

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

**DEPARTEMENT DU GENIE ELECTRIQUE**

Filière : Automatique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme  
d'Ingénieur d'Etat en Automatique

Thème :

***Détection et Isolation de Pannes***

***Par Observateurs d'Etat :***

***Application au Pendule Inversé***

Proposé par :

M<sup>r</sup> M.Tadjine  
M<sup>r</sup> M.S.boucherit

Etudié par :

M<sup>elle</sup> Allalou Amina Nesrine

Juin 2003

Travail effectué au laboratoire de commande des processus.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Remerciements :*

Que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation trouvent en ce modeste travail l'expression de toute ma gratitude.

Je tiens à remercier, particulièrement, Messieurs les promoteurs pour l'aide et les conseils précieux qu'ils n'ont cessés de me prodiguer tout au long de la réalisation de cette étude. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

J'adresse également mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cet humble travail.

*Dédicaces*

*A ma mère et mon père, les êtres les plus chers à mon cœur;*

*Aux familles Tobji et Allalou en témoignage  
de toute mon affection;*

*A Didou Youcef avec mon profond respect;*

*A mes cousines et cousins ainsi qu'à mes amies,*

*Plus spécialement à Nassima Nacer et Naima Guendouz;*

*Je dédie ce modeste travail.*



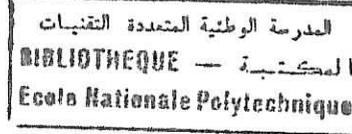
Introduction Générale .....	1
<b>Chapitre 1                    Etat de l'art sur les méthodes de diagnostic</b>	
Introduction .....	3
1- Concepts de base sur le diagnostic .....	3
2- Diagnostic basé modèle analytique. ....	4
2-1 Méthodes de génération de résidu. ....	5
2-1-1 Approche par espace de parité. ....	5
2-1-2 Approche par estimation paramétrique .....	7
2-1-3 Approche par observateur .....	9
2-1-3-1 Observateur d'ordre plein .....	9
2-1-3-2 Observateur généralisé .....	12
2-1-4 Approche par traitement de signal. ....	13
2-2 Isolation de pannes .....	14
3-Diagnostic basé modèle qualitatif.....	15
3-1 Génération des symptômes.....	15
3-2 Localisation des pannes.....	15
3-2-1 Méthodes de classification.....	15
4- Diagnostic par les méthodes d'intelligence artificielle.....	16
4-1 Diagnostic par réseaux de neurones.....	16
4-2 Evaluation des résidus par logique floue.....	17
Conclusion.....	19
<b>Chapitre 2                    Modélisation et commande du pendule inversé</b>	
Introduction .....	20
1- Description du pendule inversé.....	20
2- Modélisation du système.....	21
3- Linéarisation des équations.....	22
4- Commande linéaire quadratique.....	23
5- Observateur d'état.....	25
6- Application sur le système non linéaire.....	31
Conclusion.....	40
<b>Chapitre 3                    Synthèse d'observateurs pour le diagnostic du pendule inversé</b>	
Introduction.....	41
1- Génération de résidus par observateur d'ordre plein.....	41
1-1 Principe.....	41
1-2 Synthèse de l'observateur d'ordre plein.....	42
1-2-1 Pannes actionneur.....	42
1-2-2 Pannes capteurs.....	43
1-2-3 Variations paramétriques.....	43
2- Prise de décision.....	49
3- Génération de résidus par observateurs généralisés.....	50

4- Application au système non linéaire.....	62
Conclusion.....	69

#### **Chapitre 4**

#### **Commande tolérante**

Introduction.....	70
1- Commande tolérante aux pannes capteurs.....	70
2- Solution pour prévenir les pannes actionneur.....	77
Conclusion.....	77
Conclusion générale.....	78

**Introduction générale:**

L'un des enjeux les plus importants de l'automatisme concerne aujourd'hui l'augmentation de la fiabilité, de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement des processus technologiques. Ceci justifie l'intérêt grandissant pour les techniques de détection de défauts et l'introduction de modules de surveillance dans les processus ([9], [13]).

Avant l'apparition des techniques utilisant un modèle du processus, la détection de pannes se faisait -et se fait encore- en utilisant la redondance matérielle. Les composants critiques du système sont doublés, triplés voire quadruplés pour les processus nécessitant une grande sécurité tels qu'en avionique ainsi que pour les processus chimiques et nucléaires. Cette redondance matérielle est sûre et rapide mais elle s'avère coûteuse et encombrante. Elle rend le système complexe et de plus certains composants ne peuvent être doublés[9].

Une autre technique utilisée est la surveillance. Les variables du système dynamique sont mesurées puis comparées à leurs valeurs limites prédéfinies (tolérances) pour un comportement normal c'est-à-dire en l'absence de pannes. Des alarmes sont générées en cas de dépassement. Cette technique présente comme inconvénient le fait que si les limites sont fixées trop basses de fausses alarmes peuvent être déclenchées à cause des fluctuations normales des variables. Par contre si elles sont fixées trop hautes alors certains défauts peuvent ne pas être détectés. De plus, si le défaut se propage sur plusieurs sorties l'isolation de la panne devient alors difficile[12].

Ces vingt dernières années, il a été démontré que les changements de mode de fonctionnement des systèmes peuvent être détectés rapidement par introduction de la redondance analytique [2] qui utilise un modèle du processus. On comparera alors le comportement actuel du système avec celui du modèle nominal. Différentes techniques ont été dès lors développées( [8], [10], [11]). Parmi ces techniques celles utilisant l'estimation d'état basée observateurs[19].

Dans le but de tester les avantages et les inconvénients de ces techniques, on a recours à des cas d'étude particuliers représentatifs des grandes classes d'application. Le pendule inversé, objet de notre étude, est l'un de ces cas types.

Dans ce présent travail, nous nous intéressons à la détection et isolation de pannes par observateurs d'état pour le système de commande du pendule inversé. Tout d'abord, nous procédons à la mise en œuvre d'une loi de commande linéaire quadratique qui répond à certains objectifs de régulation et de poursuite pour le système du pendule inversé linéarisé, cette commande est ensuite appliquée pour le système non linéaire. Puis, nous nous intéresserons à la détection et à la localisation de différentes catégories de pannes pouvant survenir dans le système étudié en exploitant le modèle linéarisé, ceci en utilisant des observateurs d'état linéaires. Nous testons par la suite les observateurs obtenus pour le système non linéaire. Enfin, nous déterminons une commande tolérante aux défauts capteurs par une technique d'estimation d'état.

Ce mémoire comprend 4 chapitres :

Dans le premier chapitre nous présenterons les concepts de base ainsi que les techniques les plus utilisées pour la détection et l'isolation de pannes : celles basées modèles analytiques ou qualitatifs puis celles utilisant l'intelligence artificielle.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## ***INTRODUCTION GENERALE***

Dans le second chapitre, nous présentons une modélisation du pendule inversé et après linéarisation du modèle autour d'un point de fonctionnement, nous déterminons une loi de commande basée sur la commande linéaire quadratique qui permet d'assurer la régulation du pendule autour de 0 rad ainsi que la poursuite sur la position du chariot. La commande calculée est testée dans le cas non linéaire.

Le troisième chapitre sera consacré à la synthèse de deux types d'observateurs : un observateur d'ordre plein et des observateurs généralisés dans le but de détecter les pannes de l'actionneur, des capteurs et les défauts des paramètres du système pendule-chariot. Une logique de décision est appliquée pour localiser les différentes pannes. Les observateurs obtenus sont testés dans le cas non linéaire.

Dans le dernier chapitre, nous synthétisons une commande tolérante afin de préserver les performances du système nominal en présence de pannes.

Enfin, nous clôturons notre travail par une conclusion générale incluant quelques perspectives de recherche.

*CHAPITRE 1 :*

***ETAT DE L'ART SUR LES  
METHODES DE DIAGNOSTIC***

**Introduction :**

Les méthodes de détection de pannes peuvent être classées selon que l'on dispose ou non d'un modèle du processus à surveiller. Dans le premier cas, on utilise les redondances d'information et la connaissance fournie par le modèle pour caractériser le mode de fonctionnement du système, puis décider s'il est normal ou non. Dans le deuxième cas, c'est l'analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son état. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de forme ou à l'intelligence artificielle[6].

**1-Concepts de base sur le diagnostic [6]:**

Le terme **panne** ou **défaut** désigne une anomalie fonctionnelle qui mène à un comportement indésirable ou interdit du système. On notera qu'un défaut du composant ne signifie pas que le composant ne fonctionne plus.

Dans un processus automatisé, les pannes peuvent survenir dans le système proprement dit, dans les unités de contrôle, le matériel ou le logiciel.

Dans ce présent travail, on s'intéressera à trois catégories de pannes pouvant survenir dans un système de commande (voir figure 1-1) :

- pannes actionneurs.
- pannes capteurs.
- pannes système (c'est à dire les pannes liées aux composants du système).

Afin de détecter les pannes qui peuvent se produire, avant l'échec total, et dans la mesure du possible déterminer les causes qui en sont à l'origine, une procédure de reconnaissance doit être appliquée: le **diagnostic**.

Le diagnostic de pannes consiste en 2 tâches: :

**La détection de pannes :** l'indication qu'il existe une panne.

**L'isolation de pannes :** la localisation des différentes pannes.

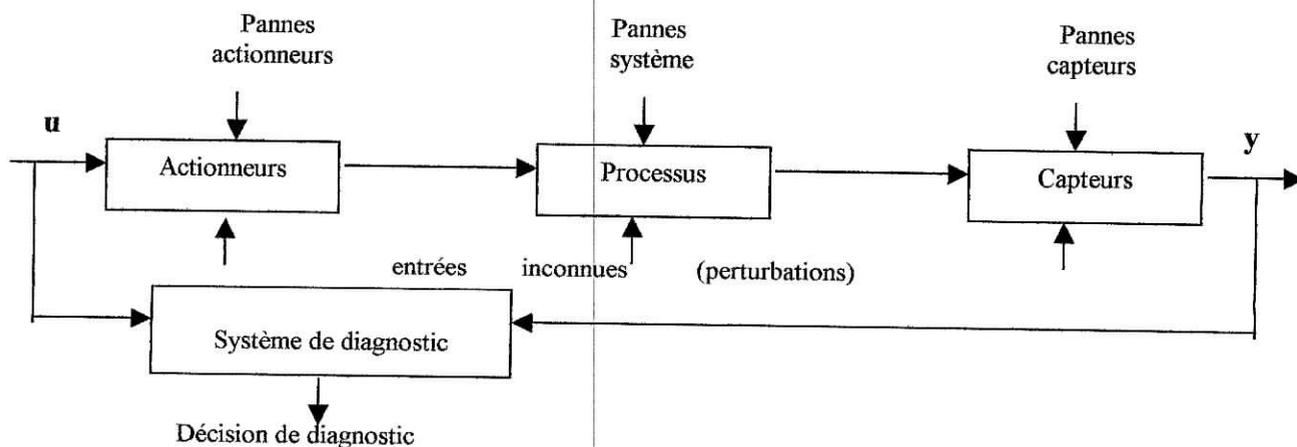


Figure1-1 :Description des types de pannes pouvant survenir dans un système de commande.

## 2-Diagnostic basé modèle analytique:

Une large classe de méthodes de détection et d'isolation de pannes exploite le modèle mathématique du processus [10], [20]. Cette approche est motivée par le fait qu'une connaissance poussée du système implique un diagnostic plus fiable.

Différentes techniques de détection et d'isolation de pannes basées modèle analytique ont été développées. Toutes ces techniques utilisent la **redondance analytique** [2].

### Définition1-1 : [6]

Il y a redondance analytique s'il existe deux ou différentes manières de déterminer une variable  $x$  uniquement en utilisant les observations  $z(t)$ , ie :

$$x=f_1(z(t)) \text{ et } x=f_2(z(t)) \text{ avec } f_1 \neq f_2$$

Pour la détection de pannes, on mesure les variables du système et on les estime à partir du modèle. La comparaison entre les valeurs obtenues par les deux manières permettra de faire la détection de défauts.

Le diagnostic utilisant un modèle mathématique du processus peut être divisé en 2 étapes principales :

- la génération du résidu ( étape propre à l'approche utilisée).
- la prise de décision.

### La génération du résidu :

Les mesures relevées sur le système sont utilisées pour générer un signal, appelé **résidu**, qui met en évidence la présence de défauts. En l'absence de défauts ce signal est statiquement nul dans le cas contraire son amplitude évolue d'une manière significative. Le résidu est généré de la différence entre les mesures réelles et l'estimée de ces mesures en utilisant le modèle nominal. Lors de la conception du générateur de résidu, un filtre, en plus de sa sensibilité aux pannes, il doit être insensible aux entrées inconnues non considérées comme défauts (les perturbations).

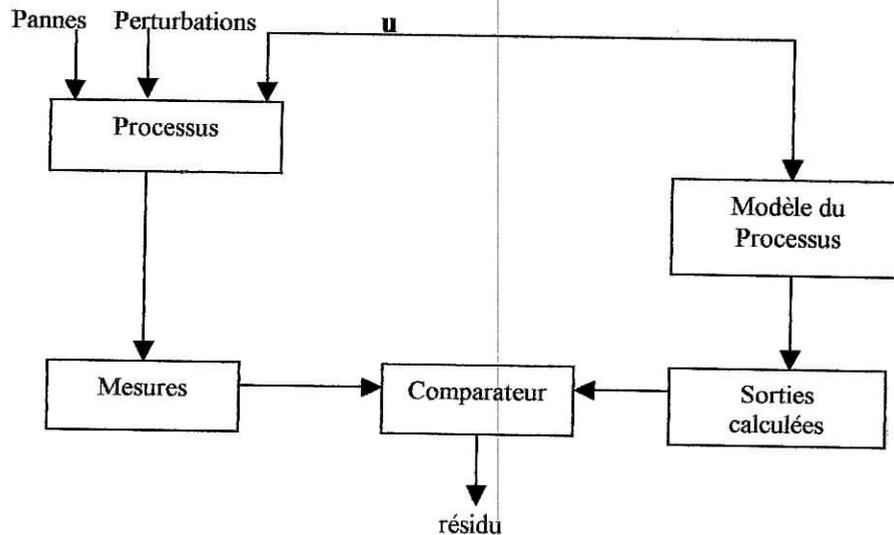
### La prise de décision :

Elle consiste à analyser le résidu pour décider s'il y a ou non-présence de panne, sur quel composant (localisation) et, dans la mesure du possible, déterminer le type (nature) de panne et sa cause.

La décision peut s'effectuer à l'aide d'un simple test de dépassement de seuil sur la valeur du résidu ou faire appel à la théorie de la décision statistique. L'évaluation peut également être non booléenne elle consiste alors à attribuer un facteur de croyance à un ensemble d'hypothèses de défaillances. La combinaison des informations peut alors être faite en utilisant la logique floue.

D'un point de vue pratique, la logique de décision à seuils joue un rôle important car la plupart des méthodes citées se ramènent à terme à un seuillage.

Si le seuil choisi est constant, les entrées inconnues qui excitent le système perturbent la décision. Si le seuil est choisi trop petit, on observe beaucoup de fausses alarmes et s'il est trop grand, les défauts de faibles amplitudes ne sont pas détectés. Il est donc intéressant d'utiliser des seuils adaptatifs qui évoluent en fonction du point de fonctionnement du processus [14].



**Figure 1-2 :** Principe de la génération du résidu en utilisant un modèle du processus.

### 2-1 Méthodes de génération du résidu :

Il existe différentes manières pour générer un résidu par les méthodes utilisant le modèle analytique du processus. On en présentera quelques-unes dans ce qui suit.

#### 2-1-1 Approche par espace de parité :

L'approche espace de parité consiste en le test de la consistance des équations de parité en exploitant les mesures relevées sur le système. Autrement dit : le test des relations reliant le signal de commande aux mesures, supposées égales à zéro si le comportement du modèle coïncide avec celui du processus.

Ces équations de parité utilisent soit la **redondance directe** découlant des relations algébriques statiques reliant les signaux mesurables (le signal de commande et les sorties), soit la **redondance temporelle** issue de l'utilisation des relations dynamiques du système [14], [20].

##### 2-1-1-1 Espace de parité statique :

Afin d'éprouver le fonctionnement des appareils de mesure, les premières stratégies mises en œuvre se sont appuyées sur le principe de la redondance matérielle. Dans cette approche, le nombre de mesures est en général supérieur au nombre de variables à mesurer ; la redondance ainsi obtenue constitue alors un moyen simple de détecter les capteurs présentant des défauts et d'exhiber ceux fournissant des données cohérentes.

Soit le système décrit par l'équation de mesure :

$$y(k) = Cx(k) + \xi(k) + Fd(k) \tag{1.1}$$

où :

- $y \in \mathbb{R}^m$  vecteur de mesure.
- $x \in \mathbb{R}^n$  vecteur d'état.
- $\xi \in \mathbb{R}^p$  bruit de mesure.
- $d \in \mathbb{R}^p$  vecteur défauts.
- $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$  matrice caractérisant le système de mesure.
- $F \in \mathbb{R}^{m \times p}$  matrice traduisant la direction de défauts.

Si on choisit  $P(k) = \omega y(k)$  le vecteur parité comme résidu où  $\omega$  est une matrice de projection orthogonale à  $C$  on obtient :

$$P(k) = \omega \xi(k) + \omega F d(k) \tag{1.2}$$

En cas d'absence de défauts et de bruits de mesure :  $P(k) = 0$  ie :  $\omega y(k) = 0$

On note que pour détecter les défauts, il faut choisir avec soin le rang de  $\omega F$  car si  $\omega F$  contient une colonne nulle, une certaine direction de défaillance disparaîtra.

### 2-1-1-2 Espace de parité dynamique:

Soit le système décrit par la représentation d'état suivant :

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + F_1 d(k) \\ y(k) &= Cx(k) + F_2 d(k) \end{aligned} \tag{1.3}$$

avec

- $x \in \mathbb{R}^n$  vecteur d'état
- $u \in \mathbb{R}^p$  vecteur de commande
- $y \in \mathbb{R}^m$  vecteur de sortie
- $d \in \mathbb{R}^s$  vecteur de pannes
- $A, B, F_1, C, F_2$  matrices de dimensions appropriées.

Sur un horizon d'observation, les équations du système peuvent être écrites sous la forme :

$$y(k,s) - G(s)y(k,s) = H(s)x(k) + F(s)d(k,s) \tag{1.4}$$

où :

$$w(k,s) = \begin{bmatrix} \omega(k) \\ \omega(k+1) \\ \vdots \\ \omega(k+s) \end{bmatrix}; \omega \in \{ y, u, d \}$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ CB & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ CAB & CB & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{s-1}B & CA^{s-2}B & \dots & \dots & \dots & CB & 0 \end{bmatrix}; F(s) = \begin{bmatrix} F_2 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ CF_1 & F_2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ CAF_1 & CF_1 & F_2 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{s-1}F_1 & CA^{s-2}F_1 & \dots & \dots & \dots & CF_1 & F_2 \end{bmatrix}; H(s) = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^s \end{bmatrix}$$

Pour générer des équations de redondance, les états  $x(k)$  doivent être éliminés. On doit donc multiplier (1.4) par une matrice  $\Omega$  (matrice de parité) orthogonale à  $H(s)$  ie :  $\Omega H(s) = 0$   
 Le vecteur de parité  $P(k)$  peut être choisi comme résidu, on aura alors:

$$P(k) = r(k) = \Omega [y(k,s) - G(s)u(k,s)] \tag{1.5}$$

ou en fonction des défauts :

$$P(k) = \Omega F(s) D(k,s) \tag{1.6}$$

avec :  $\Omega F(s) \neq 0$

En l'absence de défauts  $P(k)$  a une valeur moyenne nulle, sinon il devient différent de zéro et s'oriente vers une direction qui dépend du défaut.

Sur un horizon d'observation de largeur  $s$ , l'équation (1.4) existe toujours, donc la génération de résidu peut être faite dans tous les cas. On note aussi que cette approche peut être utilisée pour les systèmes continus.

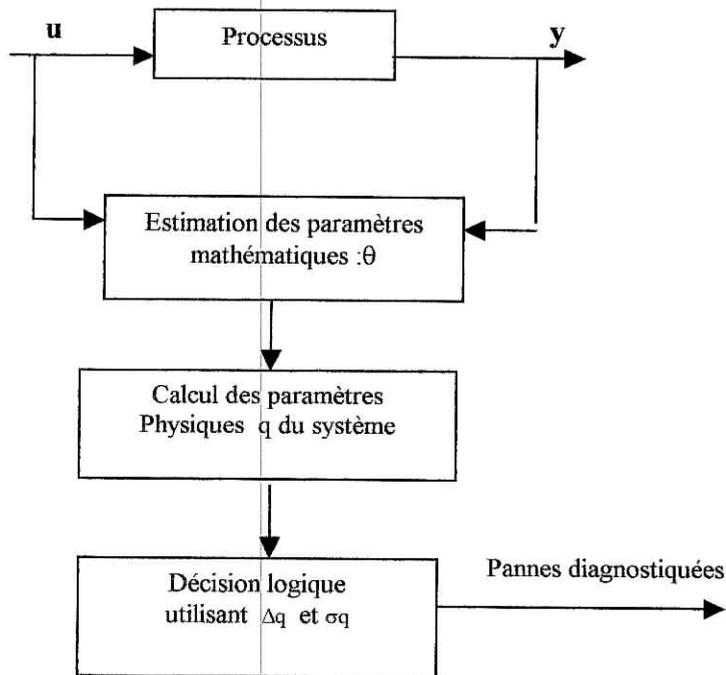
**2-1-2 Approche par estimation Paramétrique:**

Cette approche est basée sur le fait que les pannes se répercutent sur les paramètres physiques du système tels que la masse, la viscosité, la résistance, la capacitance, l'inductance ...

Pour détecter les défauts, les paramètres du processus sont alors estimés d'une manière continue et comparés à ceux du processus en l'absence de toute panne [10], [11], [12].

La procédure de l'estimation paramétrique est composée de 3 étapes principales :

- Estimation des paramètres mathématiques du modèle :  $\hat{\theta}$  (avec  $\theta$  une combinaison des paramètres physiques  $q$  du système ie  $\theta = f(q)$ ).
- Estimation des paramètres physiques  $\hat{q}$  avec :  $f^{-1}(\hat{\theta}) = \hat{q}$ .
- Décision logique en utilisant  $\Delta q = q_{nominal} - \hat{q}$  et  $\sigma_q$  : la variance représentant une mesure de dispersion autour de  $q_{nominal}$ .



**Figure 1-3:** Représentation schématique du diagnostic par la méthode d'estimation paramétrique

La méthode d'estimation paramétrique la plus utilisée est celle des moindres carrés. Soit un système décrit par l'équation :

$$y(t) = \Psi^T \theta + e(t) \tag{1.7}$$

où :

$$\Psi = [-y^{(n)}(t) \dots -y^{(1)}(t) \ u^m(t) \dots u(t) ]$$

$$\theta = [a_n \dots a_1 \ b_m \dots b_0 ]$$

y(t) : sortie du système.

Ψ : vecteur de mesure.

θ : vecteur des paramètres du modèle.

e(t) : erreur d'équation.

En minimisant la somme des moindres carrés :

$$V = \sum_{k=1}^N e(k)e(k) = e^T e \tag{1.8}$$

et en prenant :  $dV / d\theta = 0$

on aura :

$$\hat{\theta} = [\Psi^T \Psi]^{-1} \Psi^T h \tag{1.9}$$

Après avoir estimé  $\theta$ , l'estimation des paramètres physiques  $q$  est possible si et seulement si  $f^{-1}$  existe, on aura :

$$\hat{q} = f^{-1}(\hat{\theta}) \tag{1.10}$$

on calculera alors  $\Delta q$  et  $\sigma_q$

Ces 2 quantités peuvent être considérées comme résidu utilisé dans les tests statistiques afin de détecter les pannes.

Cette méthode peut être utilisée pour les systèmes non linéaires sous la condition que la sortie  $y$  soit linéaire par rapport aux paramètres  $a_i, b_i$ .

L'avantage de cette technique réside dans le fait que l'on peut connaître la taille des déviations. Elle est cependant déconseillée pour un système travaillant autour d'un point de fonctionnement car ce système doit être soumis à une excitation continue.

### 2-1-3 Approche par observateur:

Un observateur ou estimateur ou encore capteur logiciel, est un système dynamique basé sur la connaissance des modèles décrivant le comportement du système et utilisant des mesures acquises sur celui-ci afin de reconstruire les mesures manquantes.

L'observateur est soit conçu pour estimer les états dans un système de commande en boucle fermée, nécessitant la connaissance des états, soit à des fins de diagnostic des systèmes.

L'idée principale de la génération de résidu à l'aide d'observateurs consiste à reconstruire les variables mesurables du système à l'aide d'observateur en exploitant le modèle afin de les comparer à leurs valeurs mesurées. Les grandeurs de comparaison sont alors utilisées comme résidus [19].

#### 2-1-3-1 Observateur d'ordre plein:

Soit un système linéaire invariant dans le temps décrit par la représentation suivante :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu + E_a d + E_f f \\ y &= CX + Du + F_a d + F_f f \end{aligned} \tag{1.11}$$

$A, B, E_a, E_f, C, D, F_a, F_f$  : matrices de dimensions appropriées,  $u \in R^m$   
 $d \in R^k, f \in R^q$ .

