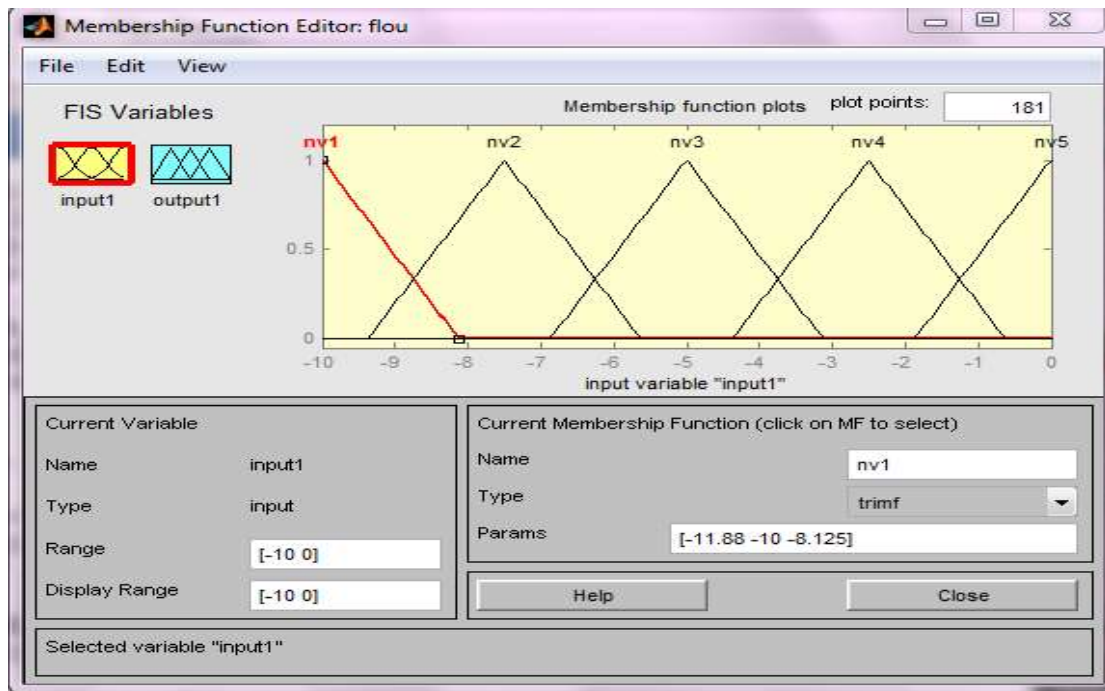
Pour comparer avec les deux correcteur précédent nous avons mise en oeuvre , mais avant utiliser ce correcteur, nous devons stabiliser ce système par retour d'état et après on ajoute ce correcteur



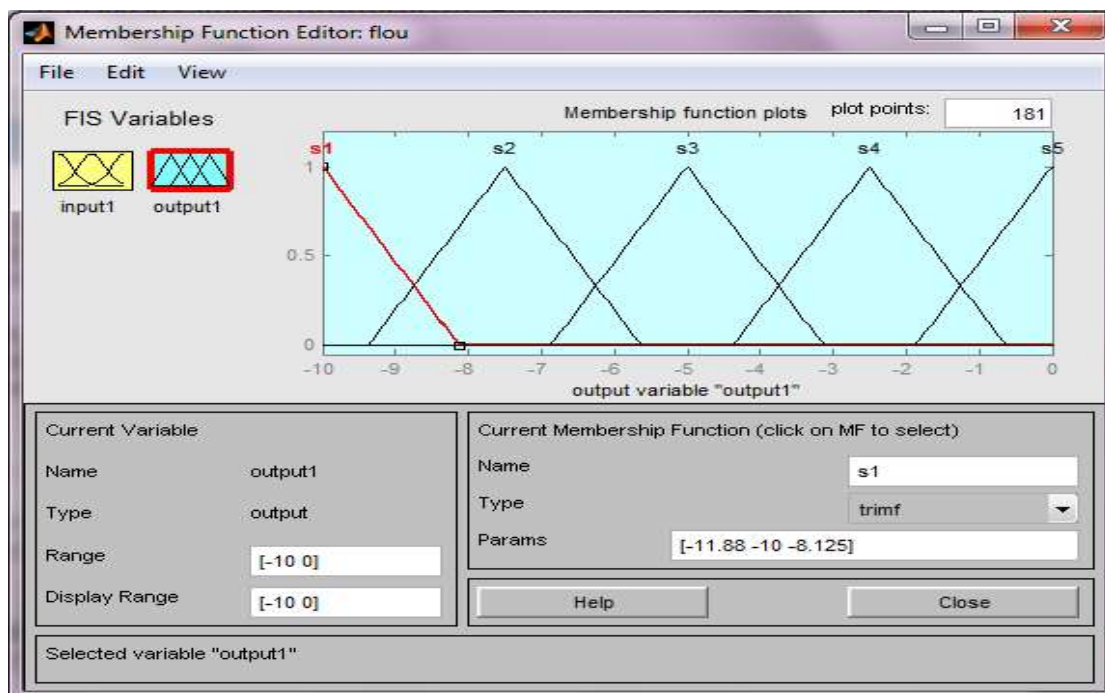
### 1. Choix des Fonctions d'appartenances

Pour ce correcteur nous devons définir les entrées et les sorties





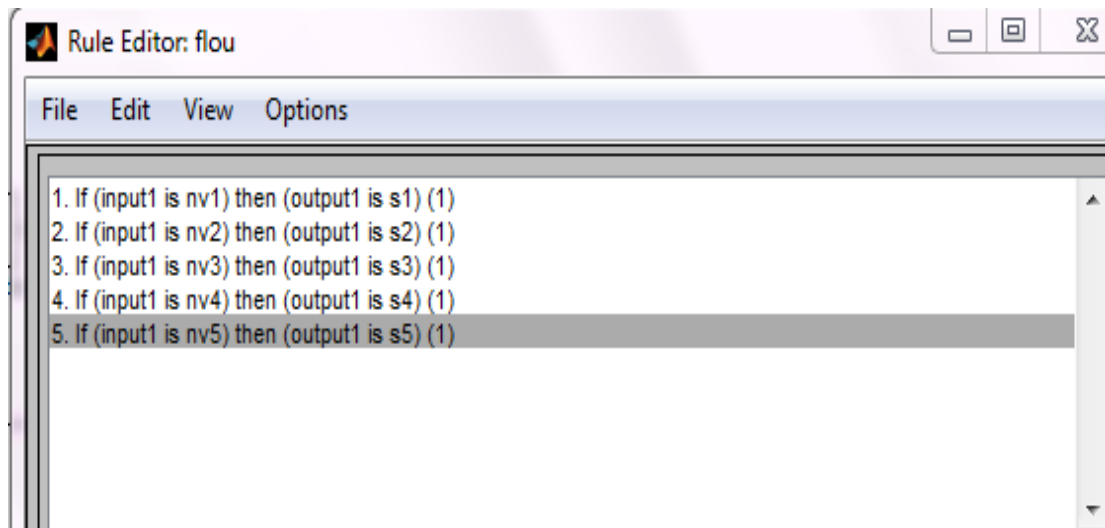
(courbe d'entrée)