On note que les entrées inconnues de perturbations  $d$  et de pannes  $f$  ne sont ni mesurables ni estimables, mais on modélise leurs influences potentielles sur le système par les matrices :

$E_a, F_a$  Et  $E_f, F_f$  respectivement.

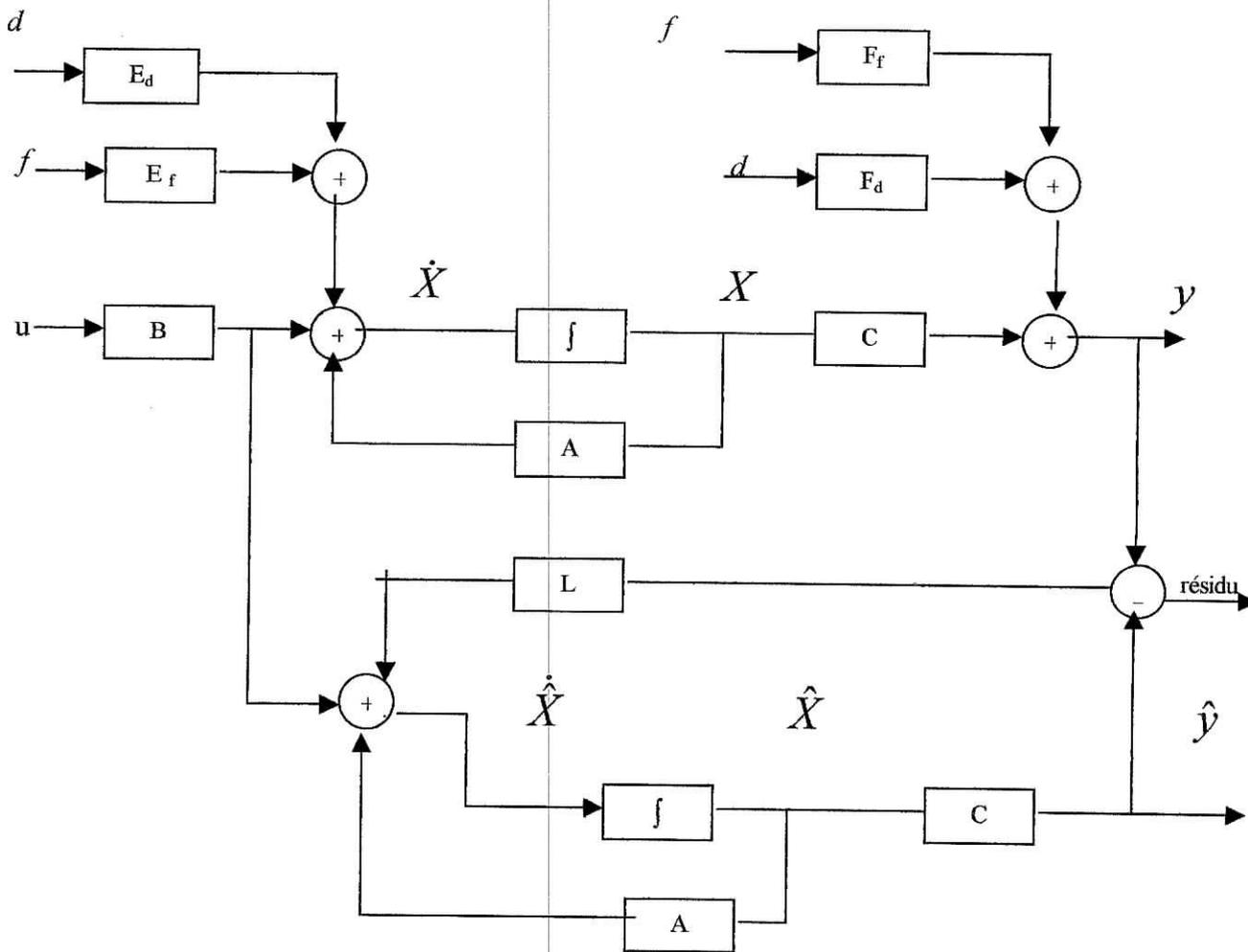


Figure 1-4 système avec observateur d'ordre plein.

L'observateur d'ordre plein est un système dynamique d'état  $\hat{X}$  défini par la valeur estimée initiale  $\hat{X}(0)=\hat{X}_0$  et une équation différentielle de la forme :

$$\dot{\hat{X}}=A\hat{X}+Bu+L(y-\hat{y}) \tag{1.12}$$

où  $L$ , le gain de l'observateur, est une matrice  $n \times p$ .

La sortie prédite  $\hat{y}$ , est donnée par :

$$\hat{y}=C\hat{X}+Du \tag{1.13}$$

Pour comprendre le pourquoi de cette expression, on suppose qu'à un certain instant par exemple à  $t=0$ , l'estimation est bonne. Alors elle le restera tout au long de la trajectoire.

En effet, si  $\hat{X}(0)=X(0)$  alors la sortie prédite coïncidera avec la sortie mesurée et (1.12) deviendra identique à l'équation d'état du système.

Si maintenant  $\hat{X}$  est différent de, on doit corriger la dynamique d'évolution de  $\hat{X}$  en utilisant le seul indice à notre disposition, à savoir l'erreur de prédiction. A chaque instant, la dynamique de  $\hat{X}$  sera la résultante d'un compromis, réglé par le gain d'observateur

entre le poids accordé aux valeurs passées de l'estimée et celui accordé à l'information nouvelle apportée par l'erreur de prédiction.

Pour la **détection de pannes**, on utilise l'erreur de prédiction comme résidu :

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (1.14)$$

qui n'est autre qu'une comparaison entre la sortie réelle du système pouvant être sujette aux pannes et la sortie estimée du modèle nominal.

Si on définit l'erreur d'observation par :

$$e(t) = X(t) - \hat{X}(t) \quad (1.15)$$

on aura alors :

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{X}(t) - \dot{\hat{X}}(t) \\ \dot{e}(t) &= (A-LC)e(t) + (E_d-LF_d)d(t) + (E_f-LF_f)f(t) \end{aligned} \quad (1.16)$$

Pour que cette erreur d'observation converge asymptotiquement vers zéro, il faut choisir  $L$  tel que  $(A-LC)$  soit stable.

Le résidu sera donné par :

$$r(t) = Ce(t) + F_d d(t) + F_f f(t) \quad (1.17)$$

Ou dans le domaine fréquentiel par :

$$r(s) = C[sI - A + LC]^{-1} [(E_d - LF_d)d + (E_f - LF_f)f] + F_d d + F_f f \quad (1.18)$$

$$r(s) = G_{rf}(s)f(s) + G_{rd}(s)d(s) \quad (1.19)$$

où :

$$G_{rf}(s) = C[sI - A + LC]^{-1} (E_f - LF_f) + F_f \quad (1.20)$$

$$G_{rd}(s) = C[sI - A + LC]^{-1} (E_d - LF_d) + F_d \quad (1.21)$$

Les matrices de transfert  $G_{rf}(s)$  et  $G_{rd}(s)$  définissent respectivement l'influence des défauts et des perturbations sur le résidu.

Si on pose :  $G_{fr}(s) = [G_{rf}(s)]^{-1}$ , on a :

$$G_{fr}(s)G_{rd}(s) = T_p(s) \quad (1.22)$$

avec :

$$T_p(s) = [C[sI - A]^{-1} E_d + E_f]^{-1} [C[sI - A]^{-1} F_d + F_f] \quad (1.23)$$

Où :  $I$  désigne la matrice identité et  $s$  la variable de la place, et on déduit des propriétés de la norme  $H_\infty$  le résultat suivant :

$$\|G_{rd}(s)\|_\infty \geq \|T_p(s)\|_\infty \times [\|G_{fr}(s)\|_\infty]^{-1} \quad (1.24)$$

On note que la fonction de transfert  $T_p(s)$  – qui dépend uniquement des propriétés structurelles du système et non de la conception de l'observateur – régit la forme du compromis entre le rejet des perturbations et la sensibilité aux défauts. Si on minimise  $\|G_{fr}(s)\|_\infty$  on augmentera alors  $\|G_{rd}(s)\|_\infty$  et la sensibilité aux perturbations dans cette gamme de fréquence augmentera [16].

### 2-1-3-2 Observateur généralisé :

L'observateur généralisé est un observateur en boucle fermée estimant une combinaison linéaire quelconque du vecteur d'état  $X$  i.e. :  $z=TX$  ( $T$  : matrice régulière). Sa structure est donnée par :

$$\dot{\hat{z}} = N\hat{z} + Mu + Gy \quad (1.25)$$

ou  $N, M, G$  matrices de dimensions appropriées qui font partie des paramètres de réglage de l'observateur.

La dérivée de l'erreur d'observation vérifie :

$$\begin{aligned} \dot{e}_z &= \dot{\hat{z}} - \dot{z} = \dot{\hat{z}} - T\dot{x} \\ \dot{e}_z &= N\hat{z} + Mu + Gy - T\dot{x} \\ \dot{e}_z &= N\hat{z} + Mu + Gy - T[Ax + Bu + E_{ad} + E_{ff}] \\ \dot{e}_z &= NT\hat{x} + Mu + Gy - TAx - TBu - TE_{ad} - TE_{ff} \\ \dot{e}_z &= NT\hat{x} + Mu + GCx + GDu + GF_{ad} + GF_{ff} - TAx - TBu - TE_{ad} - TE_{ff} \\ \dot{e}_z &= NT\hat{x} + (GC - TA)x + (M + GD - TB)u + (GF_{ad} - TE_{ad})\hat{d} + (GF_{ff} - TE_{ff})f \end{aligned} \quad (1.26)$$

Pour que cette erreur d'observation converge asymptotiquement vers zéro en l'absence de défauts, et ce quelles que soient les perturbations, on devra choisir  $N, M, G$  vérifiant les conditions suivantes :

$N$ , dynamique de l'erreur d'observation stable

$$NT = TA - GC \quad (1.27)$$

$$M = TB - GD \quad (1.28)$$

$$GF_{ad} - TE_{ad} = 0 \quad (1.29)$$

Pour la détection de pannes, on va estimer une combinaison linéaire des variables d'état mesurables afin de les comparer à leurs analogues issues des mesures.

Les grandeurs de comparaison, des résidus, sont définies par :

$$r(t) = P\hat{z}(t) + Uu(t) + Ky(t) \quad (1.30)$$

$$r(t) = P\hat{z}(t) + KCx(t) + Uu(t) + KDu(t) + KF_{ad}(t) + KF_{ff}(t) \quad (1.31)$$

Ce résidu doit être nul en l'absence de défauts, quels que soient l'état, l'entrée et les perturbations. Sinon il doit s'écarter remarquablement du zéro, on devra alors vérifier :

$$N \text{ stable} \tag{1.32}$$

$$PT = -KC \tag{1.33}$$

$$U = -KD \tag{1.34}$$

$$KF_d = 0$$

Si on vérifie les contraintes de synthèse relatives au résidu et à l'erreur d'observation, on a :

$$\dot{e}_z = NT(\hat{x} - x) + (GF_f - TE_f)f \tag{1.35}$$

$$r = PT(\hat{x} - x) + KF_f f \tag{1.36}$$

la dérivée de l'erreur d'observation est donc soumise à l'influence des défauts via la matrice  $TE_f - GF_f$  et le résidu est sensible aux défauts via  $KF_f$ .

Il faut noter que grâce à sa structure en boucle fermée, cet observateur apporte des degrés de liberté supplémentaires lors de sa synthèse, qui permettent de s'affranchir de l'influence des perturbations tout en détectant les pannes ce qui permettra un diagnostic robuste.

Dans le domaine fréquentiel :

$$r(s) = G_{rd}(s)d(s) + G_{rf}(s)f(s) \tag{1.37}$$

où :

$$G_{rd}(s) = P(sI - N)^{-1} [GF_d - TE_d] + KF_d \tag{1.38}$$

$$G_{rf}(s) = P(sI - N)^{-1} [GF_f - TE_f] + KF_f \tag{1.39}$$

Contrairement à l'observateur d'ordre plein, où le compromis entre le rejet de perturbations et la détection de pannes était régi par la matrice  $T_p(s)$  dépendant uniquement de la structure du modèle, l'observateur généralisé présente beaucoup plus de degré de liberté dans sa conception ce qui permettra donc détecter les pannes et rejeter les perturbations sur toute la gamme de fréquence [16].

#### 2-1-4- Approche par traitement de signal :

Plusieurs signaux mesurés  $y(t)$  indiquent des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. Si les changements dans ces signaux sont reliés aux défauts dans le procédé, dans les actionneurs ou dans les capteurs, une analyse du signal est aussi une source d'information. En particulier pour les vibrations dans les machines, des capteurs de position, de vitesse ou d'accélération sont utilisés pour détecter, par exemple, les déséquilibres et les défauts de paliers (cas des turbomachines), cliquetis (moteurs diesel) ou claquements (machines de broyage), mais aussi, à partir de plusieurs autres capteurs, comme les capteurs de courant électrique, de position, de vitesse, de force, de flux et de pression qui peuvent montrer des oscillations à des fréquences plus élevées que celles des réponses dynamiques des procédés habituels. L'extraction des caractéristiques du signal relatif à un défaut, peut se restreindre à l'extraction de l'amplitude  $y_0(\omega)$  ou les densités de l'amplitude

$|y(i\omega)|$  dans une certaine largeur de bande de fréquence ( $\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}$ ) du signal en utilisant des filtres passe bande (Stearns 1975).

Les autres possibilités sont la détermination des fonctions d'autocorrélation, la Transformée de Fourier -particulièrement sous la forme de Transformée de Fourier Rapide (ou FFT pour Fast Fourier Transform)- ou la densité spectrale (Barschdorff, 1987). Les fonctions de corrélation et les densités spectrales conviennent spécialement pour la séparation des composantes stochastiques et périodiques du signal. Si les fréquences sont connues, l'inter-corrélation du signal avec des harmoniques d'ordre supérieur peut être effectuée.

Toutefois, la fonction de corrélation ou le spectre de fréquences constituent une représentation non paramétrique du signal qui (aussi bien pour les signaux harmoniques que stochastiques) ne convient pas pour la détection automatique directe de défauts, si les fréquences sont inconnues. donc les modèles paramétriques du signal sont préférables. Elles permettent d'estimer directement les principales fréquences et leurs amplitudes qui sont particulièrement sensibles aux petits changements de fréquences Ceci est possible en modélisant les signaux comme une superposition de sinusoides amorties sous la forme de modèles ARMA (« Autoregressive moving average »).

A l'aide de l'estimateur du maximum d'entropie à deux pas, via les fonctions de corrélation, un nombre choisi de fréquences distinctes, inconnues  $\omega_j$  peuvent être estimées ainsi que leurs amplitudes  $y_{0j}$ . Les symptômes sont alors générés par les changements des fréquences et des amplitudes estimées[15].

## 2-2- Isolation de pannes :

Il existe différentes techniques afin d'effectuer la localisation de pannes[6]. Les méthodes utilisées pour les systèmes de contrôle peuvent être réparties en deux classes :

- 1) Les résidus à directions fixées.
- 2) Les résidus structurés.

### 2-2-1. Les résidus à directions fixées :

Le principe de cette méthode est de construire un vecteur résidu qui répond dans une certaine direction pour une panne donnée. L'isolation des pannes est achevée après classification des différentes directions.



Après génération du résidu, la panne la plus probable sera celle dont l'angle avec le vecteur résidu est le plus petit.

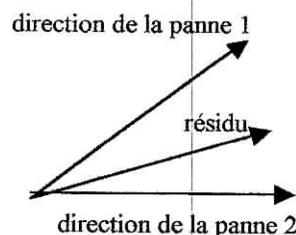


Figure 1-5 :résidus à directions fixées

Cette technique est peu utilisée à cause des difficultés liées à la construction d'un vecteur avec les propriétés désirées.

### **2- 2-2. Les résidus structurés :**

Le principe de base est de construire un ensemble de résidus, chaque résidu sensible à un sous-ensemble de pannes. Cette méthode est largement utilisée, différentes techniques sont disponibles aussi bien pour les systèmes linéaires que pour les systèmes non linéaires.

### **3- Diagnostic basé modèle qualitatif :**

Il existe des processus dont le modèle mathématique est non disponible, d'autres dont les mesures interactives sont inaccessibles ou les paramètres mal-connus. Pour ce type de système, le diagnostic de pannes pourra être accompli en utilisant des connaissances qualitatives [11].

#### **3-1 Génération des symptômes :**

les connaissances qualitatives des symptômes incluent :

##### **- Les symptômes heuristiques :**

A travers les observations d'un expert, des caractéristiques heuristiques peuvent être déduites tels que : les bruits acoustiques, les couleurs ou les odeurs. Ces informations peuvent être exprimées par des termes linguistiques comme : « petit », « moyen », ...

##### **- Historique du procédé et statistiques de pannes :**

La vie passée du procédé contient les informations sur la durée de fonctionnement, les mesures de charge et la dernière maintenance. Tandis que les statistiques de pannes contiennent la fréquence de certains défauts du système.

#### **3-2 Localisation des pannes :**

Pour isoler les pannes en exploitant les symptômes les méthodes de classification ou de raisonnement peuvent être utilisés.

##### **3-2-1 Méthodes de classification :**

Le but du diagnostic est d'identifier le plus possible de pannes qui induisent les symptômes apparents sur le système.

Soient :

$S^T = [S_1 \ S_2 \ . \ . \ . \ S_n]$  : le vecteur des caractéristiques heuristiques et analytiques du système en fonctionnement.

$S_0^T = [S_{10} S_{20} \dots S_{n0}]$  : le vecteur de ces caractéristiques en l'absence de défauts.

$\Delta S^T = S^T - S_0^T$  : le vecteur de symptômes indiquant la présence ou non de défauts.

$F^T = [F_1 F_2 \dots F_q]$  : le vecteur dont l'élément  $F_i = 1$  s'il y a pannes  $f_i$  sinon  $F_i = 0$

La relation entre  $\Delta S$  et  $F$  est apprise expérimentalement et stockée formant une base de connaissance explicite.

La classification est faite par différentes techniques : méthodes statistiques (classification bayésienne), méthode géométrique, par réseaux de neurones ou par logique floue[12].

#### 4-Diagnostic par les méthodes d'intelligence artificielle :

Ces six dernières années, l'intelligence artificielle a été exploitée pour le diagnostic.

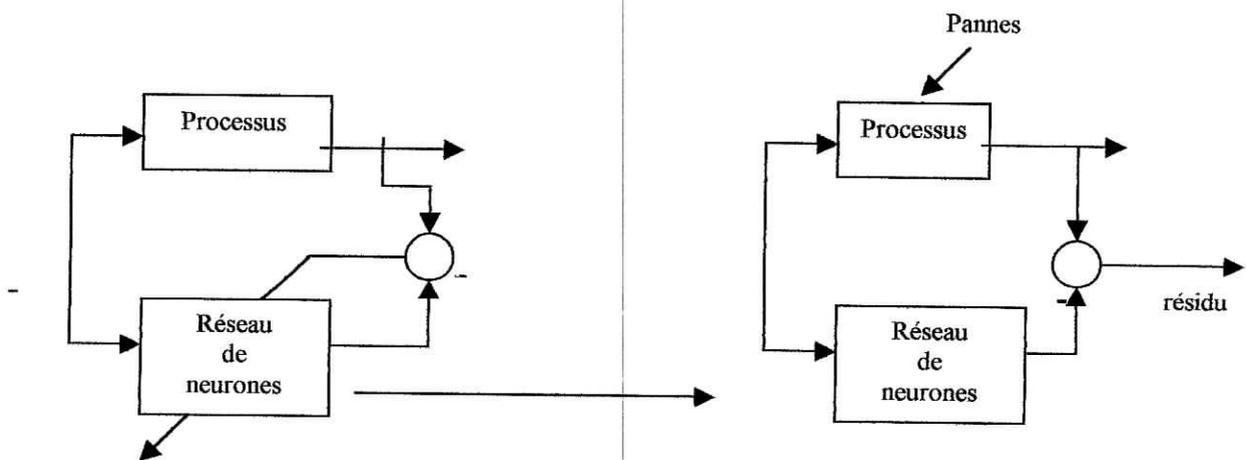
L'intégration des connaissances quantitatives et symboliques par les réseaux de neurones artificiels et par logique floue est la nouvelle tendance dans ce domaine. Dans les paragraphes suivants, on présentera la manière de générer un résidu et localiser les défauts par réseaux de neurones et comment isoler les pannes par logique floue[5].

#### 4-1 Diagnostic par réseaux de neurones artificiels:

Un réseau de neurones artificiel est un assemblage fortement connecté d'éléments processeurs disposés en couche: les neurones. Un neurone définit une fonction d'une sommation pondérée des variables d'entrée, cette fonction dite d'activation est de type sigmoïdale, linéaire, seuil... L'apprentissage se fait en comparant l'évolution d'une variable donnée  $y$  à une évolution souhaitée  $y^*$  et s'effectue en ajustant les poids des liaisons entre neurones.

#### 4-1-1 Génération de résidu par réseau de neurones artificiels (RNA):

l'une des techniques utilisée est de remplacer le modèle analytique qui décrit le processus sous les conditions d'opérations normales par un réseau de neurones. Ce réseau doit être entraîné pour cette tâche.



- Phase d'apprentissage

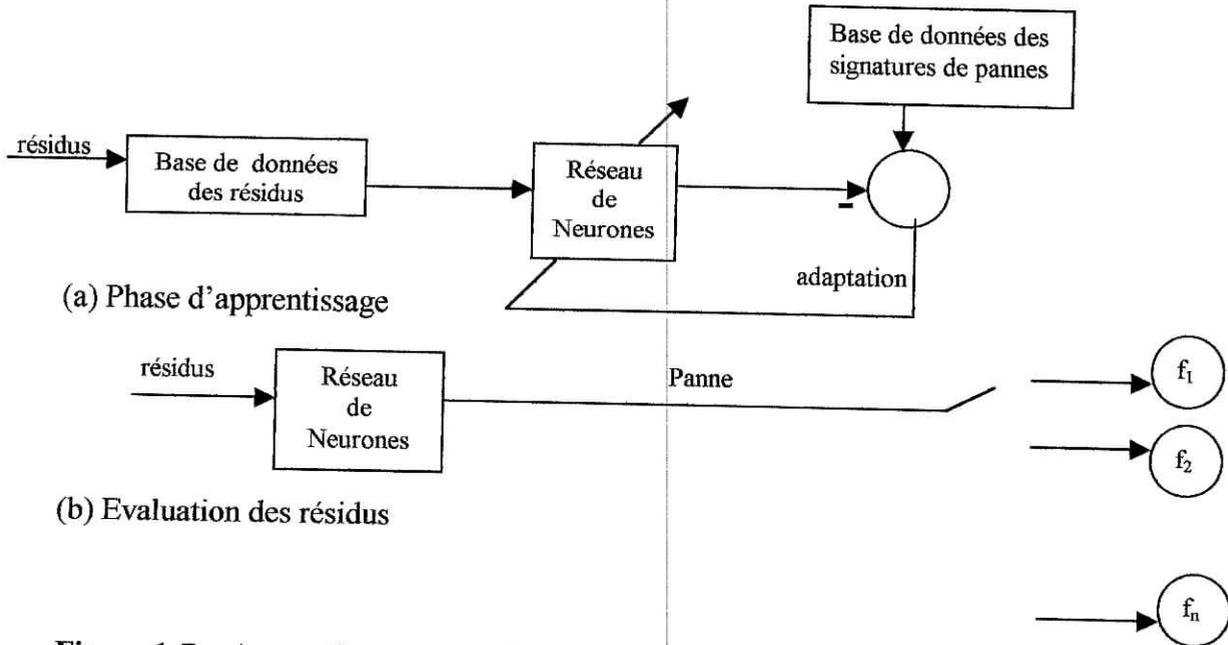
- Génération de résidu

Fig.1-6 Apprentissage et application interactive des réseaux de neurones pour la génération de résidu.

Puis, pour tester le générateur de résidu, il est plus intéressant de relever les signaux d'entrée sortie (u, y) en présence des différentes pannes, ce qui est difficile à obtenir pratiquement. Après apprentissage, le réseau de neurones est prêt pour un générateur de résidu interactif.

**4-1-2 Evaluation des résidus par réseaux de neurones:**

La localisation des pannes par réseau de neurones est effectuée après génération des résidus soit par RNA soit par une méthode analytique. Pour entraîner ces réseaux à cette tâche il faut disposer d'une base de données contenant les résidus et une autre contenant leurs signatures. Après apprentissage le RNA pourra être utilisé pour détecter les anomalies et indiquer si possible leurs causes. Il faut noter que cette technique est aussi utilisable dans le cas où on ne disposerait pas de résidus analytiques mais de symptômes heuristiques.



**Figure 1-7:** Apprentissage et application interactive du réseau de neurones pour l'évaluation des résidus.

**4-2 Evaluation des résidus par logique floue:**

L'évaluation des résidus par logique floue est faite en 3 étapes : les résidus sont floutés puis évalués par un mécanisme d'inférence en utilisant les règles si-alors, puis enfin il y a localisation de défaut par défuzzification.

**La fuzzyfication:**

Un ensemble flou est caractérisé par sa fonction d'appartenance exprimant le caractère graduel de la transition « appartenir » à « ne pas appartenir », il est défini par :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \tag{1.40}$$

avec  $\mu_A(x)$  la fonction d'appartenance de l'élément  $x$  à l'ensemble flou  $A$  de l'univers de discours  $X$  et prenant des valeurs dans l'intervalle  $[0,1]$ .