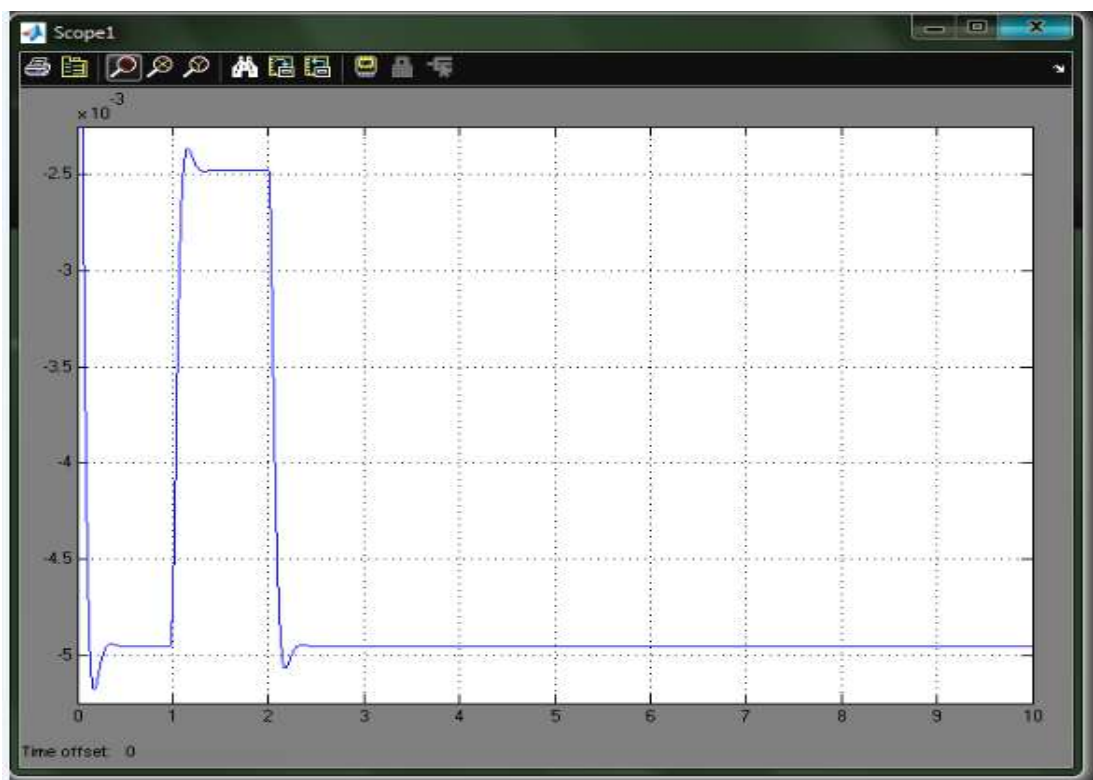
(courbe d sortie)

## 2. Règles du correcteur

Et puis nous allons définir les conditions qui réalise les connection entre les entrées et les sorties, si nv1 et donc s1, etc



### 3. Résultat de simulation



Nous avons obtenu un bon résultat par la logique flou, il exist un dépassement mais il reste stable en régime permanent

## **IX. Conclusion**

### **1. Bilan**

Les objectifs du projet ont été atteints. Ceux-ci étaient de faire l'étude détaillée ainsi qu'un script nécessaire à l'opération du système de contrôle. Nous avons bien étudié les différents types de correcteur, Le correcteur à avance de phase, le placement de pôles, le correcteur flou. A partir de les différentes caractéristiques des 3 correcteurs, nous avons bien connu les inconvénients et les avantages de chaque correcteur.

Le correcteur à avance de phase c'est simple à construire mais les calculs de chaque paramètre sont le plus compliqués.

Le placement de pôles par retour d'état et observateur est le plus difficile de créer sa construction mais il fonctionne très bien et à l'aide du observateur, nous pouvons déterminer les grandeurs d'états non mesurable, la vitesse du ballon et le courant dans la bobine. A cause de notre système qui est non linéaire, nous devons tester chaque fois quand nous transposons le schéma sur le système réel.

Le correcteur flou fonctionne moins bien que le correcteur précédent mais c'est le plus simple à réaliser sur Matlab, parce que il est seulement un bloc, mais c'est difficile de choisir les bonnes fonctions d'appartenances

### **2. Perspectives**

La suspension magnétique est un système dynamique non-linéaire avec certains coefficients variables qui influence la position du ballon. Ici nous l'avons étudié dans une condition limite.

Pour le contrôler précisément, nous pouvons appliquer le Fuzzy Control et ajuster les coefficients aux différentes situations.