Pour l'analyse des résidus, on définit les 3 ensembles flous  $r_i^+$  (résidu positif),  $r_i^-$  (résidu négatif),  $r_i^0$  (résidu nul).

La fuzzyfication consiste à attribuer à ces ensembles flous des fonctions d'appartenance :

$$\mu_{r_i^0}(k) = 1 - \frac{[r_i(k)/\tau_i]^\rho}{1 + [r_i(k)/\tau_i]^\rho} \tag{1.41}$$

$$\mu_{r_i^+}(k) = \begin{cases} 0 & \text{si } r_i(k) < 0 \\ 1 - \mu_{r_i^0}(k) & \text{si } r_i(k) > 0 \end{cases} \tag{1.42}$$

$$\mu_{r_i^-}(k) = \begin{cases} 0 & \text{si } r_i(k) > 0 \\ 1 - \mu_{r_i^0}(k) & \text{si } r_i(k) \leq 0 \end{cases} \tag{1.43}$$

avec :

$\rho$  réel pair,  $\tau_i$  : paramètres de forme fixés par l'utilisateur.

**Les inférences:**

La localisation des défauts est basée sur l'analyse conjointe des résidus et des signatures théoriques.

Soit la matrice de signature suivante, relative à 3 résidus et 2 défauts potentiels (la troisième colonne correspond à l'absence de défaut) :

$$\Sigma \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Cette matrice traduit par exemple le fait que le défaut  $f_1$  (correspondant à la 1<sup>ère</sup> colonne) induit une déviation positive du premier résidu, négative du second et n'influe pas le troisième.

Mais, pour localiser un défaut, il faut résoudre le problème inverse ie : déduire des résidus le défaut correspondant. Pour cela, on constitue une base de règles (règles d'inférence floue) à partir de la matrice de signature, ces règles lient les symptômes (déviations de résidus) aux causes (défaut).

Chaque règle comporte une partie prémisse relative aux résidus et une partie conséquence portant sur les défauts, elles sont de la forme : si-alors.

Si (residus) Alors (panne)

A chaque instant et pour chaque règle, le degré de validité de la conséquence doit être évalué en fonction de la validité des prémisses. Différents opérateurs sont proposés: prod, min, moyenne...

**La défuzzyfication:**

Enfin, le défaut le plus probable sera celui décrit par la règle dont le degré de validité est le plus élevé.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de détection et d'isolation de pannes :

*Les techniques basées modèle analytique* : qui permettent une détection rapide ,une sensibilité aux petits défauts et une capacité de découplage des perturbations.

*Les techniques basées modèle qualitatif* : indispensables aux systèmes pour les-quels le modèle mathématique est complexe ,non disponible ou les mesures interactives inaccessibles.

*Les technique utilisant l'intelligence artificielle* : sur lesquels se focalisent les recherches ces dernières années à cause de leurs aptitudes à traiter simultanément les informations quantitatives et les connaissances qualitatives.

*CHAPITRE 2 :*  
***MODELISATION ET COMMANDE  
DU PENDULE INVERSE***

**Introduction :**

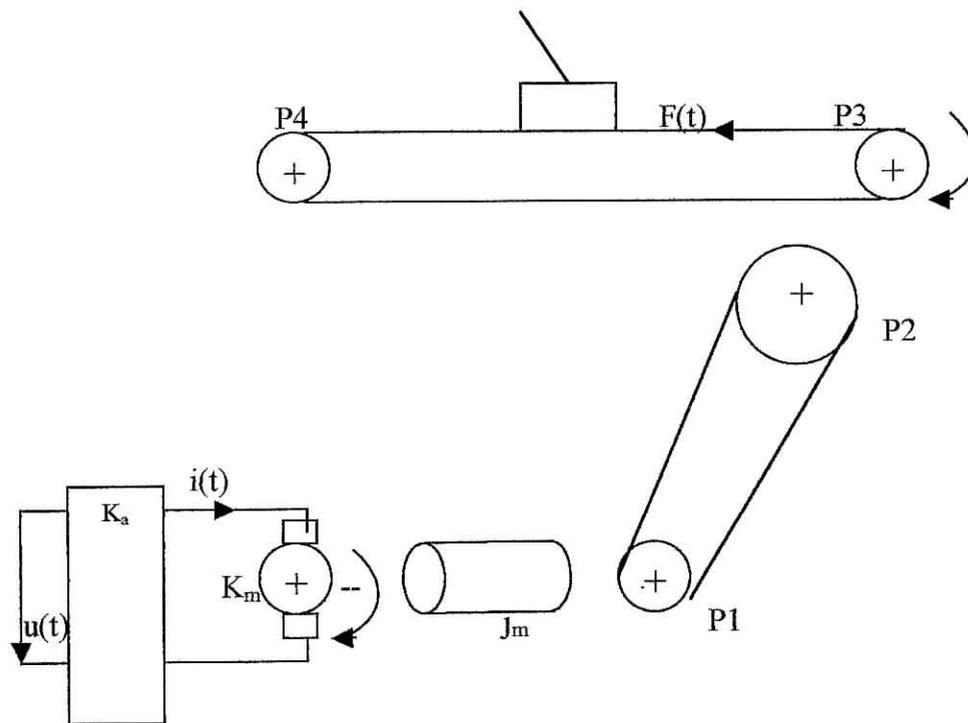
Dans le domaine de la recherche en automatique, on a souvent recours à des cas d'étude particuliers, représentatifs des grandes classes d'applications. Ces outils d'études permettent de comparer de façon valable les avantages et inconvénients des méthodes développées. Le pendule inversé est un de ces outils. Dans ce présent chapitre, on présente une modélisation du pendule inversé puis après linéarisation du modèle autour d'un point de fonctionnement on lui synthétise une commande stabilisante. La commande calculée est appliquée pour le système non linéaire.

**1-Description du pendule inversé [16]:**

Le pendule inversé étudié est constitué d'un chariot mobile, en translation sur un axe horizontal, sur lequel est fixée une tige (le pendule) libre en rotation sur le chariot.

Le système d'entraînement comprend : un moteur à courant continu, son amplificateur, deux poulies (P1, P2) formant le réducteur et deux poulies de renvoi de la courroie (P3, P4).

La force  $F(t)$  appliquée au chariot par l'intermédiaire de la tension de commande  $u(t)$  fait translater celui-ci de  $x$  mètres ainsi qu'une rotation de  $\theta$  radians du pendule.



**Figure 2-1** schéma représentatif des parties mécanique et électrique du pendule inversé.

Les variations de sortie sont mesurées grâce à :

- Un potentiomètre circulaire monté sur l'axe de rotation du pendule, afin de mesurer l'angle que fait le pendule avec la verticale.
- Un potentiomètre linéaire monté sur l'axe de la poulie P4 pour mesurer le déplacement du chariot.
- Une génératrice tachymétrique permettant de mesurer la vitesse longitudinale du chariot.

**2- Modélisation du système :**

La notation suivante est utilisée :

- $l$  :longueur du pendule,  $m$  : masse du pendule,  $M$  : masse du chariot,
- $j$  :inertie du pendule,  $j_k$  : Inertie de la poulie P<sub>k</sub>,  $j_m$  : inertie du moteur,
- $f_p$  :frottement du pendule,  $f_c$  :Frottement du chariot,  $F(t)$  :force appliquée au chariot,
- $\theta(t)$  :position angulaire du pendule,  $x(t)$  : position longitudinale du chariot,
- $\Omega_k$  :vitesse de rotation de la poulie P<sub>k</sub>,  $\Omega_m$  : vitesse de rotation du moteur,
- $K_a$  :gain de l'amplificateur,  $K_m$  : constante de couple.
- $N$  :rapport de réduction,  $r$  : rayon de la poulie P<sub>k</sub>.

**Equations chariot-pendule :**

En exploitant les lois fondamentales de la dynamique, on a :

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{3g}{2l} \sin\theta(t) - \frac{f_p}{4j} \dot{\theta}(t) + \frac{3}{2l} \ddot{x}(t) \cos\theta(t) \tag{2.1}$$

$$\ddot{x}(t) = \frac{F(t)}{m+M} - \frac{f_c}{m+M} \dot{x}(t) + \frac{ml/2}{m+M} [\ddot{\theta}(t) \cos\theta(t) - \dot{\theta}(t)^2 \sin\theta(t)] \tag{2.2}$$

**Equation du système d'entraînement :**

L'équation du mouvement de rotation du moteur s'écrit :

$$j_0 \dot{\Omega}_m(t) = K_a K_m u(t) - \frac{r^3}{N} F(t) \tag{2.3}$$

avec :

$$j_0 = j_m + j_1 + (j_2 + j_3 + j_4) / N^2$$

Comme les accélérations longitudinale du chariot et angulaire du moteur sont reliées entre elles par l'équation :

$$\dot{\Omega}_m(t) = N \dot{\Omega}_3(t) = \frac{N}{r_3} \ddot{x}(t) \quad (2.4)$$

Des équations (2.3) et (2.4), on obtient l'équation de la force en fonction de la tension de commande:

$$F(t) = -\frac{N^2}{r_3^2} j_0 \ddot{x}(t) + \frac{NK_a K_m}{r_3} u(t) \quad (2.5)$$

### 3- Linéarisation des équations :

Les équations (2.1) et (2.2) peuvent être linéarisées autour de  $\theta = \dot{\theta} = x = \dot{x} = 0$ . Les fonctions  $\sin \theta$  et  $\cos \theta$  sont linéarisées en utilisant le développement de Taylor en négligeant les termes d'ordre supérieur à 1. On obtient le modèle linéaire suivant :

$$F(t) = -\frac{N^2}{r_3^2} j_0 \ddot{x}(t) + \frac{NK_a K_m}{r_3} u(t) \quad (2.6)$$

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{3g}{2l} \theta(t) - \frac{f_p}{4j} \dot{\theta}(t) + \frac{3}{2l} \ddot{x}(t) \quad (2.7)$$

$$\ddot{x}(t) = \frac{F(t)}{m+M} - \frac{f_c}{m+M} \dot{x}(t) + \frac{ml/2}{m+M} \ddot{\theta}(t) \quad (2.8)$$

ou encore :

$$\ddot{\theta}(t) = \alpha_0 \theta(t) - \alpha_1 \dot{\theta}(t) + \alpha_2 \ddot{x}(t) \quad (2.9)$$

$$\ddot{x}(t) = -\beta_1 \dot{x}(t) + \beta_2 \ddot{\theta}(t) + \beta_3 F(t) \quad (2.10)$$

$$F(t) = -\gamma_1 \ddot{x}(t) + \gamma_2 u(t) \quad (2.11)$$

avec :

$$\alpha_0 = \frac{3g}{2l} \quad \alpha_1 = \frac{f_p}{j} \quad \alpha_2 = \frac{3}{2l} \quad \beta_1 = \frac{f_c}{M+m} \quad \beta_2 = \frac{ml}{2(M+m)} \quad \beta_3 = \frac{1}{M+m} \quad \gamma_1 = \frac{N^2 j_0}{r_3^2} \quad \gamma_2 = \frac{NK_a K_m}{r_3}$$

La dynamique du système commandé peut être décrite par les variables d'état qui sont les positions et vitesses angulaires et longitudinales :

$$X = [\theta \quad \dot{\theta} \quad x \quad \dot{x}]^T$$

le système peut alors être mis sous la forme d'état suivante :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ y &= CX \end{aligned} \tag{2.12}$$

où :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & a_{42} & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

et :

$$\begin{aligned} a_{21} &= \frac{\alpha_0(1+\beta_3\gamma)}{d} ; a_{22} = \frac{-\alpha_1(1+\beta_3\gamma)}{d} ; a_{24} = \frac{-\alpha_2\beta_1}{d} ; a_{41} = \frac{\alpha_0\beta_2}{d} ; a_{42} = \frac{\alpha_1\beta_2}{d} ; a_{44} = \frac{\beta_1}{d} \\ b_2 &= \frac{\alpha_2\beta_3\gamma}{d} ; b_4 = \frac{\beta_3\gamma}{d} \\ d &= 1 - \alpha_2\beta_2 + \beta_3\gamma \end{aligned}$$

On note que cette modélisation suppose que le moteur à courant continu est idéal, c'est à dire que sa dynamique est très rapide.

#### 4- Commande linéaire quadratique :

Le système pendule-chariot est instable en boucle ouverte ,il faut donc lui synthétiser une commande pour réaliser deux objectifs :

- maintenir le pendule à la position verticale.
- ramener le chariot à une position de référence.

Choisissant une commande par retour d'état pour réaliser les objectifs fixés.

Une commande par retour d'état est une commande proportionnelle à chacune des quatre variables d'état décrivant le système , elle est donnée par :

$$\begin{aligned} u(t) &= u_0 + \Delta u \\ u(t) &= u_0 - K[X(t) - X_r(t)] \\ u(t) &= -K[X(t) - X_r(t)] \end{aligned} \tag{2.13}$$

avec :

$u_0$  : la commande au point d'équilibre, égale à zéro dans notre cas.

$K = [K_\theta \ K_\dot{\theta} \ K_x \ K_{\dot{x}}]$  : Le vecteur contenant les gains associés à chaque variable d'état .

$X_r$  : la trajectoire de référence du vecteur d'état  $X$  .

La synthèse d'une commande optimale se fait en minimisant les écarts quadratiques de l'angle et de l'énergie mise en jeu pour déplacer l'ensemble du pendule-chariot ainsi qu'une poursuite de référence pour la position. On est donc conduit à définir des coefficients de pondération pour chacune des positions et vitesses et pour le signal de commande.

La fonction à minimiser est alors :

$$J(Q,R)=\int_0^{+\infty} [(X(t)-X_r(t))^T Q(X(t)-X_r(t))+Ru(t)^2] dt \tag{2.14}$$

avec :

$Q$  :matrice(4×4) semi définie positive.

$R$  :scalaire positif.

Pour définir les coefficients de pondération, on est limité par les contraintes suivantes :

- limitation de l'angle .
- limitation des rails de guidage (2 m)
- limitation de la tension de commande ( $|u| < 5v$ )

comme on n'est pas limité par les vitesses du chariot et du pendule ,on choisit :

$$Q = \begin{bmatrix} Q_\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Le gain optimal K est obtenu par :

$$K=R^{-1}B^T P \tag{2.15}$$

avec : P solution de l'équation de Riccati :

$$PA+A^T P-PBR^{-1}B^T P+Q=0 \tag{2.16}$$

Pour chaque paire(Q, R) il existe une unique solution P de l'équation de Riccati et la loi de commande stabilise asymptotiquement le système à  $X=[0 ; 0 ; x_r ; 0]$ .En variant Q et R le gain de commande K est différent mais tous les K obtenus sont stabilisants.

Cependant, les performances de la boucle fermée du système (ie : le temps d'établissement, la déviation maximale, l'erreur statique ...) différent.

Pour le système étudié, on conçoit une loi de commande stabilisante en choisissant :

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad R=1$$

On obtient :

$$K = [5.21 \quad 0.78 \quad -2.24 \quad -1.46]$$

L'état du système bouclé est donné alors par :

$$\dot{X}(t) = (A - BK)X(t) \tag{2.17}$$

Les valeurs propres de la matrice d'état qui décrit le système bouclé (A-BK) sont les pôles du système asservi tenant compte des valeurs numériques, ils valent :

$$P_{1,2} = -6.99 \pm j3.71, \quad P_{3,4} = -3.41 \pm j2.43$$

A chacun de ces pôles est associée une constante de temps  $\tau$ , une pulsation d'oscillation  $\omega_p$  et un coefficient d'amortissement  $\xi$  défini par :

$$P_{k,l} = -\frac{1}{\tau} \pm j\omega_p \tag{2.18}$$

$$\xi = \left| \frac{\text{Re}(P_{k,l})}{P_{k,l}} \right| \tag{2.19}$$

On peut en déduire alors des coefficients d'amortissement de 0.88 et 0.81 et des constantes de temps de 0.14s et 0.29s. On peut s'attendre à un régime transitoire de 1.5s.

### 5-Observateur d'état :

Le système étudié ne dispose pas de capteur de vitesse angulaire, il est donc nécessaire d'utiliser un observateur d'état pour estimer la variable manquante. Si on opte pour un observateur d'ordre plein, il va fournir une estimation de tout l'état à l'instant t+1 à partir des informations à l'instant t.

L'observateur d'ordre plein est un système dynamique d'état  $\hat{X}$  défini par la valeur estimée initiale  $\hat{X}(0) = \hat{X}_0$  et une équation différentielle de la forme :

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + Bu + L(y - \hat{y}) \tag{2.20}$$

Où L le gain de l'observateur, est une matrice 4x3.

La sortie prédite, est donnée par :

$$\hat{y} = C\hat{X} \tag{2.21}$$

Si on définit l'erreur d'observation par :

$$e(t) = X(t) - \hat{X}(t) \quad (2.22)$$

on aura alors :

$$\dot{e}(t) = \dot{X}(t) - \dot{\hat{X}}(t) \quad (2.23)$$

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (2.24)$$

Supposant qu'à  $t=0$  on a  $X_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . Pour avoir une bonne estimation de l'état du système réel la dynamique de l'erreur d'observation régit par les valeurs propres de  $(A - LC)$  doit être plus rapide que la dynamique du système avec la commande par retour d'état régit par les valeurs propres de  $(A - BK)$ . On place alors les pôles de l'observateur à  $-60, -60, -30, -30$ .

### **Simulations:**

Nous avons effectué les simulations suivantes :

- $S_1$  : poursuite sur la position du chariot d'une référence échelon d'amplitude 0.5m et angle Initial  $\theta_0 = 0^\circ$  (figure 2-2).
- $S_2$  : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire et angle initial  $\theta_0 = 0^\circ$  (figure 2-3).
- $S_3$  : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire et angle initial  $\theta_0 = -57^\circ$  (figure 2-4).
- $S_4$  : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire et angle initial  $\theta_0 = +57^\circ$  (figure 2-5).

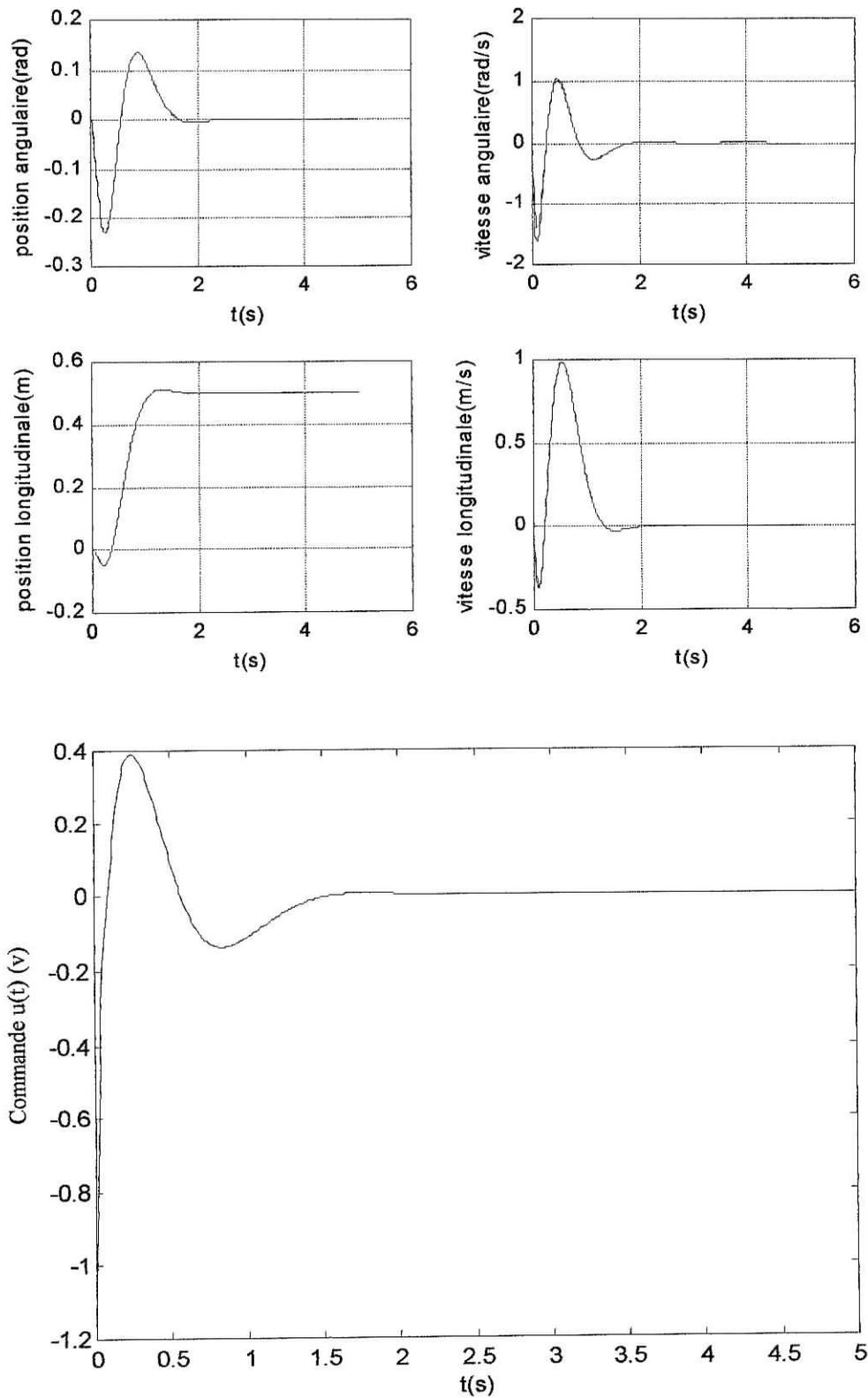


figure 2-2 poursuite d'une référence échelon d'amplitude 0.5m ,  $\theta_0 = 0^\circ$

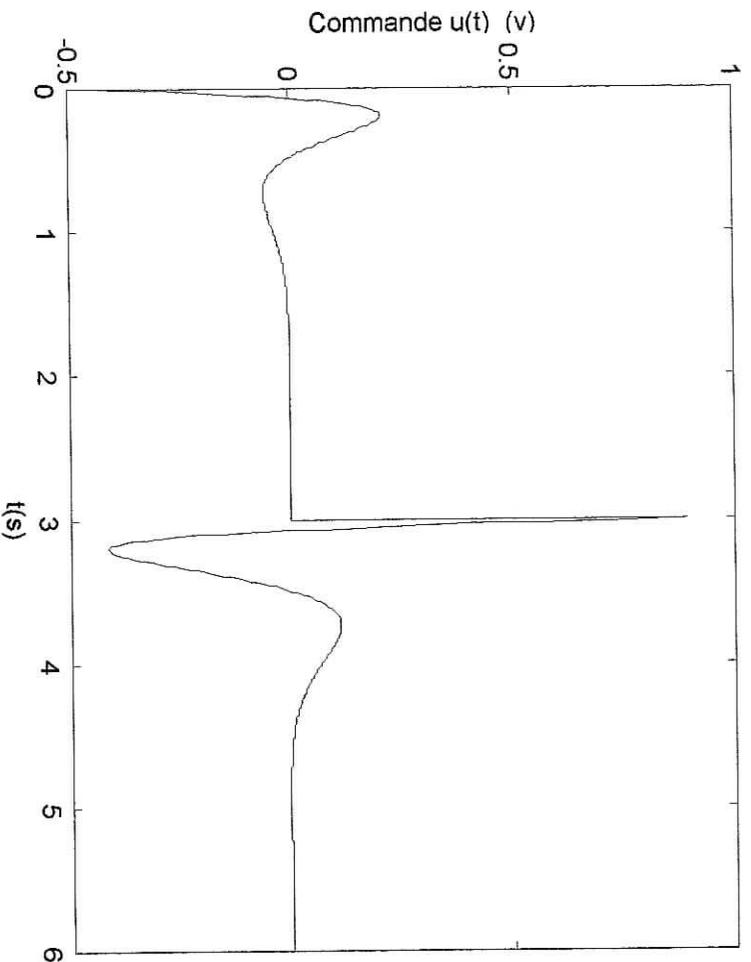
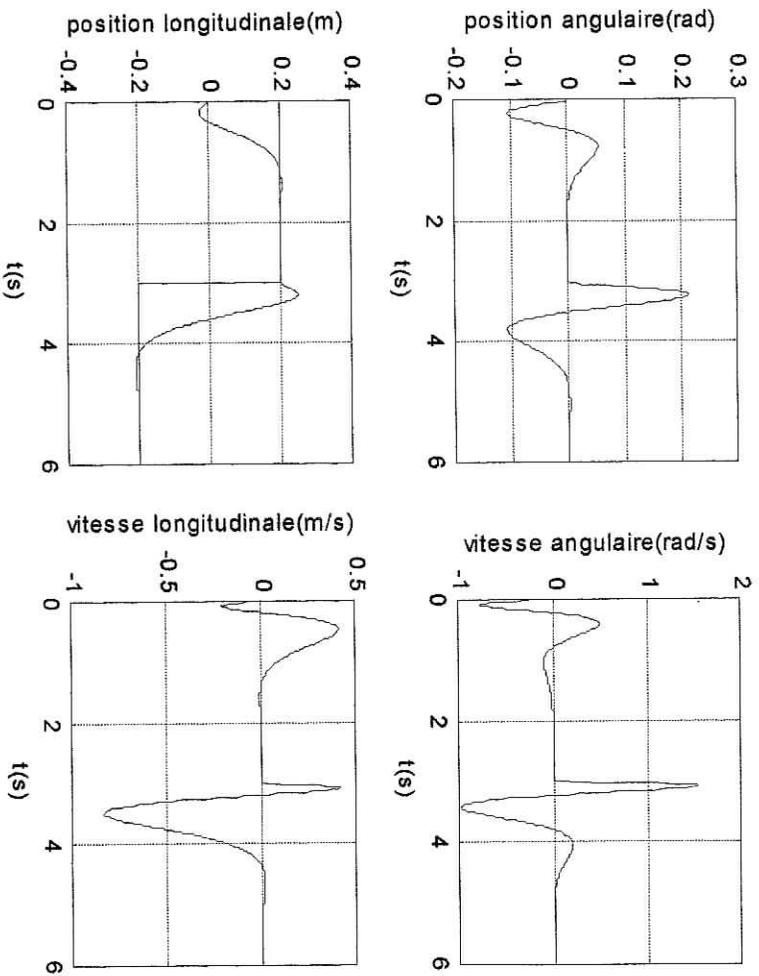


Figure 2-3 poursuite d'une référence rectangulaire,  $\theta_0 = 0^\circ$

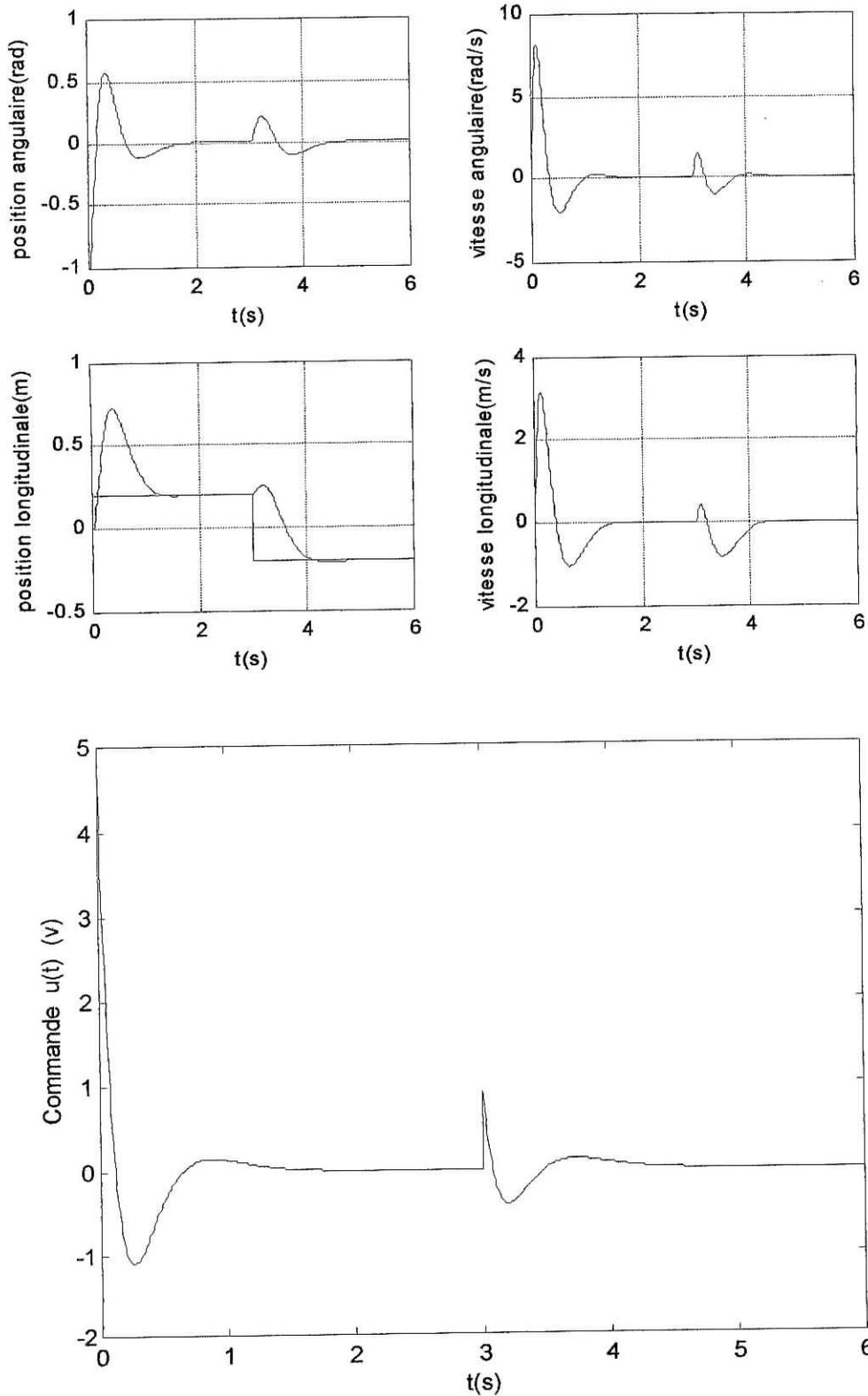


figure 2-4 poursuite d'une référence rectangulaire ,  $\theta_0 = -57^\circ$

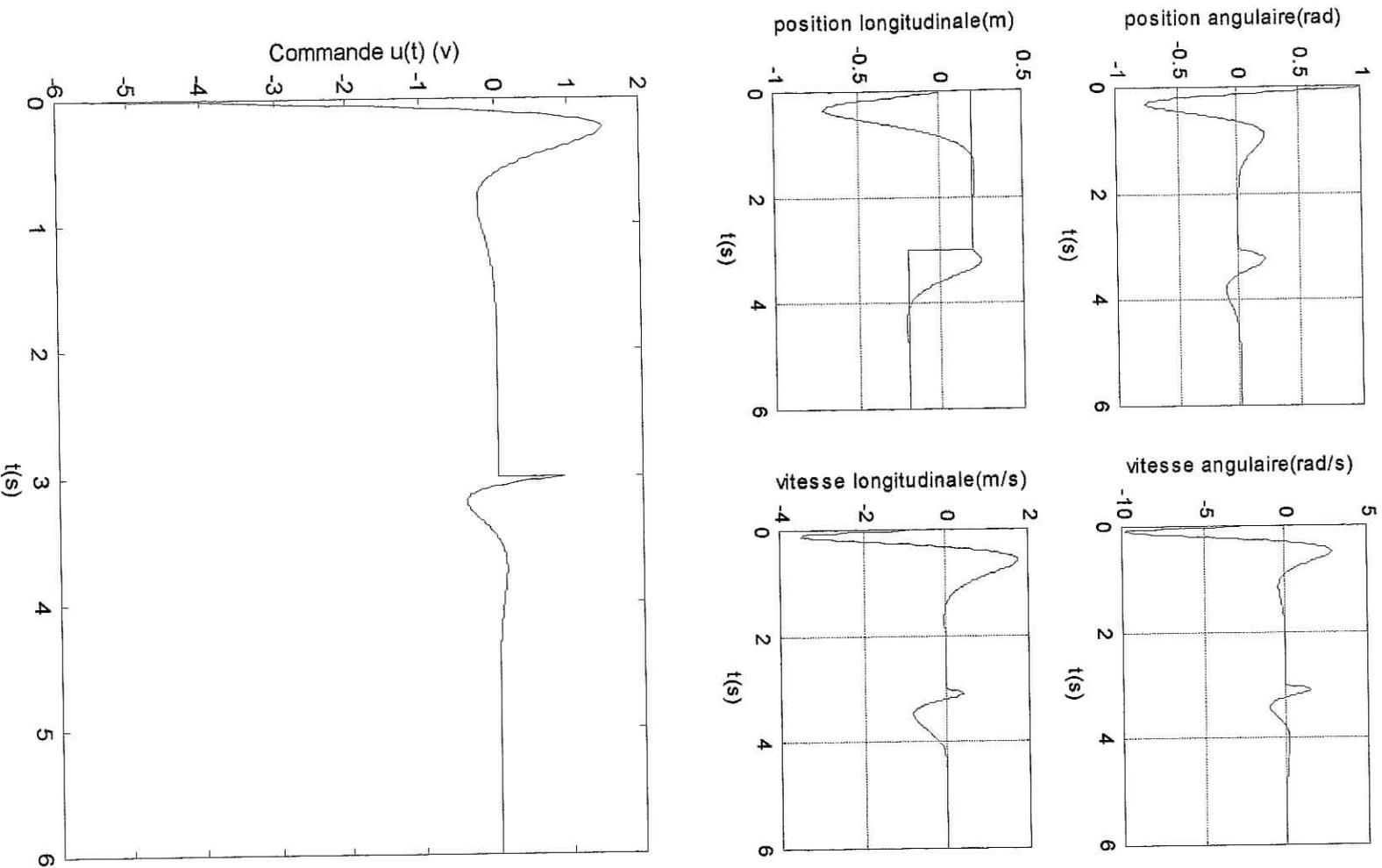


Figure 2-5 poursuite d'une référence rectangulaire,  $\theta_0 = +57^\circ$

**Interprétations :**

-La figure 2-2 représente les résultats de simulations pour la poursuite sur la position du chariot d'une référence  $x_r=0.5m$  avec un angle initial  $\theta_0=0^\circ$ . On remarque que la poursuite se fait d'une manière satisfaisante avec une commande admissible.

-De la figure 2-3 ,on note que le système a un comportement à non minimum de phase.

-Des figures 2-4 et 2-5 représentant les résultats de simulations pour une poursuite d'un signal rectangulaire sur la position  $x$  avec des angles initiaux  $\theta_0=-57^\circ$  et  $\theta_0=+57^\circ$  respectivement, on déduit que la commande calculée a permis d'atteindre les objectifs fixés, avec nécessité de plus d'énergie par rapport à l'énergie nécessaire dans le cas où  $\theta_0=0^\circ$  mais sans pour autant que la tension de commande ne dépasse les limites tolérées ie :  $|u| < 5v$ .

**6-Application sur le système non linéaire :**

Dans ce qui suit on a implémenté la commande obtenue précédemment pour le système non linéaire décrit par les équations (2.6),(2.7),(2.8).

**Simulations:**

Nous avons effectué les simulations suivantes :

- S<sub>4</sub> : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire positive durant le régime transitoire et angle initial  $\theta_0=+39^\circ$  (figure 2-6).
- S<sub>5</sub> : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire positive durant le régime transitoire et angle initial  $\theta_0=+40^\circ$  (figure 2-7).
- S<sub>6</sub> : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire positive durant le régime transitoire et angle initial  $\theta_0=-44^\circ$  (figure 2-8).
- S<sub>7</sub> : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire positive durant le régime transitoire et angle initial  $\theta_0=-45^\circ$  (figure 2-9).
- S<sub>8</sub> : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire négative durant le régime transitoire et angle initial  $\theta_0=-39^\circ$  (figure 2-10).
- S<sub>9</sub> : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire négative durant le régime transitoire et angle initial  $\theta_0=-40^\circ$  (figure 2-11).
- S<sub>10</sub> : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire négative durant le régime transitoire et angle initial  $\theta_0=+44^\circ$  (figure 2-12).
- S<sub>11</sub> : poursuite sur la position du chariot d'une référence rectangulaire négative durant le régime transitoire et angle initial  $\theta_0=+45^\circ$  (figure 2-13).

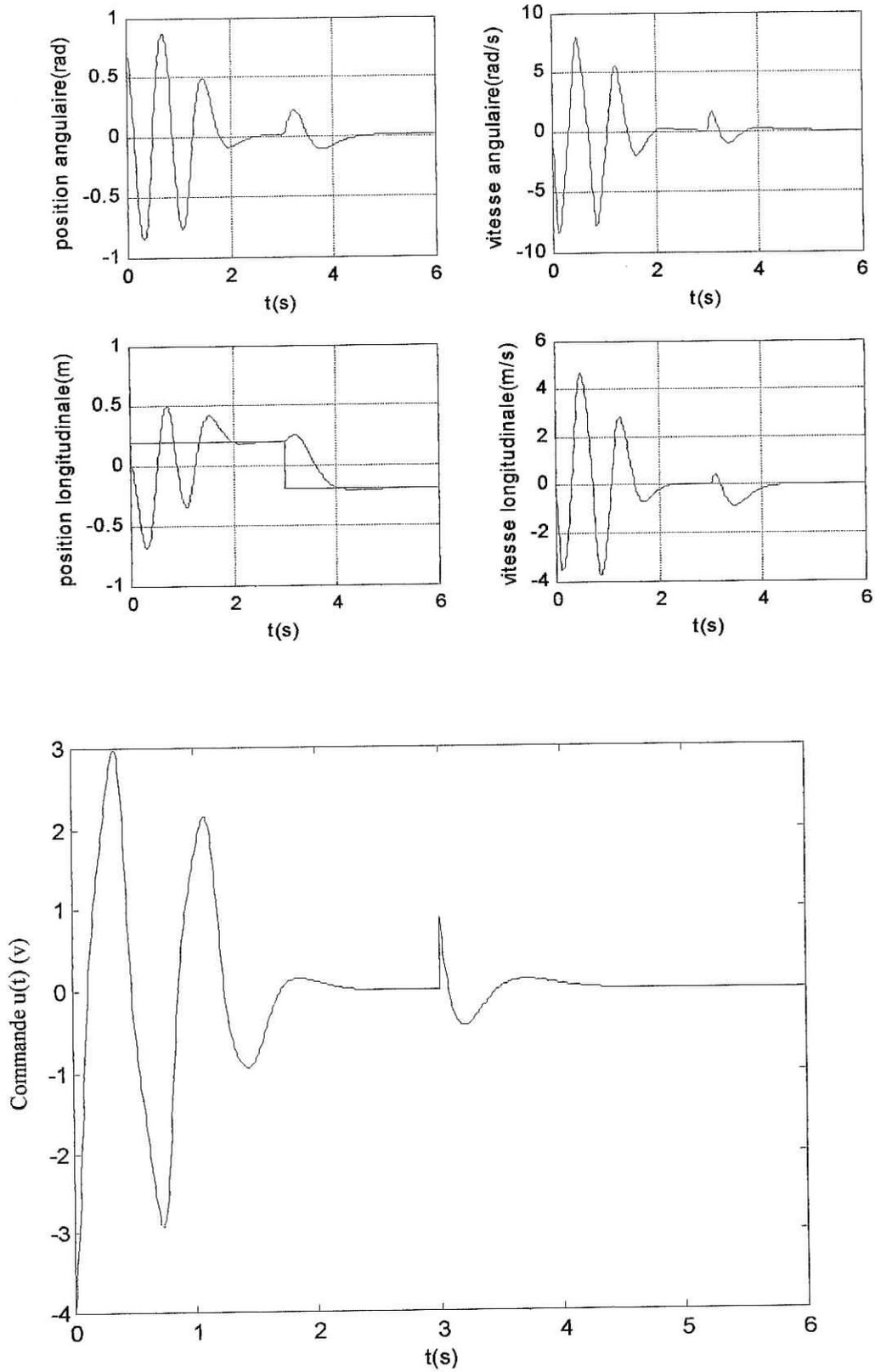


figure 2-6  $\theta_0 = +39^\circ$  et  $ref_0 > 0$

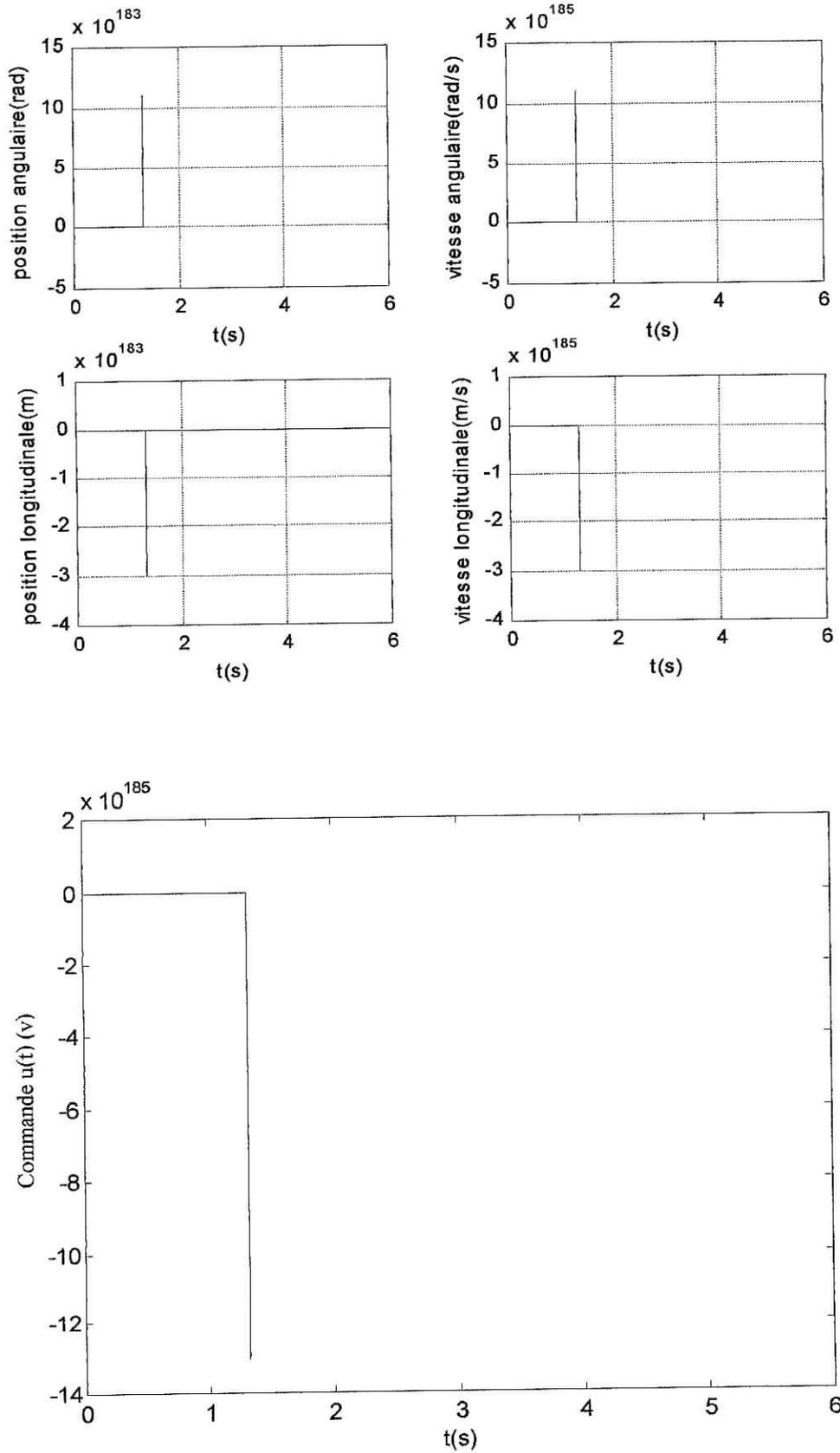


figure 2-7  $\theta_0 = +40^\circ$  et  $ref_0 > 0$

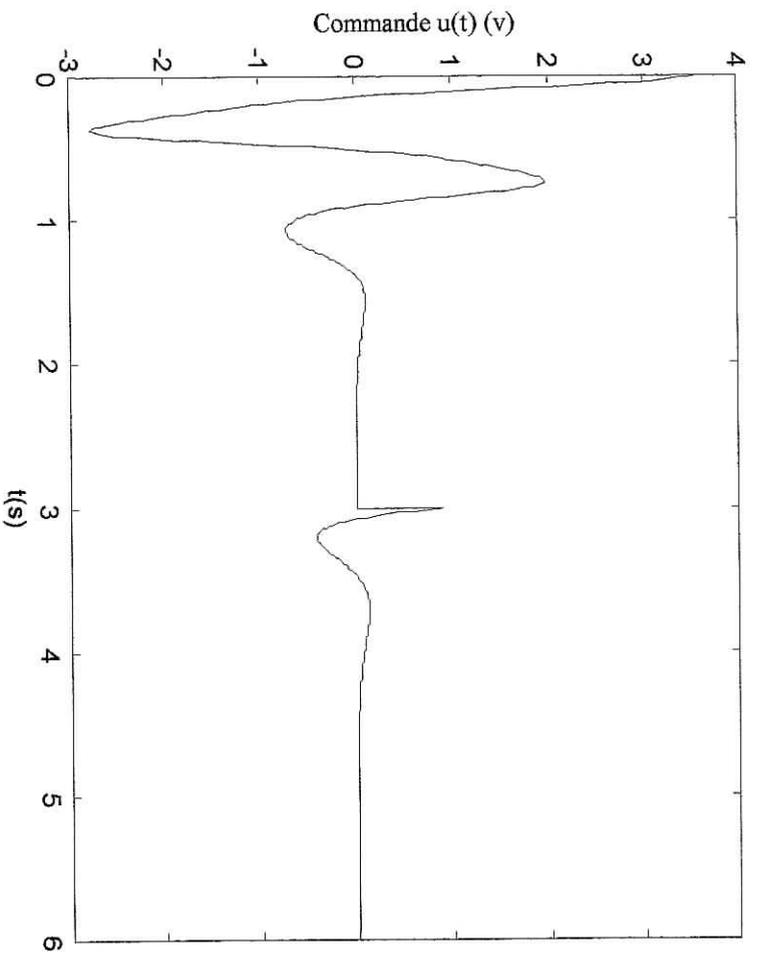
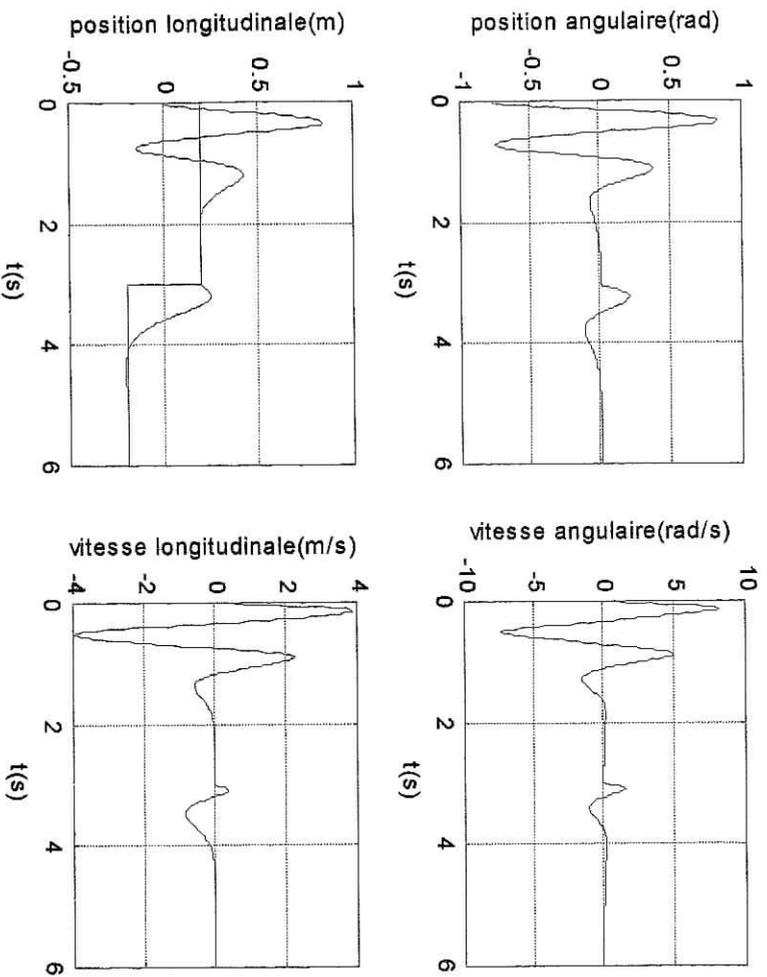