## X. Annexes

```
%Modélisation du système

k = 1.55;

tm = 0.05;

te = 0.001;

syssele = tf(1,[te 1]);

sysmec = tf(-k,[-tm^2 0 1]);

sys=syssele*sysmec;

%Correcteur par avance de phase

alpha = 0.0176; tau=0.05;

avphase=tf([tau 1],[tau*alpha 1]);

%temp d'échantillonnage

Te=0.01;

%espace d'état

A=[0 1 0;

   1/(tm^2) 0 25.8/(tm^2);

   0 0 -1/te];

B=[0;0;0.24];

C=[0.25 0 0];

%placement du pole

eig(A);

w0=25;
```

```

z=0.7;
p1=-z*w0+w0*sqrt(z*z-1);
p2=-z*w0-w0*sqrt(z*z-1);
p=[p1 p2 -1000];
K=place(A,B,p);
l=-1/(C*inv(A-B*K)*B);

```

```
%observateur
```

```

L1=[-20.2 -20 -1009];
L2=acker(A',C',L1);
L=L2';

```

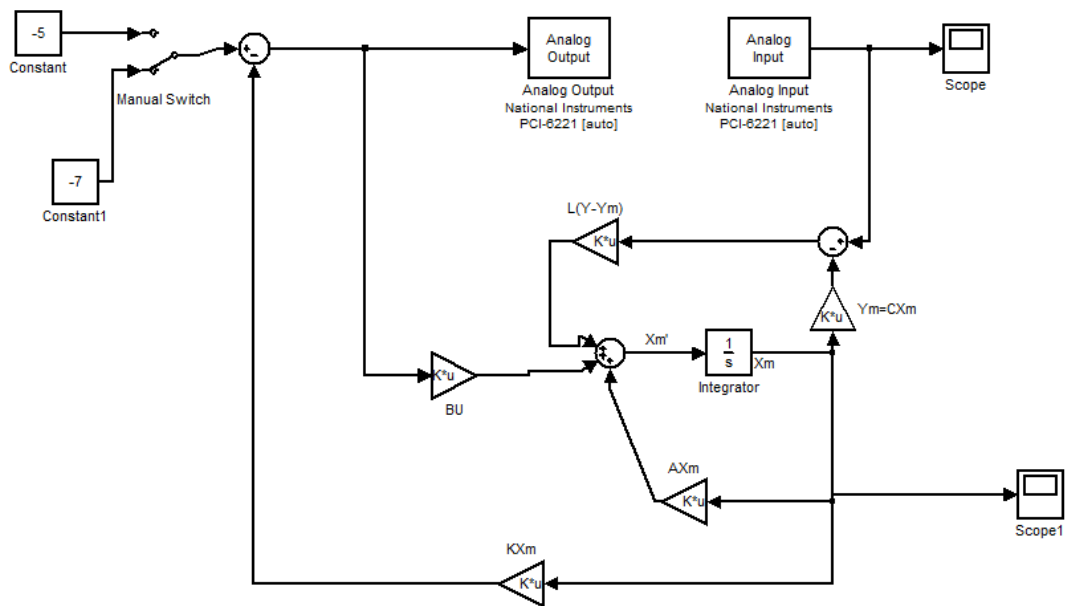
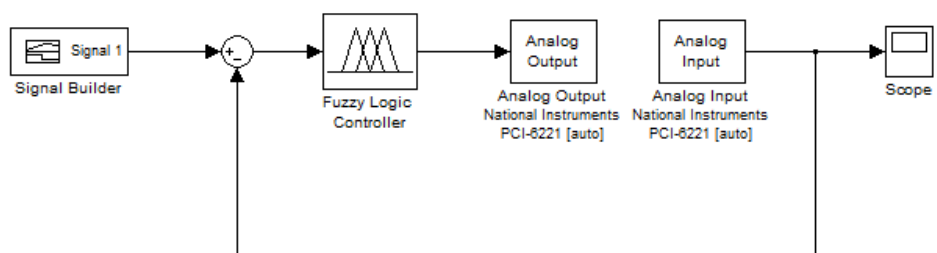


Fig1.Schema de la manipulation



**Fig2.Schema de la manipulation**