Figure 2-8  $\theta_0 = -44^\circ$  et  $\text{ref}_0 > 0$

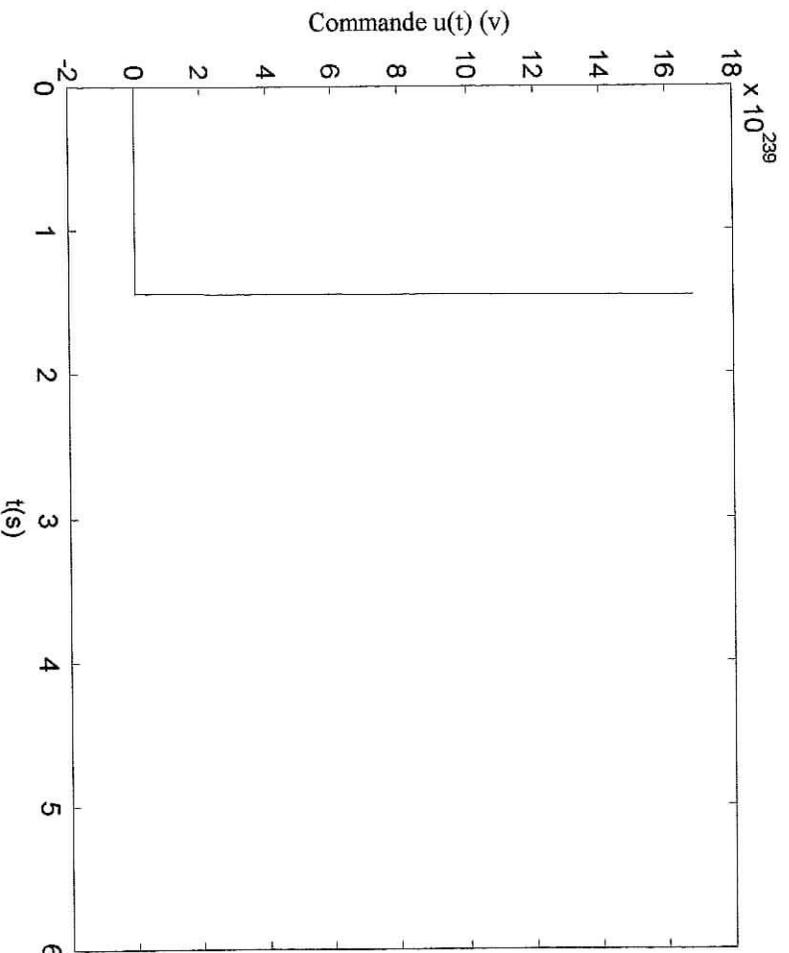
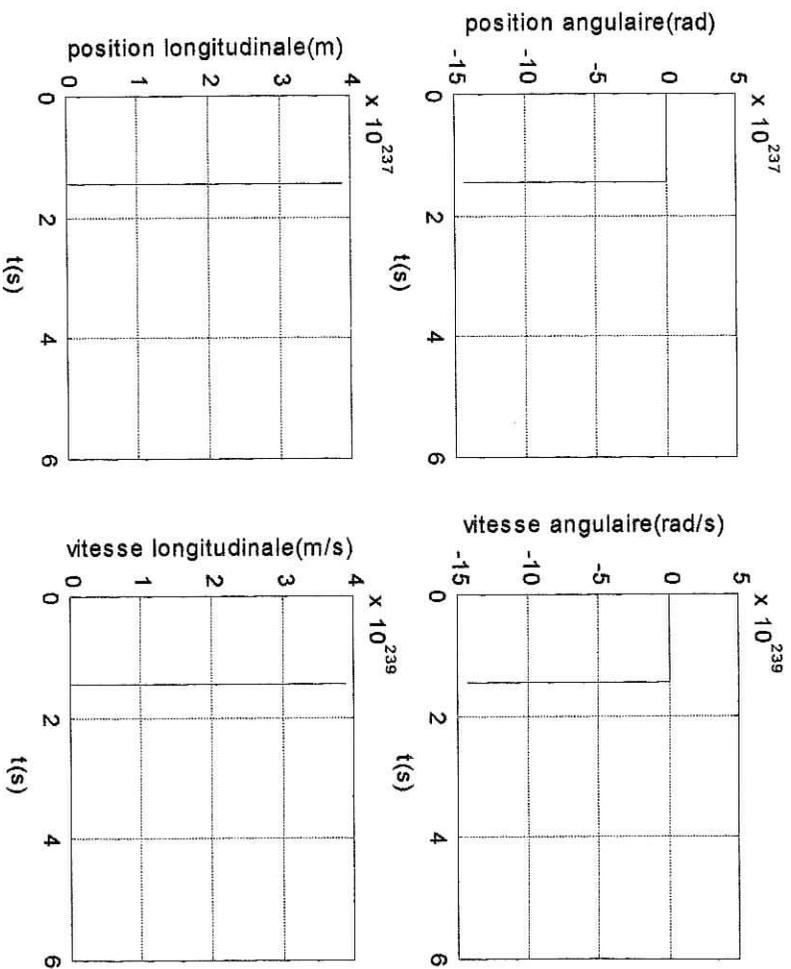


figure 2-9  $\theta_0 = -45^\circ$  et  $ref_0 > 0$

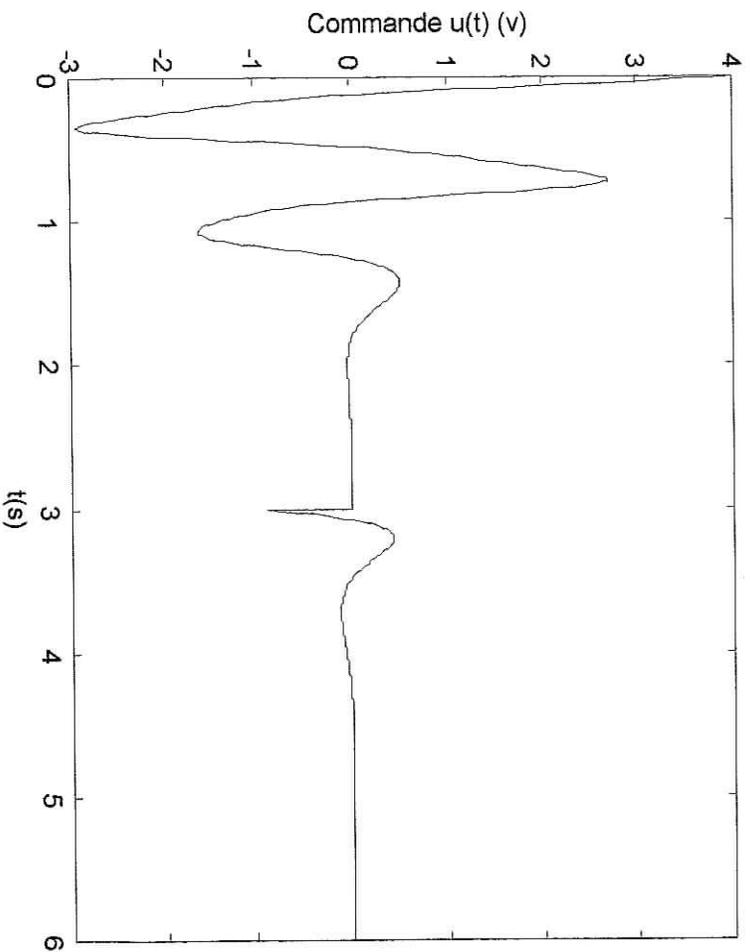
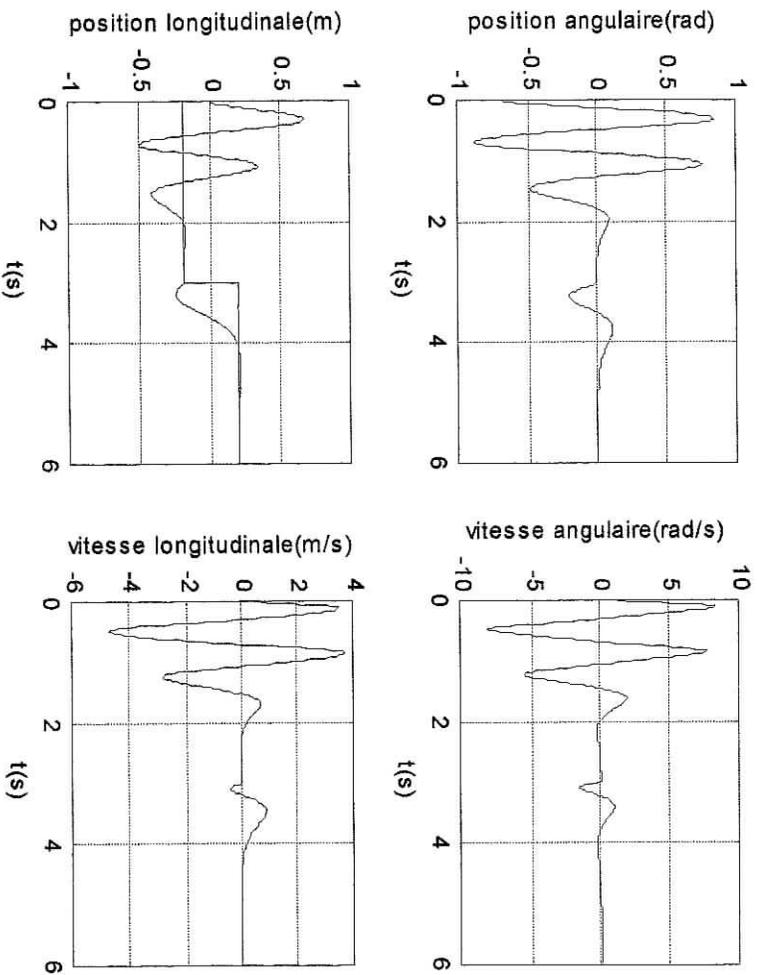


Figure 2-10  $\theta_0 = -39^\circ$  et  $ref_0 < 0$ .

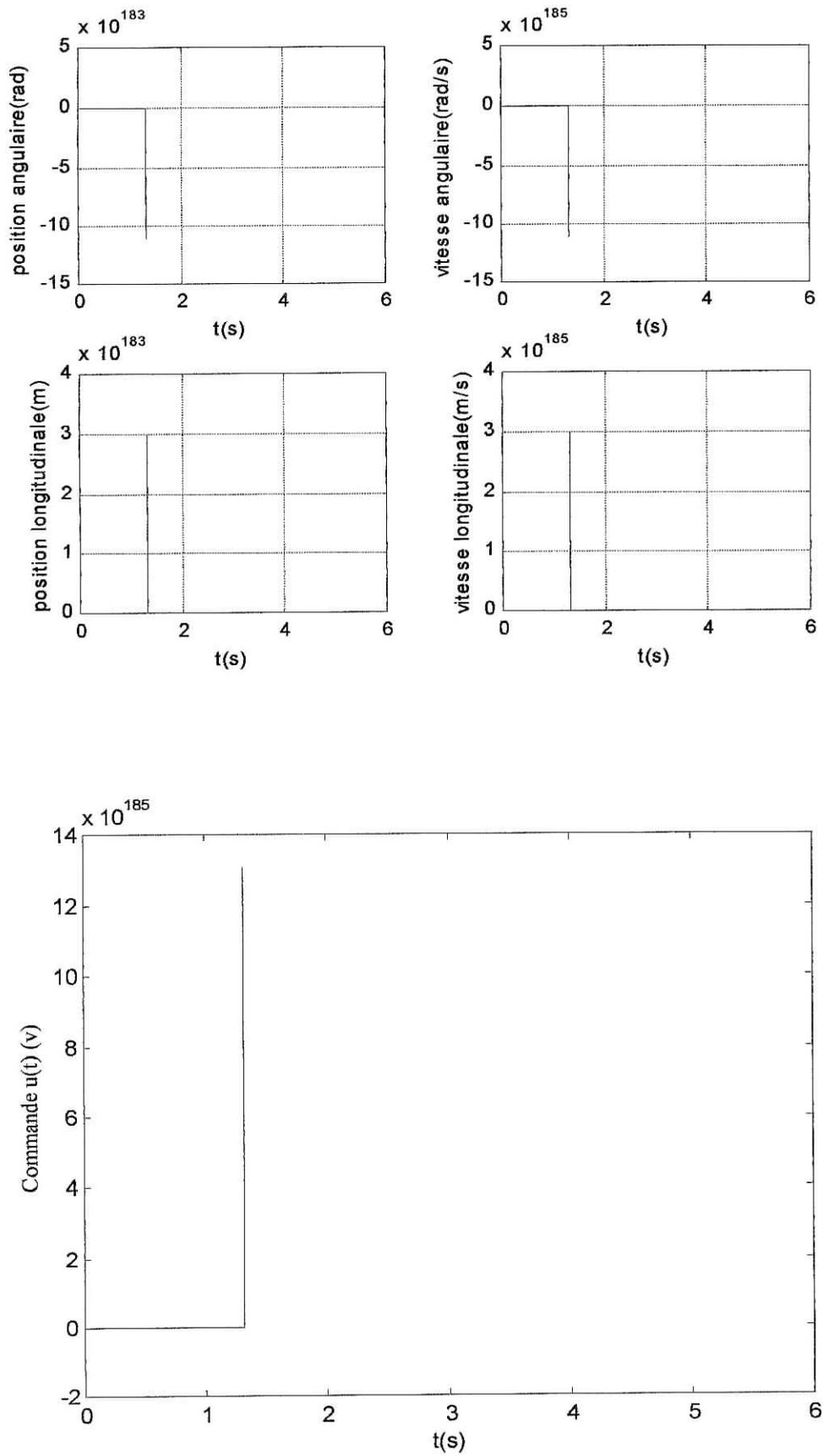


figure 2-11  $\theta_0 = -40^\circ$  et  $ref_0 < 0$ .

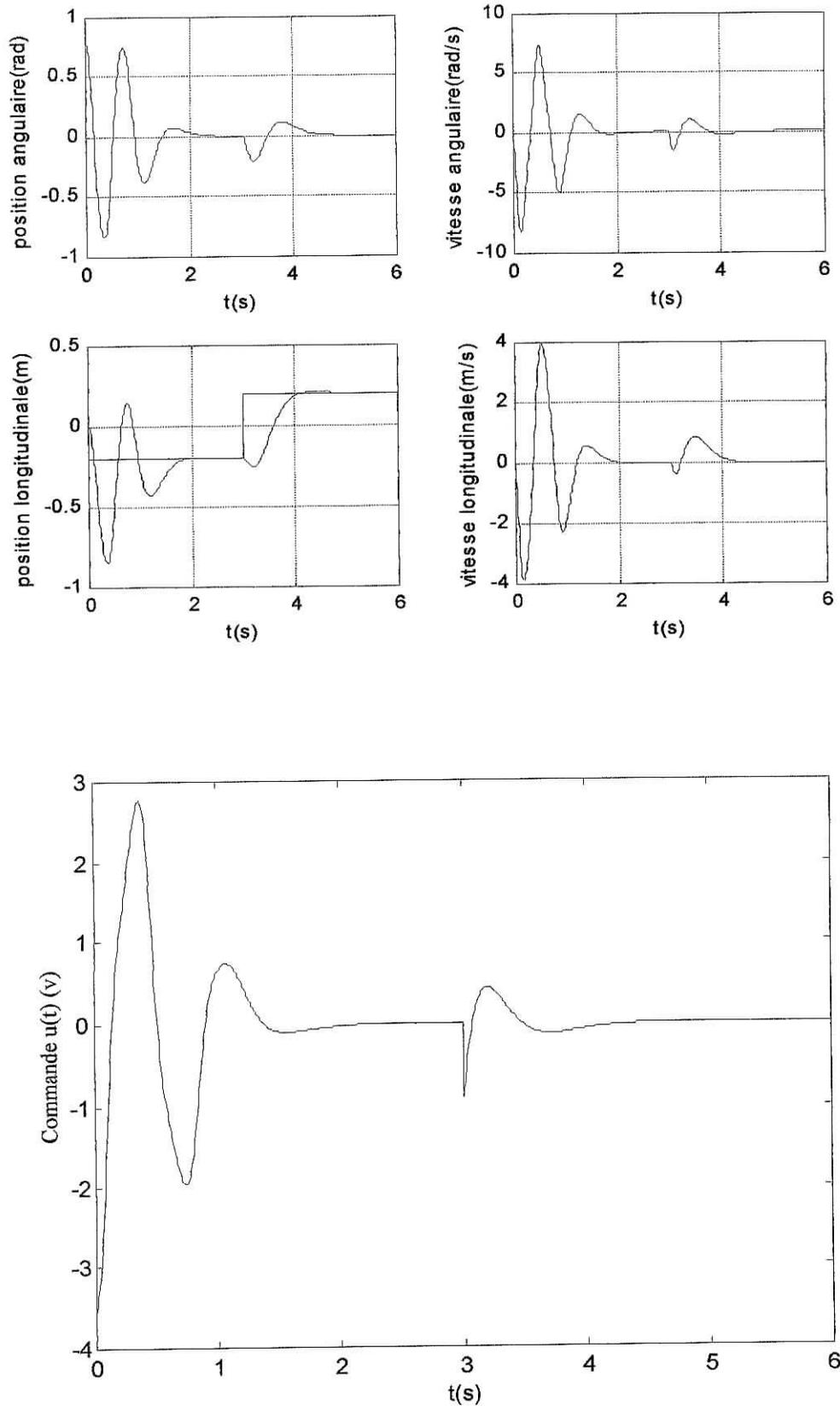


figure 2-12  $\theta_0=+44^\circ$  et  $ref_0 < 0$ .

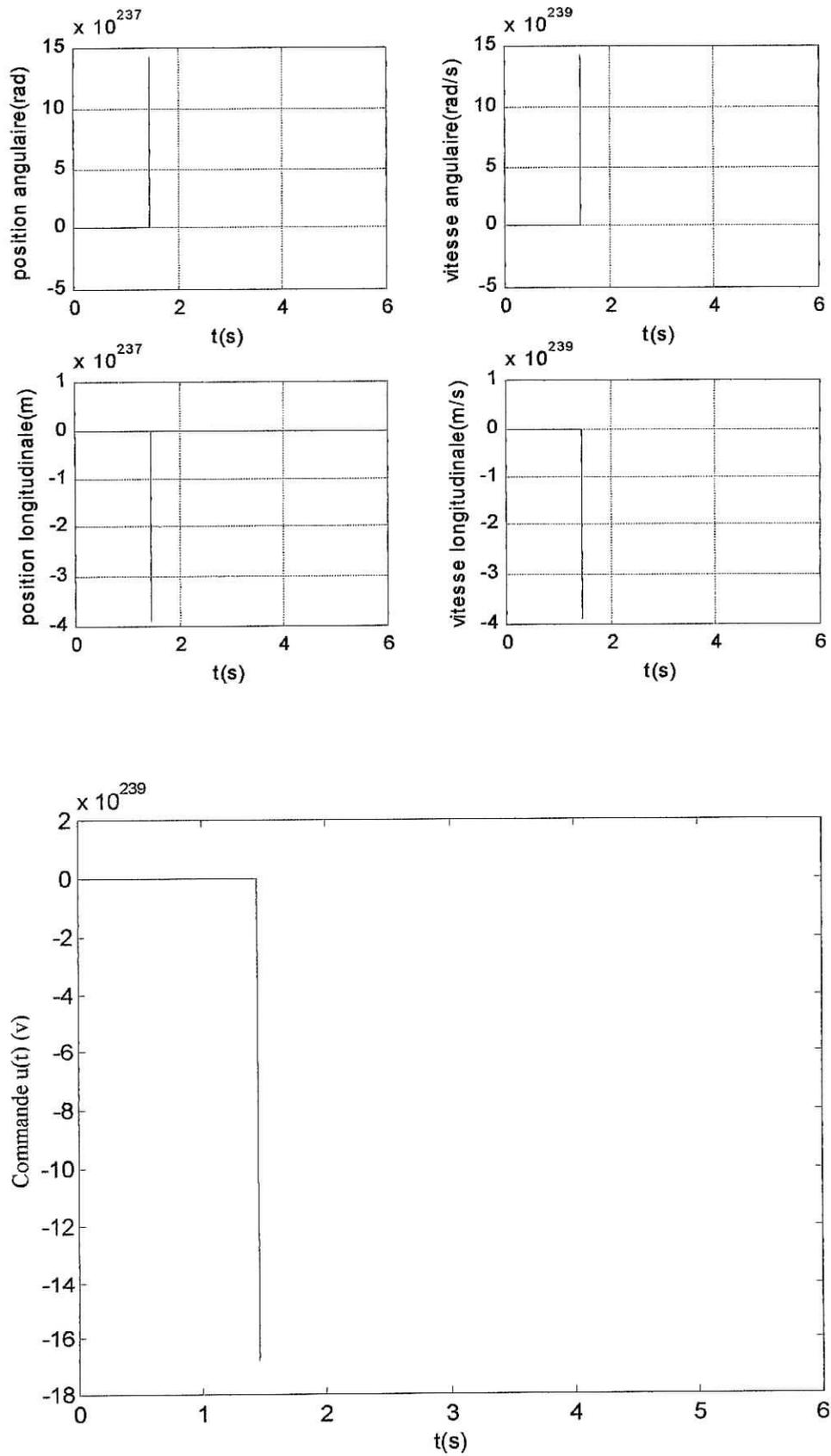


figure 2-13  $\theta_0=+45^\circ$  et  $ref_0 < 0$ .

**Interprétations :**

Des figures :2-6 ;2-7 ;2-8 ;2-9 ;2-10 ;2-11 ;2-12 ;2-13 représentant les résultats de simulations du système non linéaire pour une poursuite de différents signaux de référence sur la position  $x$  avec différents angles initiaux .On note :

-Le régime dynamique du système non linéaire est plus oscillatoire que celui du linéaire.

-L'actionneur est sollicité plus , une plus grande tension de commande est nécessaire afin de répondre aux objectifs fixés pour les mêmes conditions initiales que celles du système linéarisé.

-les objectifs de commande sont atteints avec une commande admissible sous les conditions suivantes :

• $\theta_0 \in [-44^\circ, 39^\circ]$  et poursuite d'une référence positive ( $ref_0 > 0$ ) durant le régime dynamique.

ou

• $\theta_0 \in [-39^\circ, 44^\circ]$  et poursuite d'une référence négative ( $ref_0 < 0$ ) durant le régime dynamique .

Nous pouvons alors conclure que pour le système non linéaire les limites de la commande mise en oeuvre sont obtenus pour un angle  $|\theta| \leq 35^\circ$  . Au-delà de cet intervalle la commande requise est inadmissible.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, après modélisation du pendule inversé puis linéarisation du modèle autour d'un point de fonctionnement nous avons synthétisé une commande linéaire quadratique avec observateur qui répond aux objectifs de régulation du pendule et de la poursuite sur la position du chariot .

Les limites de fonctionnement de la commande mise en oeuvre sont obtenues pour un angle  $|\theta| \leq 55^\circ$  .Au delà de ces valeurs les objectifs fixés ne sont pas atteints.

L'implémentation de cette commande pour le modèle non linéaire du système pendule-chariot a montré que sa validité dépendait et du sens du déplacement du chariot pendant le régime dynamique et de l'angle  $\theta$  .En résumé, les limites de son fonctionnement sont définies pour  $|\theta| \leq 35^\circ$  quelque soit le déplacement du chariot.

*CHAPITRE 3 :*

***SYNTHESE D'OBSERVATEURS  
POUR LE DIAGNOSTIC  
DU PENDULE INVERSE***

**Introduction:**

La détection de pannes par observateurs d'ordre plein ou généralisés consiste à mettre en oeuvre ces filtres pour reconstruire l'état ou une combinaison linéaire de celui-ci afin d'utiliser l'erreur de prédiction ou une fonction de celle-ci comme résidus.

Dans ce présent chapitre, on procède à la synthèse d'un observateur d'ordre plein et des observateurs généralisés afin de générer des résidus sensibles aux pannes pouvant survenir dans le système de commande du pendule inversé : pannes de l'actionneur, des capteurs – de position angulaire, position longitudinale et vitesse longitudinale – et aux défauts des paramètres du système – variation de la masse du chariot et de la masse du pendule-. Enfin, les observateurs construits sont appliqués pour le système non linéaire.

**1- Génération de résidus par observateur d'ordre plein :**

**1-1 Principe :**

Il faut tout d'abord choisir une représentation d'état du système étudié qui considère certaines entrées inconnues comme pannes à détecter et modélise leur influence potentielle sur le système par les matrices  $E_f$  et  $F_f$  et qui considère d'autres entrées inconnues comme perturbations à rejeter et modélise leur influence par les matrices  $E_d$  et.

Soit un système physique représenté par le modèle d'état suivant :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu + E_d d + E_f f \\ y &= CX + Du + F_d d + F_f f \end{aligned} \tag{3.1}$$

où :

$A, B, E_d, F_d, F_f$  : matrices de dimensions appropriées.  
 $X \in R^n, y \in R^p$ .

La structure de l'observateur d'ordre plein est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}} &= A\hat{X} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{X} + Du \end{aligned} \tag{3.2}$$

Si on définit l'erreur d'observation par :

$$e(t) = X(t) - \hat{X}(t) \tag{3.3}$$

on aura alors :

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{X}(t) - \dot{\hat{X}}(t) \\ \dot{e}(t) &= (A - LC)e(t) + (E_d - LF_d)d(t) + (E_f - LF_f)f(t) \end{aligned} \tag{3.4}$$

Pour que cette erreur d'observation converge asymptotiquement vers zéro, il faut choisir: le gain de l'observateur, tel que :  $(A - LC)$  soit stable.

Le résidu sera donné par :

$$\begin{aligned} r(t) &= y(t) - \hat{y}(t) \\ r(t) &= Ce(t) + Fad(t) + Fff(t) \end{aligned} \tag{3.5}$$

### 1-2 Synthèse de l'observateur d'ordre plein :

Pour le diagnostic du pendule inversé, on veut détecter et isoler 6 pannes : pannes de l'actionneur, des capteurs – de position angulaire et de position et vitesse longitudinales – et les variations des masses du chariot et du pendule. on doit alors utiliser un observateur qui génère un vecteur résidu de trois éléments. Ce qui permettra de localiser toutes les pannes dans la mesure où les résultats obtenus le permettent. Car théoriquement avec trois résidus on peut discriminer  $2^3 - 1 = 7$  pannes. Pour obtenir ce vecteur résidu à trois éléments, on est obligé de mesurer trois variables d'état : les positions angulaire et longitudinale et la vitesse longitudinale.

Dans le cas d'un fonctionnement normal, le système pendule-chariot est mis sous la forme d'état suivante :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ y &= CX \end{aligned}$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & a_{42} & 0 & a_{44} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X \tag{3.6}$$

$$X = [\theta \quad \dot{\theta} \quad x \quad \dot{x}]^T$$

où les éléments  $a_{ij}$ ,  $b_i$  sont définis dans le chapitre 2.

#### 1-2-1 Pannes actionneur :

Les défauts actionneur ( $f_a$ ) peuvent être modélisés comme erreur additive au signal de commande. On les introduit sous forme d'échelon d'amplitude 0.1v qui représente 2% de la tension maximum, après établissement du régime permanent à partir de  $t = 2s$ . Le système est alors décrit par la représentation suivante :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu + Bf_a \\ y &= CX \end{aligned} \tag{3.7}$$

le résidu sera alors défini par :

$$r(t) = Ce(t) \tag{3.8}$$

et la dynamique de l'erreur d'observation par :

$$\dot{e}(t) = (A-LC)e(t) + B f_a(t) \tag{3.9}$$

**1-2-2 Pannes capteurs:**

Les pannes capteurs ( $f_c$ ): défaut capteur position angulaire( $f_{\theta}$ ), défaut capteur position longitudinale( $f_x$ ) et défaut capteur vitesse longitudinale( $f_{\dot{x}}$ ) peuvent être modélisés comme erreurs additives au signal de sortie. Le système est alors mis sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ y &= CX + f_c \end{aligned} \tag{3.10}$$

où  $f_c = \begin{bmatrix} f_{\theta} \\ f_x \\ f_{\dot{x}} \end{bmatrix}$

le résidu sera alors donné par :

$$r(t) = Ce(t) + f_c(t) \tag{3.11}$$

et la dynamique de l'erreur d'observation par :

$$\dot{e}(t) = (A-LC)e(t) - Lf_c(t) \tag{3.12}$$

**1-2-2-1 Défauts capteur position angulaire :**

Dans ce cas, on introduit ces pannes sous forme d'échelon d'amplitude 0.05rad( $\approx 3^\circ$ ).

**1-2-2-2 Défauts capteur position longitudinale :**

On introduit ces pannes sous forme d'échelon d'amplitude 0.05m.

**1-2-2-3 Défauts capteur vitesse longitudinale :**

On introduit ces pannes sous forme d'échelon d'amplitude 0.05m/s.

**1-2-3 Variations paramétriques :**

Nous procédons à faire varier la masse du pendule m puis celle du chariot M à partir de t=2s.

**Simulations :**

Les simulations effectuées sont :

- S<sub>1</sub> : Système de commande sans défauts (Figure 3-1).
- S<sub>2</sub> : Système de commande avec panne actionneur  $f_a=0.1v$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-2).
- S<sub>3</sub> : Système de commande avec panne sur le capteur de position angulaire :  $f_{\theta}=0.05$  rad apparu à  $t=2s$  (Figure3-3).
- S<sub>4</sub> : Système de commande avec panne sur le capteur de position longitudinale:  $f_x=0.05m$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-4).
- S<sub>5</sub> : Système de commande avec panne sur le capteur de vitesse longitudinale:  $f_{\dot{x}}=0.05m/s$  apparu à  $t=2s$ (Figure3-5).
- S<sub>6</sub> : Système de commande avec variation de la masse du pendule  $m$  dès  $t=2s$ (Figure3-6).
- S<sub>7</sub> : Système de commande avec variation de la masse du chariot  $M$  dès  $t=2s$ (Figure3-7).

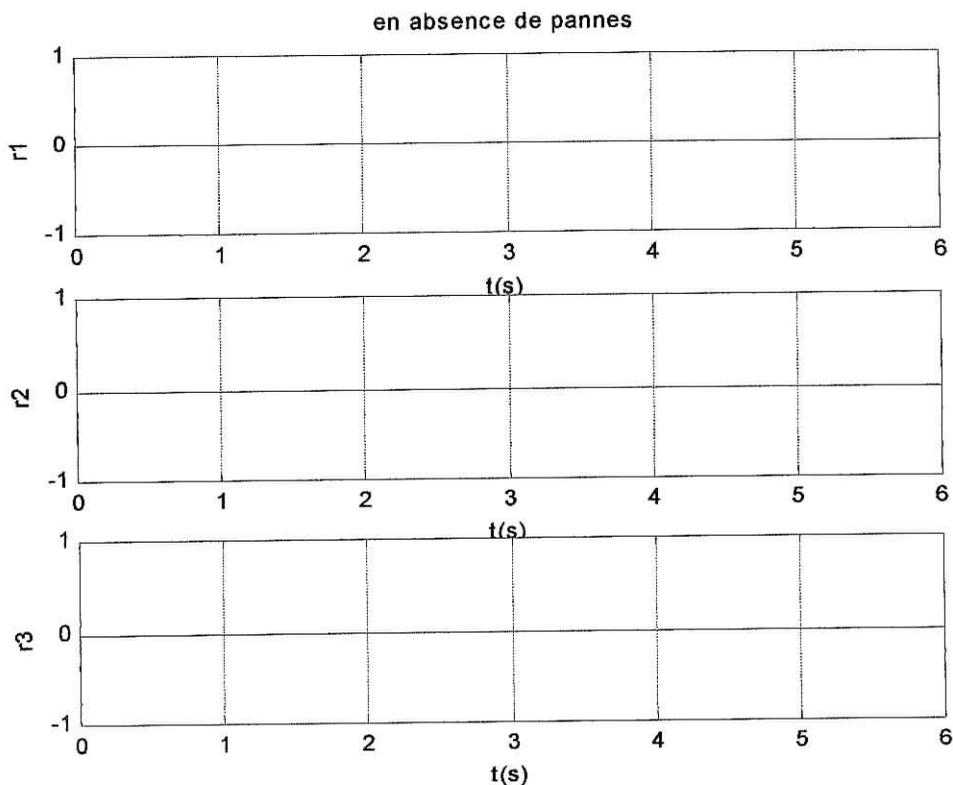


figure 3-1

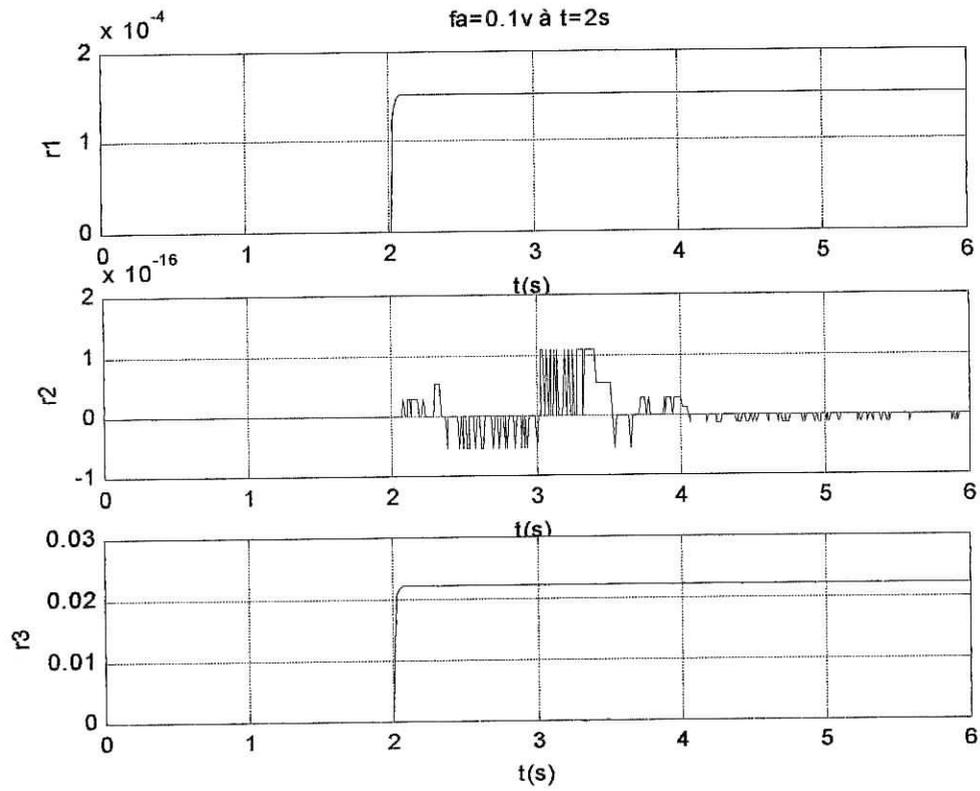


Figure 3-2

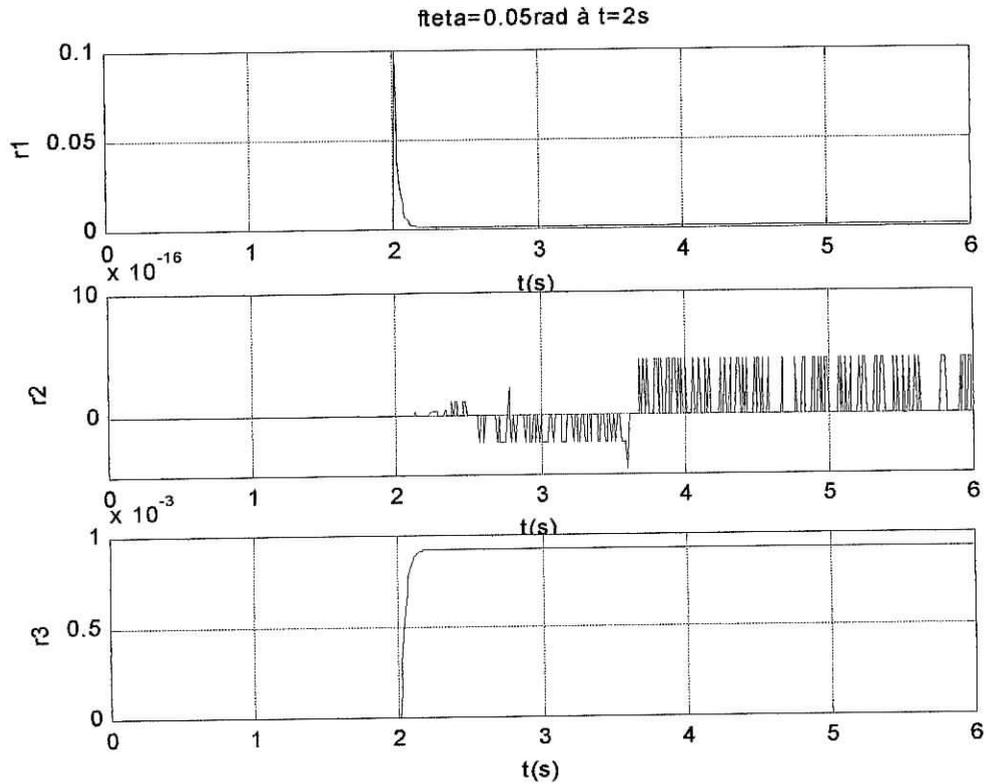


Figure 3-3

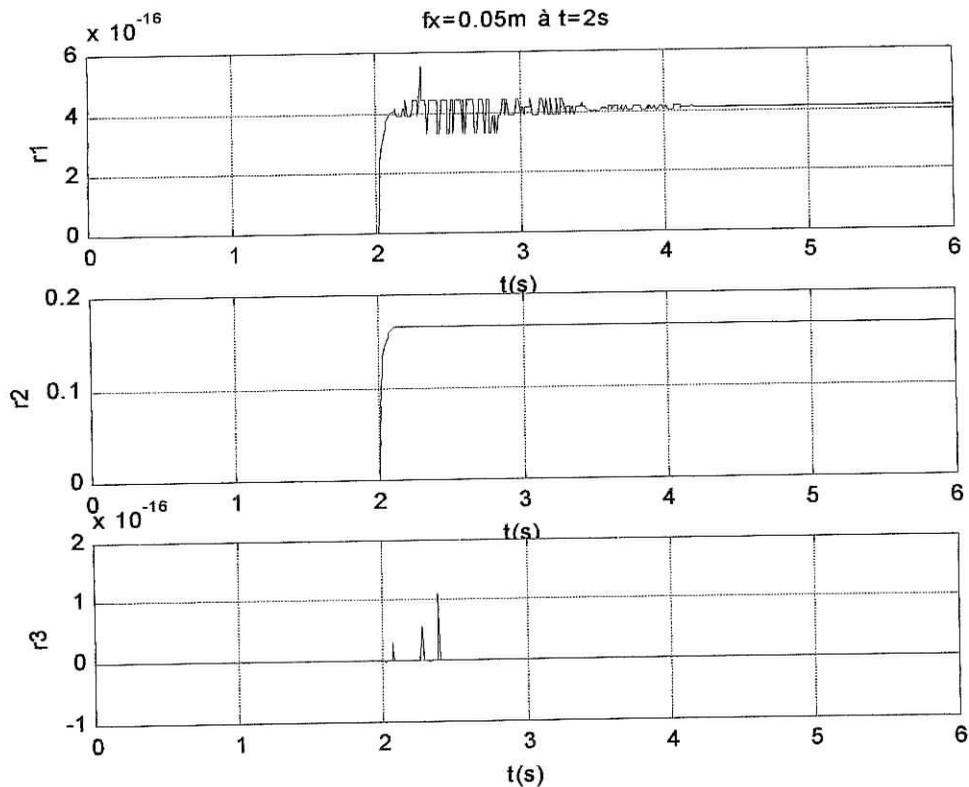


Figure 3-4

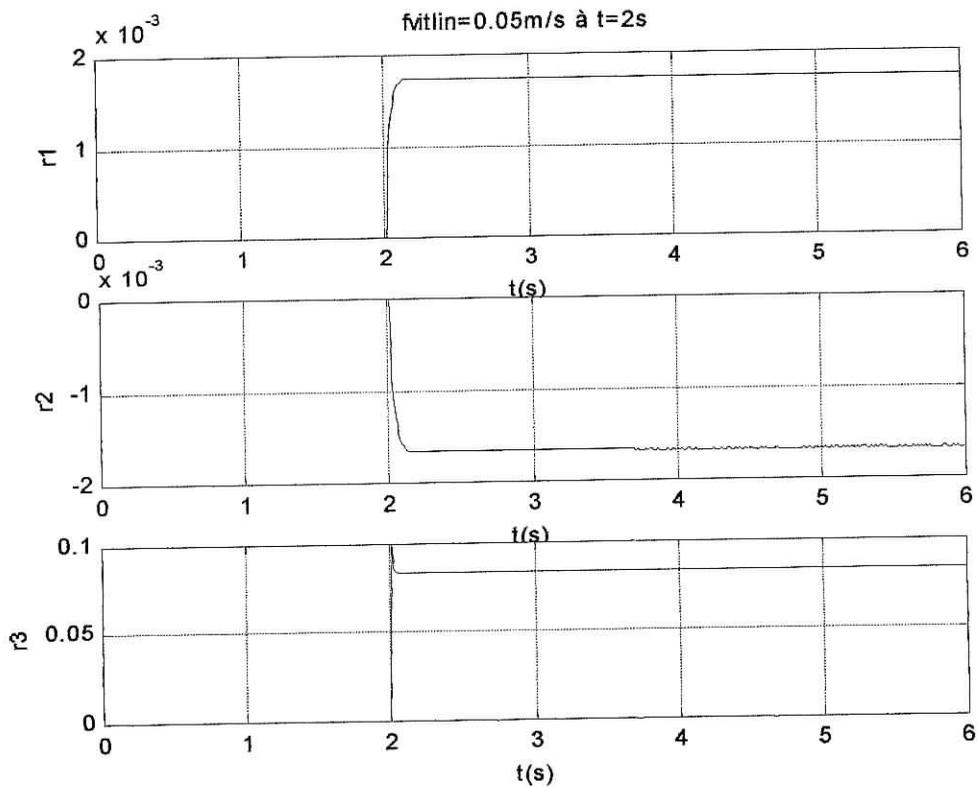


Figure 3-5

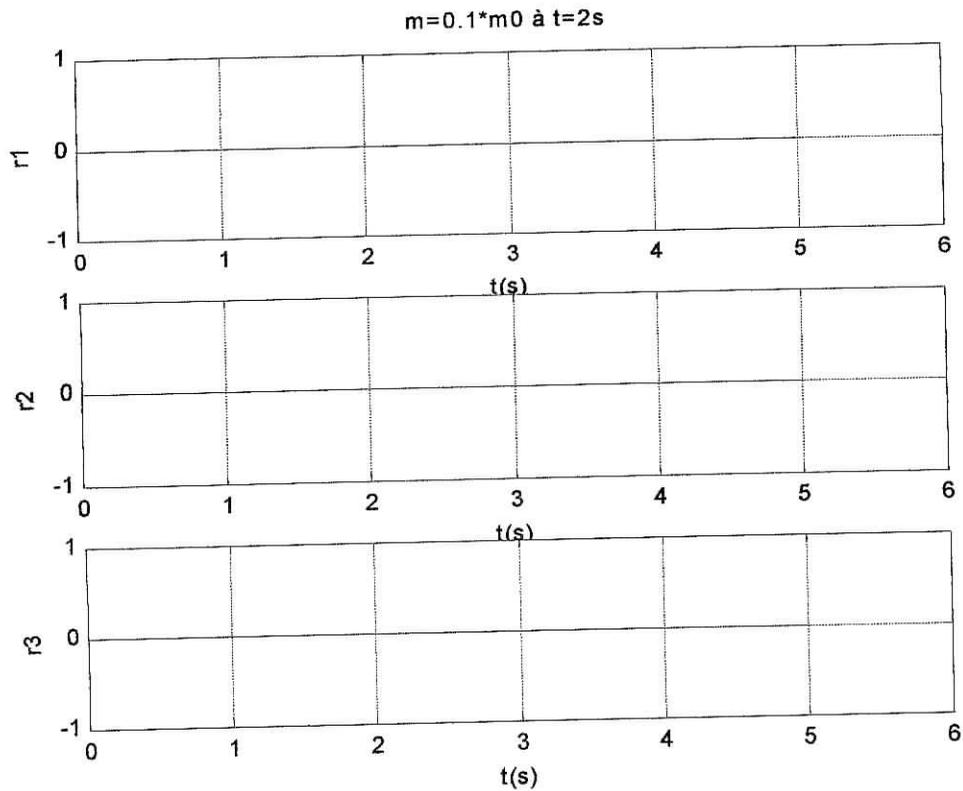


Figure 3-6

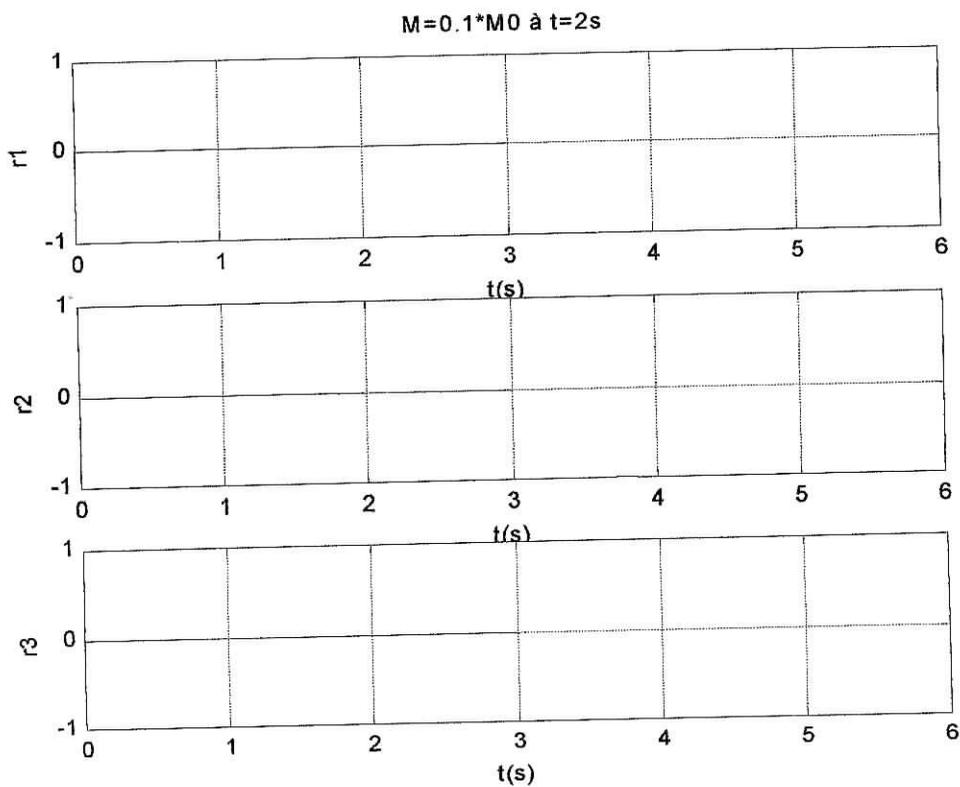


Figure 3-7

**Interprétations:**

- Les trois résidus sont nuls en l'absence de toutes pannes (figure 3.1).
- On remarque que le résidu  $r_2$  est insensible aux défauts actionneur, tandis que  $r_1$  et  $r_3$  sont affectés, ils répondent en exponentielle(figure 3.2)
- On note une insensibilité de  $r_2$  à une panne du capteur de position angulaire alors que  $r_1$  et  $r_3$  sont affectés,  $r_1$ répond d'une manière impulsionnelle : il s'écarte du zéro lors de l'apparition de la panne à  $t=2s$  puis y revient rapidement tandis que  $r_3$  répond en exponentielle(figure 3.3).
- $r_3$  et  $r_1$  sont insensibles à une panne du capteur de position longitudinale alors que  $r_2$  est affecté, à partir de  $t=2s$  il varie en exponentielle(figure 3.4).
- Si une panne survient sur le capteur de vitesse longitudinale, les trois résidus sont affectés. Dès l'apparition de la panne, ils évoluent en exponentielles(figure 3.5).
- On note que les variations paramétriques ne peuvent pas être détectées même si elles atteignent 90% des valeurs initiales. On explique le fait comme suit :

Si les défauts apparaissent comme des changements de paramètres  $\Delta A$  et  $\Delta B$ , la représentation d'état du système sera donné par :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= (A + \Delta A)X + (B + \Delta B)u \\ y &= CX \end{aligned} \tag{3.13}$$

la dynamique de l'erreur d'observation par :

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{X}(t) - \dot{\hat{X}}(t) \\ \dot{e}(t) &= (A + \Delta A)X + (B + \Delta B)u - A\hat{X} - Bu - L(CX - C\hat{X}) \\ \dot{e}(t) &= (A - LC)e + \Delta A X + \Delta B u \end{aligned} \tag{3.14}$$

et le résidu par :

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) = Ce \tag{3.15}$$

Les défauts  $\Delta A$  et  $\Delta B$  sont alors des défauts multiplicatifs qui n'influencent pas directement les résidus, les changements sur ces derniers dépendent des variations des paramètres de l'état et de la commande. Dans le cas étudié comme on introduit les défauts système après établissement du régime permanent et le système pendule-chariot travaillant autour de  $u_0 = \theta = \dot{\theta} = \dot{x} = 0$  la détection n'est pas possible malgré que  $x = x_r$  car  $\Delta m$  et  $\Delta M$  ne sont pas affecté par  $x_r$ .

2-Prise de décision:

Pour affirmer ou infirmer qu'un résidu est nul, on doit appliquer des règles appelées tests statistiques qui permettent une prise de décision à partir des résultats expérimentaux. Pour prendre cette décision, il est commode d'émettre deux hypothèses :

L'hypothèse nulle  $H_k^0$  : on testera alors si la valeur moyenne du résidu  $r_k(k=1,2,3)$  est nulle. Plusieurs tests existent dans la littérature[15] : test progressif de Wald, test de Page, etc....

L'hypothèse alternative  $H_k^1$  définie comme la négation de  $H_k^0$ .

Puis, après acceptation ou rejet des hypothèses chaque décision conduit à une valeur binaire :

- 0 : si la valeur moyenne du résidu  $r_k$  est nulle.
- 1 : si la valeur moyenne du résidu  $r_k$  est différente de zéro

L'ensemble de ces valeurs binaires forme un vecteur binaire appelé **signature de défaut** qui permet de localiser les pannes.

table de signature résidus/défauts :

résidu / défaut		$r_1(t)$	$r_2(t)$	$r_3(t)$
$f_a$		1	0	1
$f_{\dot{\theta}}$		1	0	1
$f_x$		0	1	0
$f_{\dot{x}}$		1	1	1
$\Delta M$	$\Delta m$	0	0	0

Logique de décision :

En utilisant la table de signature des résidus/défauts générés par l'observateur d'ordre plein, on peut détecter et localiser les pannes des capteurs de position et vitesse longitudinales par contre les défauts actionneur et ceux du capteur de position angulaire sont détectés mais ne peuvent pas être isolés. Tandis que les pannes système ne peuvent même pas être détectées.

D'après cette table, on peut déduire trois décisions différentes correspondant aux trois signatures suivantes :

- (1,0,1) pour un défaut actionneur ou du capteur de position angulaire.
- (0,1,0) pour un défaut du capteur position longitudinale.
- (1,1,1) pour un défaut du capteur vitesse longitudinale.

Comme l'observateur d'ordre plein ne permet pas de discriminer entre les pannes actionneur et celles du capteur de position angulaire, on doit synthétiser des observateurs généralisés dédiés aux pannes que l'on veut localiser.

3-Génération de résidus par observateurs généralisés :

3-1 Principe :

Après avoir mis le système étudié sous forme d'état suivante en considérant certaines entrées inconnues comme pannes à détecter et d'autres comme perturbations à découpler :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu + Ead + E_{ff} \\ y &= CX + Du + Fad + F_{ff} \end{aligned}$$

Pour générer le résidu on doit régler les paramètres de l'observateur qui estime une combinaison du vecteur d'état  $z=TX$  et dont la structure est la suivante :

$$\dot{\hat{z}} = N\hat{z} + Mu + Gy \tag{3.16}$$

On note que dans ce cas la signification physique de l'observateur n'est pas importante.

Le résidu généré sera donné par :

$$\begin{aligned} r(t) &= P\hat{z}(t) + Uu(t) + Ky(t) \\ r(t) &= P\hat{z}(t) + KCx(t) + Uu(t) + KDu(t) + KFad(t) + KF_{ff}(t) \end{aligned} \tag{3.17}$$

et la dérivée de l'erreur d'observation vérifie :

$$\begin{aligned} \dot{e}_z &= \dot{\hat{z}} - \dot{z} = \dot{\hat{z}} - T\dot{x} \\ \dot{e}_z &= N\hat{z} + Mu + Gy - T\dot{x} \\ \dot{e}_z &= N\hat{z} + Mu + Gy - T[AX + Bu + Ead + E_{ff}] \\ \dot{e}_z &= NT\hat{x} + Mu + Gy - TAx - TBu - TEad - TE_{ff} \\ \dot{e}_z &= NT\hat{x} + Mu + GCx + GDu + GFad + GF_{ff} - TAx - TBu - TEad - TE_{ff} \\ \dot{e}_z &= NT\hat{x} + (GC - TA)x + (M + GD - TB)u + (GF_a - TE_a)\dot{a} + (GF_f - TE_f)f \end{aligned} \tag{3.18}$$

Pour synthétiser les paramètres de l'observateur on doit résoudre le système suivant :

- $NT = TA - GC$  : condition de convergence de l'erreur d'observation
- $M = TB - GD$  : condition de découplage de l'erreur d'observation vis à vis des entrées u
- $GF_a - TE_a = 0$  : condition de découplage de l'erreur d'observation vis à vis des entrées d
- $PT = -KC$  : condition de couplage résidu-erreur d'observation.
- $U = -KD$  : condition de découplage du résidu vis à vis de u
- $KF_a = 0$  : condition de découplage du résidu vis à vis de d

Afin de résoudre le système d'équations précédent on procède comme suit :

1 - On doit résoudre l'équation de découplage de la dérivée de l'erreur d'observation vis à vis de l'entrée inconnue  $d$  :  $GF_d - TE_d = 0$   
Ce qui imposera (la matrice ou le vecteur) T ou G ou donnera une relation reliant les deux.

2 - Après avoir choisi N la dynamique de l'erreur d'observation, de la relation précédente et de condition de convergence de l'erreur de l'observation  $NT = TA - GC$  on déduit T et G.

3 - Après fixation de T et G on calcule M de la condition de découplage de l'erreur d'observation vis à vis des entrées connues  $u$  :  $M = TB - GD$

4 - Comme le résidu doit être indépendant des perturbations, on doit trouver K qui vérifie :  $KF_d = 0$  et  $PT = -KC$  : la condition de couplage de résidu avec l'erreur d'observation (avec P dynamique du résidu choisit).

5 - Après calcul de K, on impose  $U = -KD$  pour assurer le découplage du résidu vis à vis des entrées connues  $u$ .

Après avoir vérifié les contraintes de synthèse, l'erreur d'observation et le résidu sont donnés par :

$$\dot{e}_z = NT(\hat{X} - X) + (GF_f - TE_f)f \tag{3.19}$$

$$r = PT(\hat{X} - X) + KF_f f \tag{3.20}$$

On peut alors conclure que pour qu'il ait détection de pannes, il faut avoir :

$$GF_f - TE_f \neq 0$$

et

$$KF_f \neq 0$$

**3-1 Synthèse d'un observateur généralisé sensible aux pannes actionneur insensible aux pannes capteurs :**

Dans ce cas , on doit considérer les défauts capteurs comme perturbations à rejeter :  $d = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta x \\ \Delta\dot{x} \end{bmatrix}$ ,  $E_d = 0$ ,

$F_d = I_{(3 \times 3)}$  et les défauts actionneur comme pannes à détecter :  $f = f_a$  ;  $E_f = B$  ;  $F_f = 0$  .

- En résolvant l'équation de découplage de la dérivée de l'erreur d'observation vis à vis de l'entrée inconnue  $d$  :  $GF_d - TE_d = 0$   
on obtient :  $G = 0$

- De la condition de convergence de l'erreur d'observation :  $NT = TA - GC$   
et en optant pour  $N = n$  : scalaire négatif on a :  
 $NT = TA$

et si on choisit :  $T=[T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4]$  , pour obtenir les  $T_i$  et  $n$  on doit résoudre le système suivant :

$$\begin{aligned} nT_1 &= a_{21}T_2 + a_{41}T_4 \\ nT_2 &= T_1 + a_{22}T_2 + a_{42}T_4 \\ nT_3 &= 0 \\ nT_4 &= T_3 + a_{24}T_2 + a_{44}T_4 \end{aligned}$$

ce qui donne :

$$T_1 = T_4 \left[ -a_{42} + \frac{(n-a_{22})(n-a_{44})}{a_{24}} \right] = T_4 \left[ \frac{a_{41}}{n} + \frac{a_{21}(n-a_{44})}{n a_{24}} \right]$$

$$T_2 = T_4 \left[ \frac{n-a_{44}}{a_{24}} \right]$$

$$T_3 = 0$$

on a alors à fixer  $T_4$  pour trouver les autres paramètres ,et en déduire par la suite

$$M = b_2 T_2 + b_4$$

- comme le résidu doit être indépendant des perturbations , on doit trouver  $K$  qui vérifie :

$$KF_d = 0$$

- comme  $F_d = I_{(3 \times 3)}$  alors  $K = 0$

on a démontré précédemment que :

$$\begin{aligned} \dot{e}_z &= NT(\hat{X} - X) + (GF_f - TE_f)f \\ r &= PT(\hat{X} - X) + KF_f f \end{aligned}$$

comme  $F_f = 0$  , on aura :

$$\begin{aligned} \dot{e}_z &= NT(\hat{X} - X) - TE_f f \\ r &= PT(\hat{X} - X) \end{aligned}$$

on conclut que le résidu est affecté par les défauts de l'actionneur indirectement, via l'erreur d'observation.

### Simulations :

Nous avons accompli les simulations suivantes :

S<sub>8</sub> :Système de commande sans défauts (Figure 3-8).

S<sub>9</sub> :Système de commande avec panne actionneur  $f_a = 0.05v$  survenu à  $t = 2s$  (Figure3-9).

S<sub>10</sub> : Système de commande avec panne actionneur  $f_a = 0.1v$  survenu à  $t = 2s$  (Figure3-10).

S<sub>11</sub>:Système de commande avec panne sur le capteur de position longitudinale:  $f_x = 0.05m$  survenu à  $t = 2s$ (Figure3-11).

S<sub>12</sub>:Système de commande avec panne sur le capteur de position angulaire :  $f_{\theta} = 0.05$  rad apparu à  $t = 2s$  (Figure3-12).

S<sub>13</sub>:Système de commande avec panne sur le capteur de vitesse longitudinale:  $f_{\dot{x}} = 0.05m/s$  apparu à  $t = 2s$ (Figure3-13).

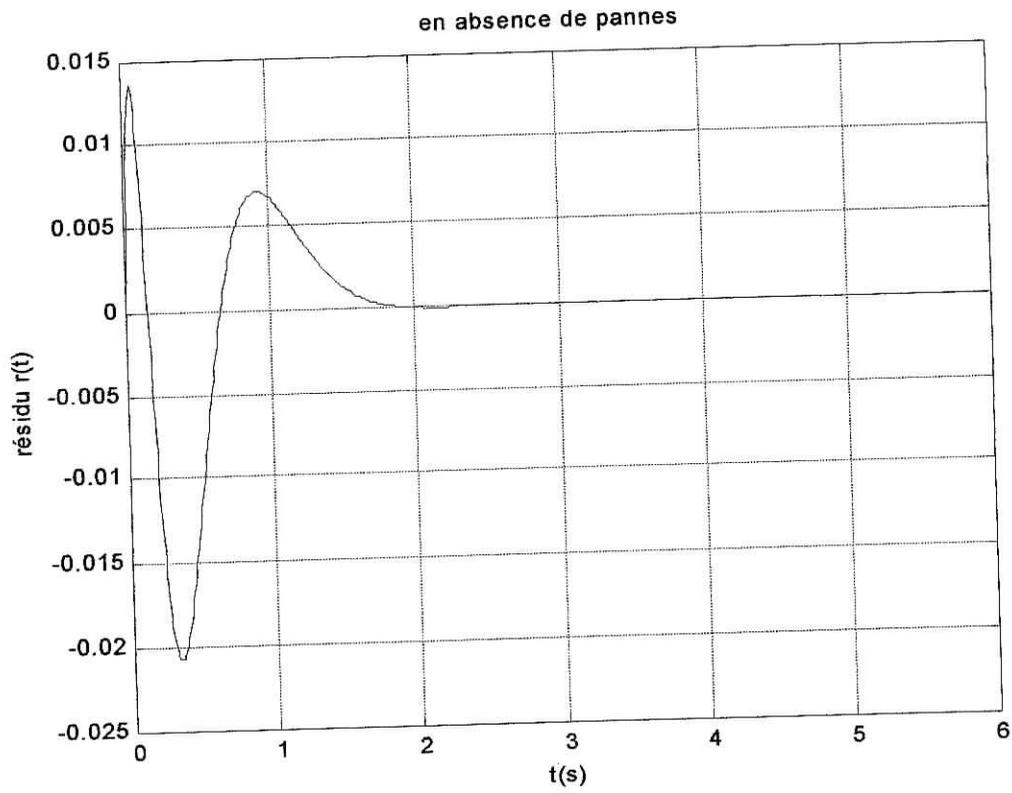


Figure 3-8

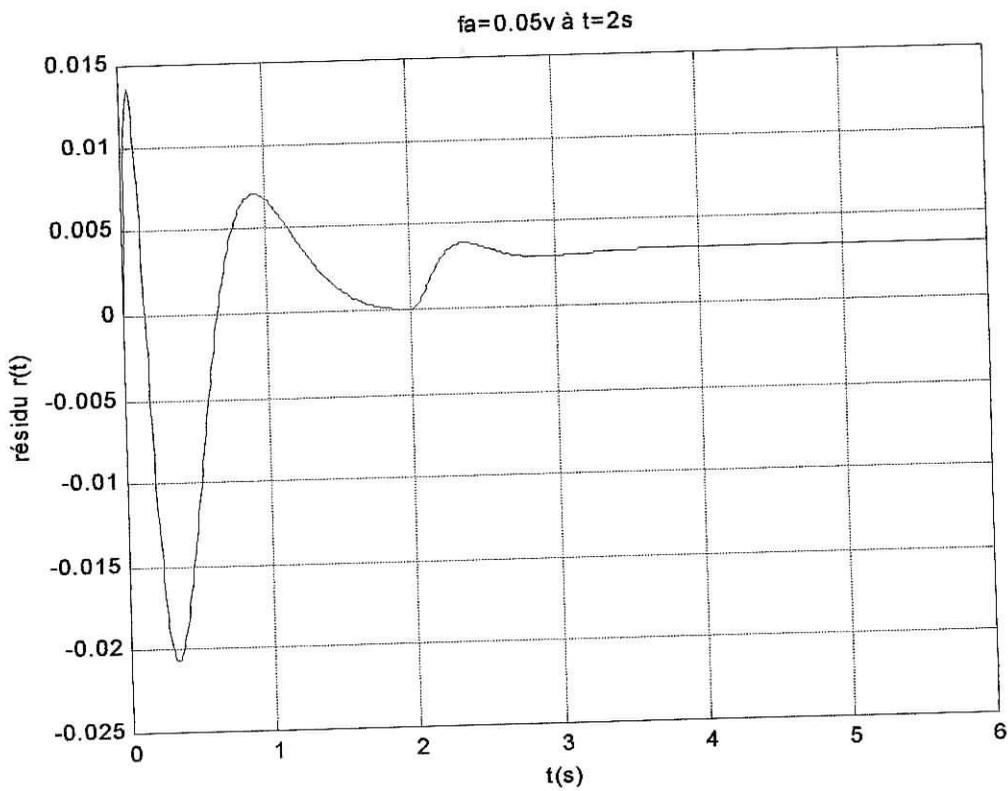


Figure 3-9

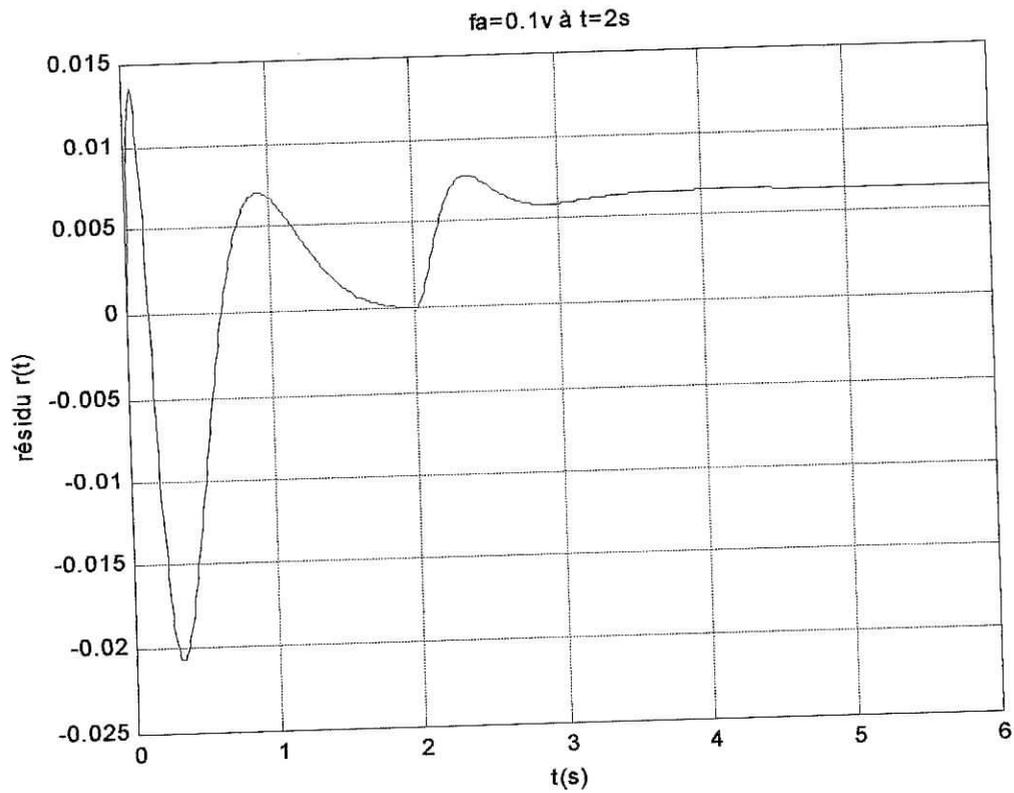


Figure 3-10

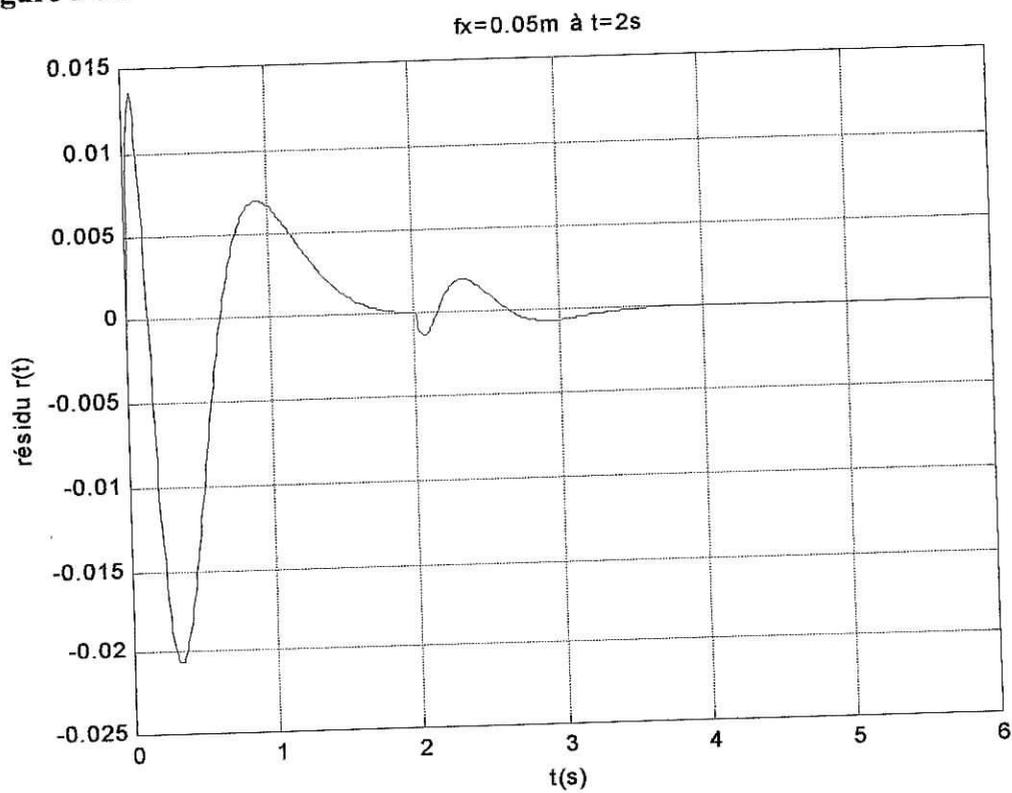


Figure 3-11

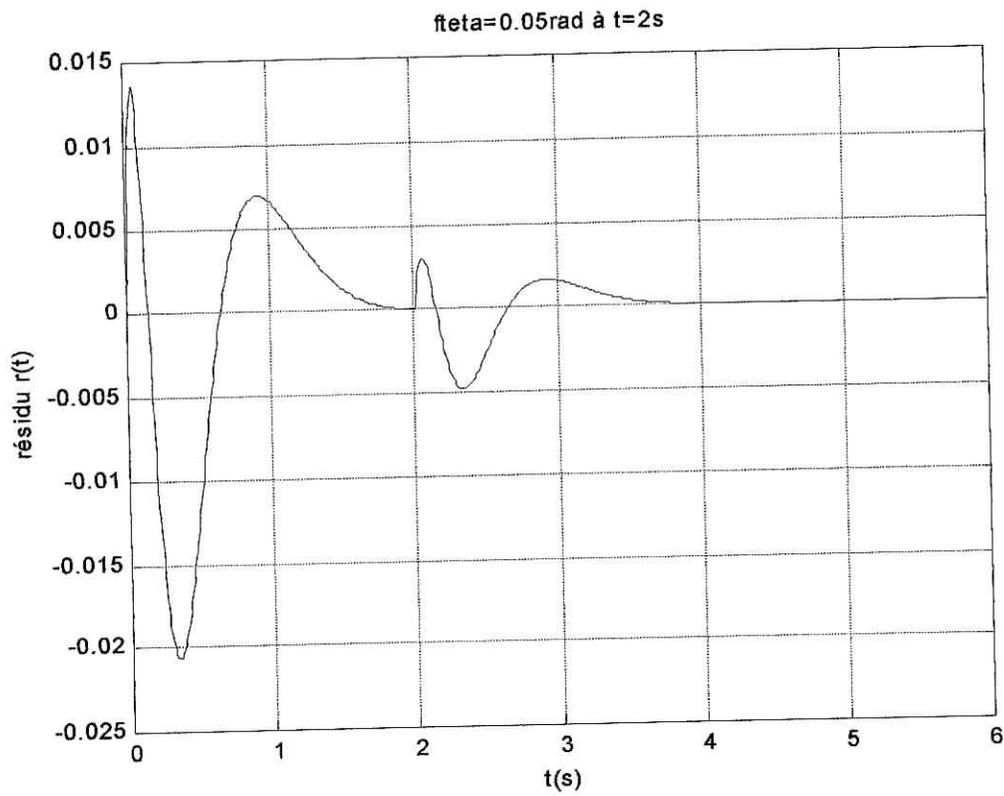


Figure 3-12

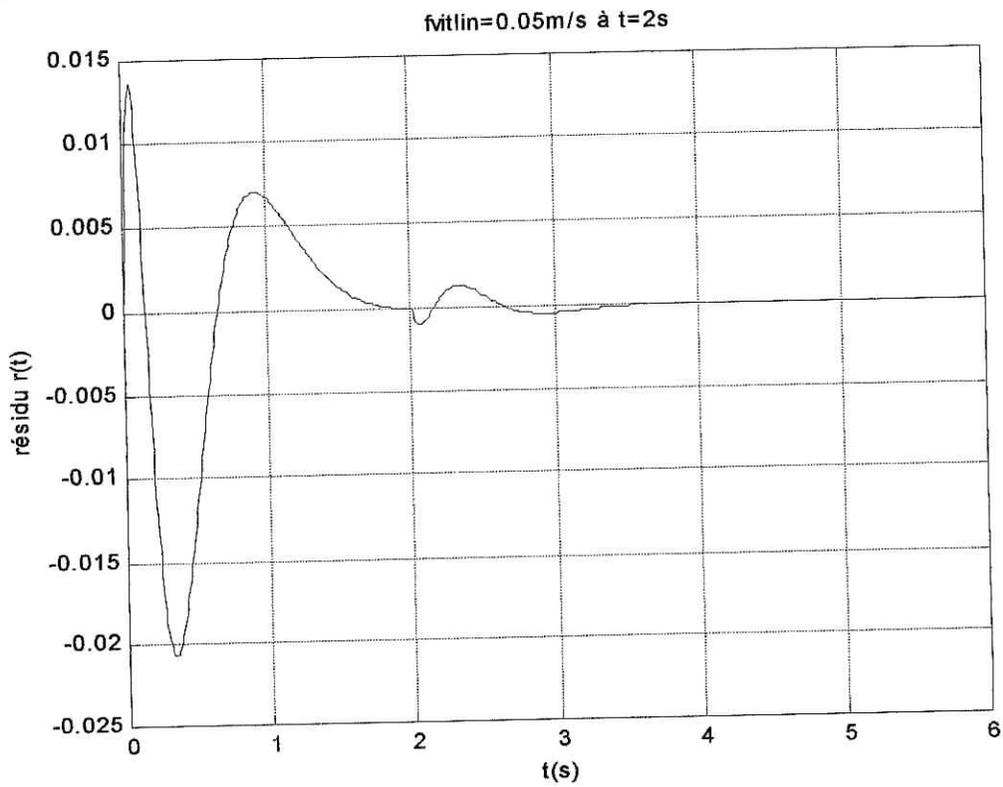


Figure 3-13

**Interprétations :**

- En l'absence de défauts le résidu tend asymptotiquement vers zéro à l'image de l'erreur d'observation (figure 3-8).
- A l'apparition d'un défaut actionneur le résidu évolue en exponentielle dont l'amplitude est proportionnelle à la magnitude de la panne (figures : 3-9 et 3-10).
- Pour les pannes des capteurs le résidu est très légèrement affecté au moment de l'apparition de la panne puis revient à zéro (figures : 3-11, 3-12 et 3-13).

**3-1 Synthèse d'un observateur sensible aux pannes capteurs insensible aux pannes actionneur :**

on doit considérer alors les défauts actionneur comme perturbation à rejeter :  $d = \Delta u$ ,

$$E_d = B \quad \text{et} \quad F_d = 0$$

et les défauts capteurs comme pannes à détecter :

$$f = \begin{bmatrix} f_{\dot{x}} \\ f_x \\ f_{\ddot{x}} \end{bmatrix}, \quad E_f = 0 \quad \text{et} \quad F_f = I_{(3 \times 3)}$$

- la résolution de l'équation de découplage de la dérivée de l'erreur d'observation vis à vis de l'entrée inconnue  $d$  :  $GF_d - TE_d = 0$

$$\text{impose : } T = [T_1 \ 0 \ T_2 \ 0]$$

- Si on choisit  $N = n$  (scalaire négatif), de l'équation :  $NT = TA - GC$

$$\text{on obtient : } G = [0 \ -nT_2 \ T_2] \quad \text{et} \quad T_1 = 0$$

Et comme  $M = TB - GD$

on aura  $M = 0$

- De la condition de découplage du résidu vis à vis de l'entrée inconnue  $\Delta u$  :  $KF_d = 0$

on déduit que  $K$  est quelconque car  $F_d$  est nul, pour trouver  $K$  il faut alors résoudre :  $PT = -KC$  avec :  $P = p$  (scalaire). ce qui donne :

$$K = [0 \ -pT_2 \ 0]$$

- Des conditions de sensibilité du résidu et de la dérivée de l'erreur d'observation vis à vis des pannes, on peut fixer  $T_2$

$$GF_f - TE_f = [0 \ -nT_2 \ T_2]$$

$$KF_f = [0 \ -pT_2 \ 0]$$

On conclut qu'un observateur à entrées inconnues découplant l'influence des défauts actionneur et fournissant un résidu nul en l'absence de défauts capteurs est réalisable.

Si on choisit  $T_2 = 1$  on a, qui n'est autre qu'un observateur de position longitudinale.

Simulations :

Nous avons effectué les simulations suivantes :

- S<sub>14</sub> :Système de commande sans défauts (Figure 3-14).
- S<sub>15</sub> : Système de commande avec panne actionneur  $f_a=0.05v$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-15).
- S<sub>16</sub> : Système de commande avec panne actionneur  $f_a=1v$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-16).
- S<sub>17</sub>:Système de commande avec panne sur le capteur de position longitudinale:  $f_x=0.05m$  survenu à  $t=2s$ (Figure3-17).
- S<sub>18</sub>:Système de commande avec panne sur le capteur de vitesse longitudinale:  $f_{\dot{x}}=0.05m/s$  apparu à  $t=2s$ (Figure3-18).
- S<sub>19</sub>: Système de commande avec panne sur le capteur de position angulaire:  $f_{\theta}=0.05rad$  survenu à  $t=2s$ (Figure3-19).
- S<sub>20</sub>: Système de commande avec panne sur le capteur de position angulaire:  $f_{\theta}=\pi/18rad$  survenu à  $t=2s$ (Figure3-20).
- S<sub>21</sub>:Système de commande avec variation de la masse du pendule  $m$  dès  $t=2s$ (Figure3-21).
- S<sub>22</sub>:Système de commande avec variation de la masse du chariot  $M$  dès  $t=2s$ (Figure3-22).

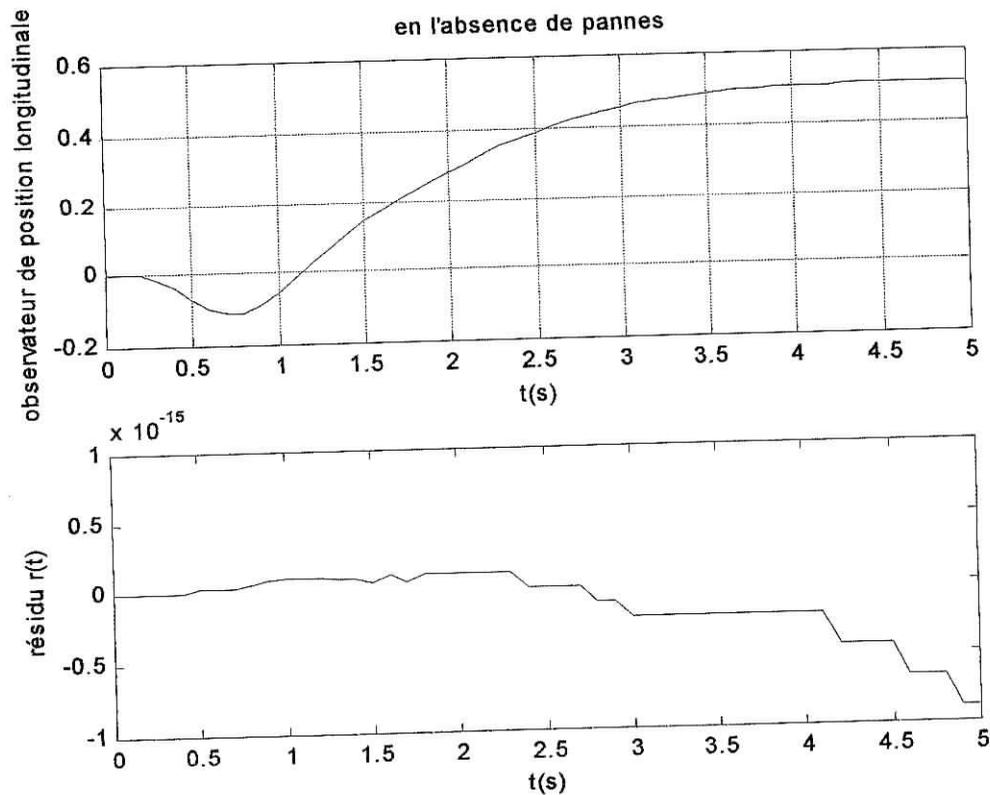


Figure 3-14

fa=0.05v à t=2s

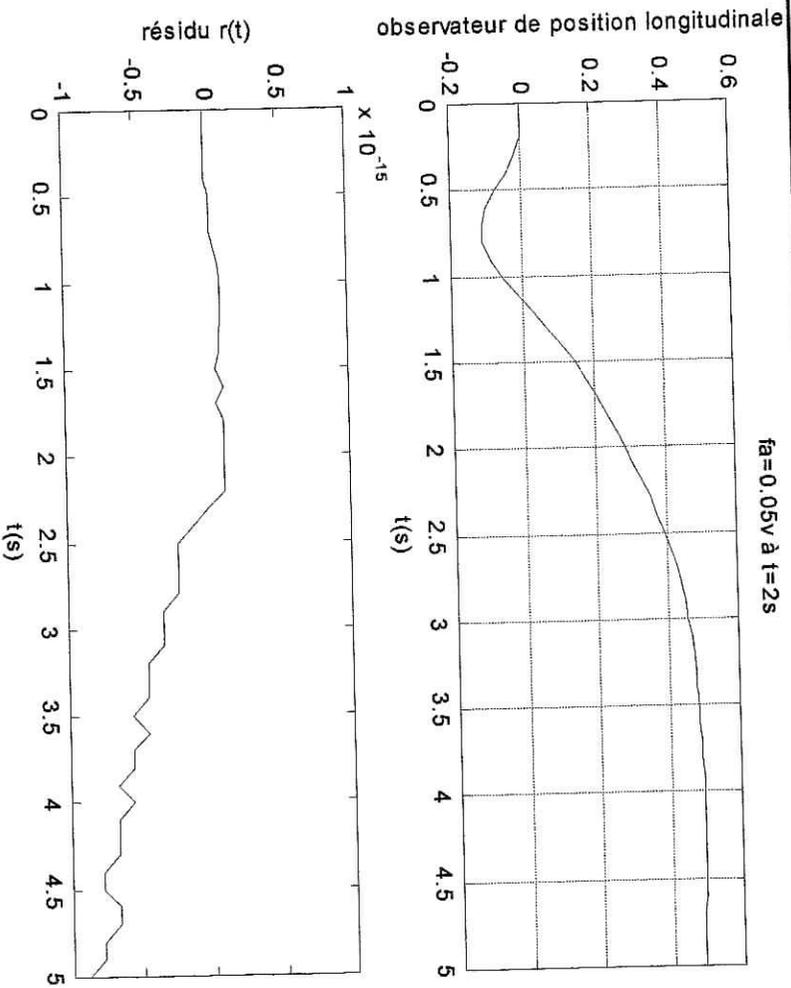


Figure 3-15

fa=1v à t=2s

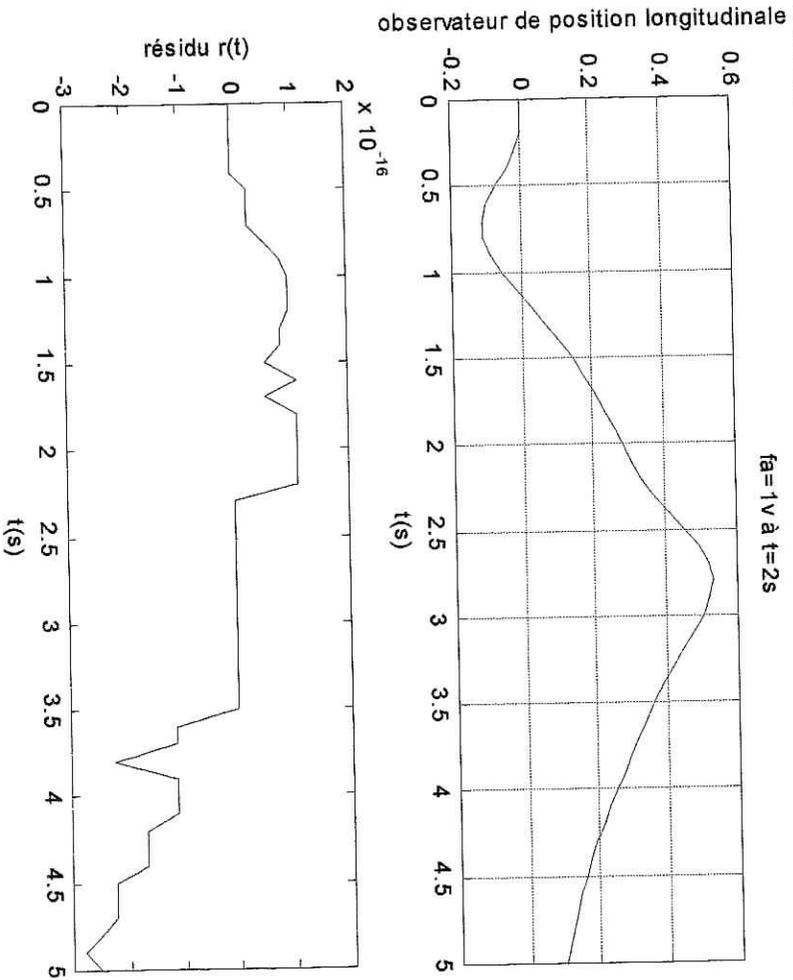


Figure 3-16

$x=0.05\text{m}$  à  $t=2\text{s}$

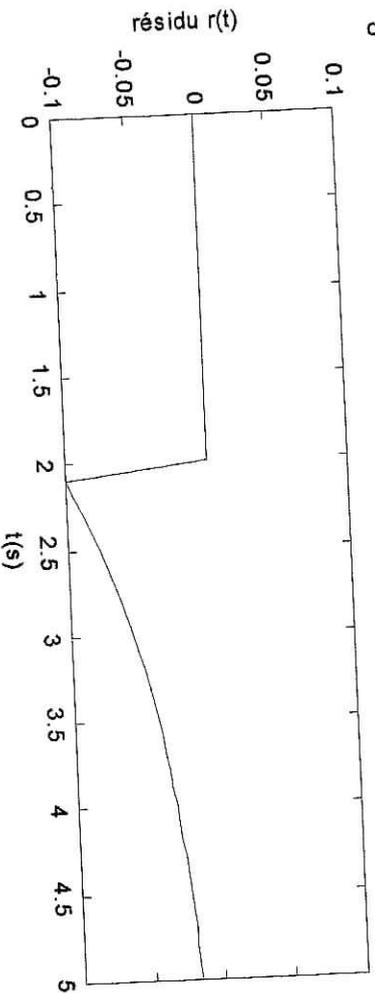
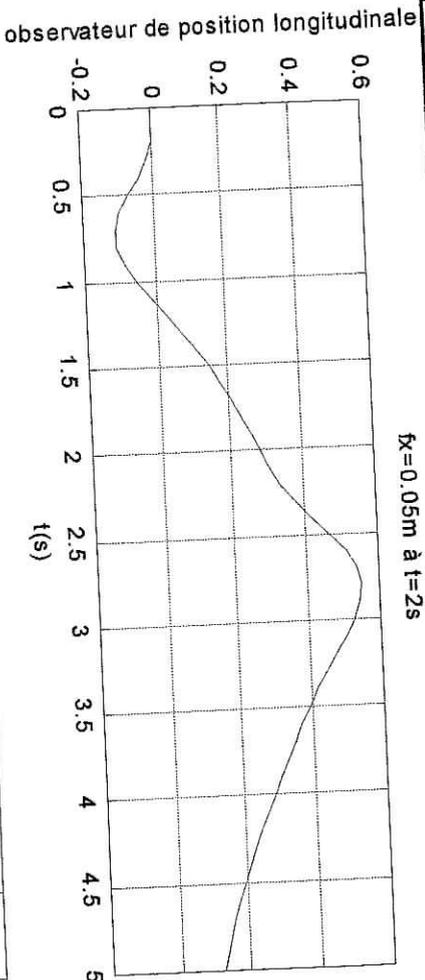


Figure 3-17

$\dot{x}(t)=0.1\text{m/s}$  à  $t=2\text{s}$

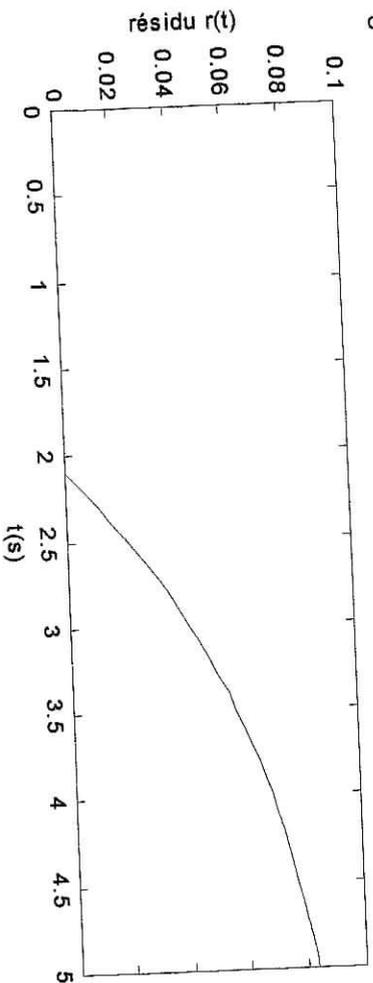
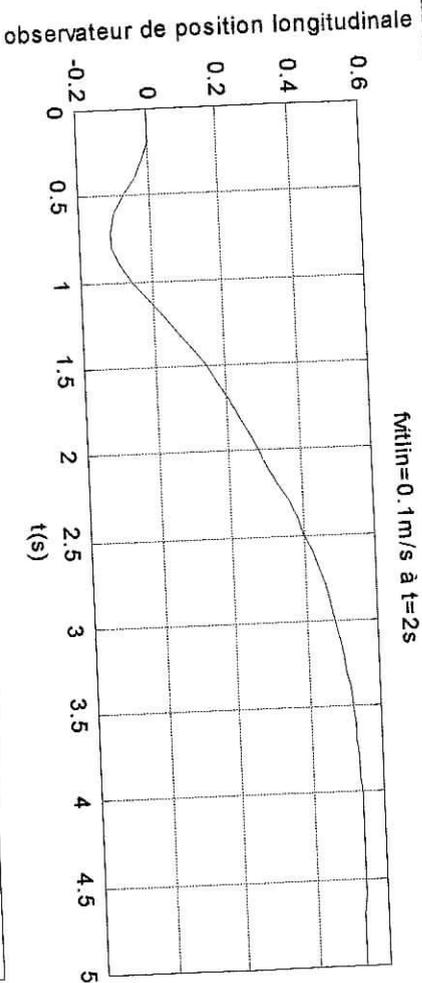


Figure 3-18

$\eta = 0.05 \text{ rad}$  à  $t = 2 \text{ s}$

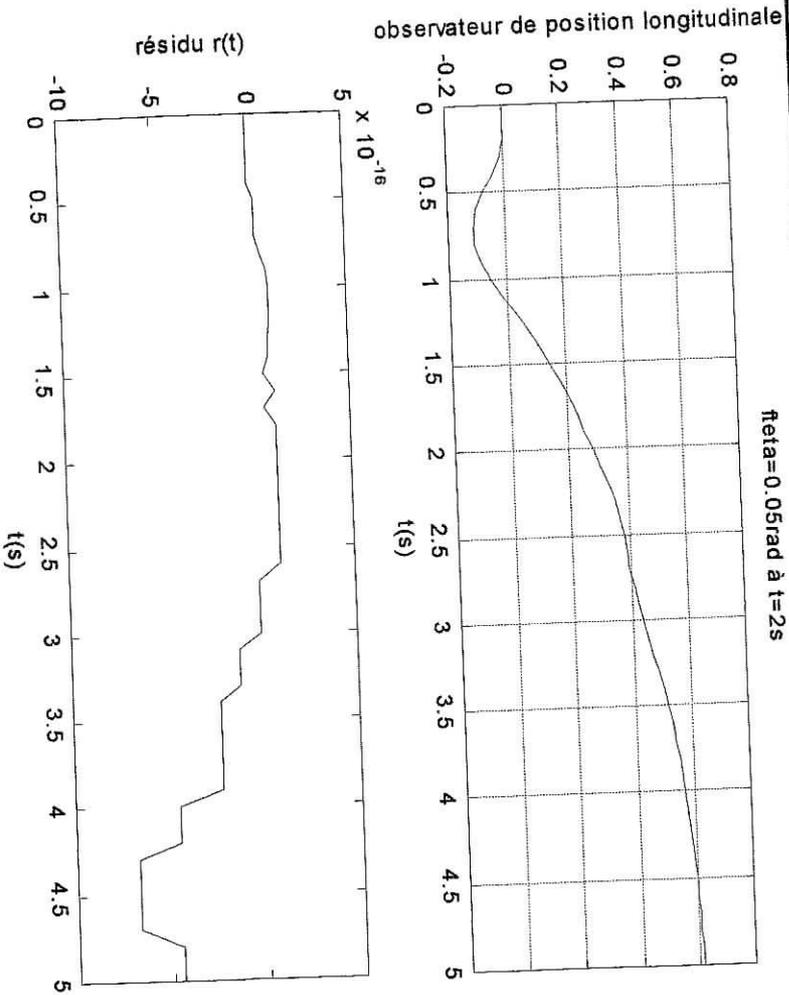


Figure 3-19

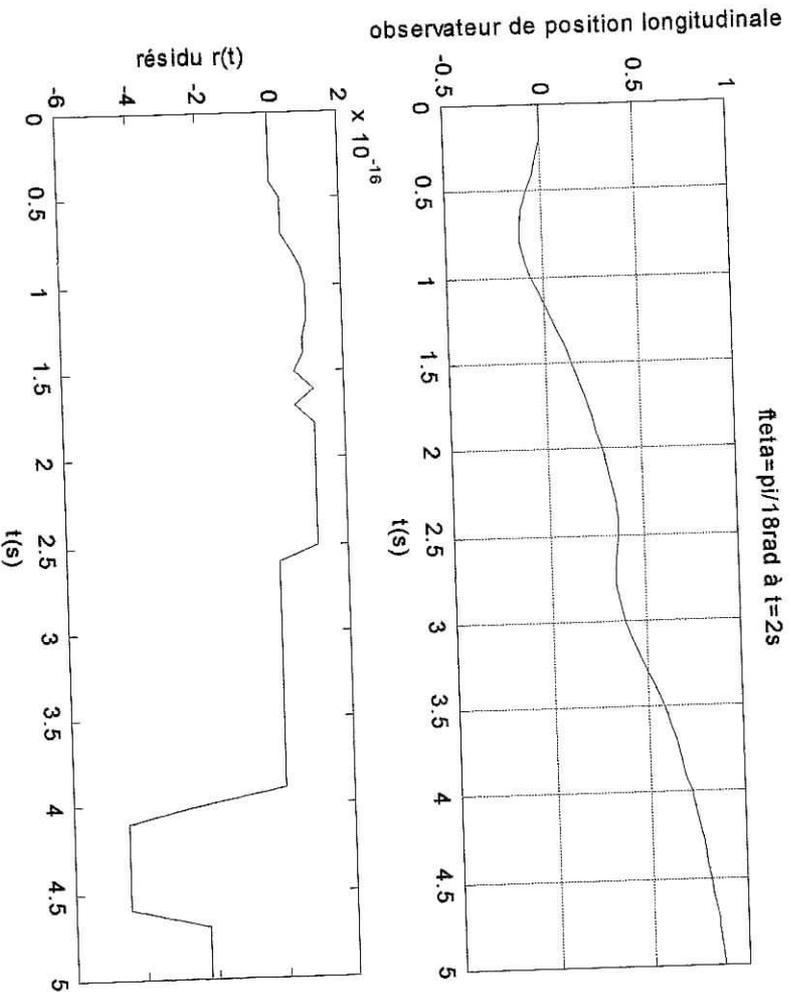


Figure 3-20

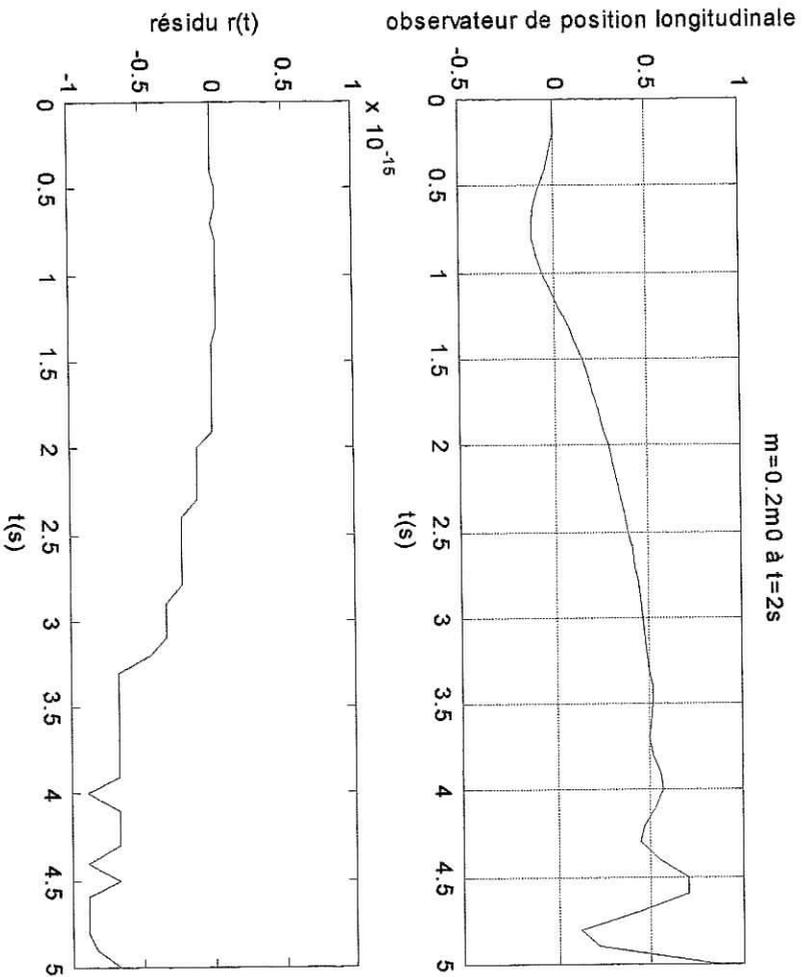


Figure 3-21

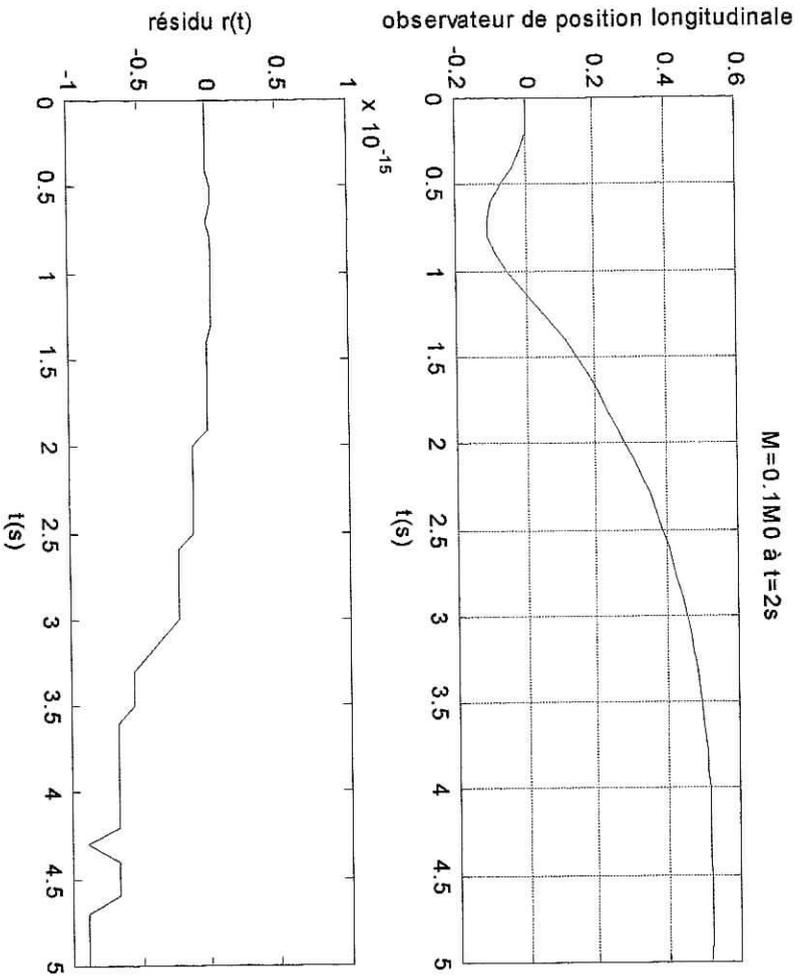


Figure 3-22

**Interprétations :**

-En l'absence de défauts le résidu est pratiquement nul, il est de l'ordre de  $10^{-15}$  (figure 3-14).

-Si l'actionneur présente un défaut d'amplitude 0.05v (figure 3-15) ou même 1v (figure 3-16) où nous remarquons sur l'observateur qu'il n'y a plus de poursuite de référence, le résidu reste nul ce qui prouve son insensibilité vis à vis de ce type de défauts comme il a été convenu lors de la construction de l'observateur.

-En présence de défauts sur le capteur de position longitudinale (figure 3-17) ou sur le capteur de vitesse longitudinale (figure 3-18), le résidu s'écarte remarquablement du zéro.

-Si le capteur de position angulaire est sujet à un défaut d'amplitude 0.05rad (figure 3-19) ou même de  $\pi/18$ rad (figure 3-20) le résidu reste insensible, ceci ne s'accorde pas avec le choix fait lors de la synthèse de l'observateur supposé générer un résidu sensible à tous les défauts capteurs.

-Le résidu généré n'est pas affecté par les variations des paramètres, ni par une variation de 80% de la masse du pendule (figure 3-21), ni une variation de 90% de la masse du chariot (figure 3-22).

**4- Application au système non linéaire :**

Si on implémente les observateurs de diagnostic synthétisés en utilisant le modèle linéarisé du pendule inversé pour le système non linéaire décrit par les équations (2.6), (2.7), (2.8), les résultats de simulations montrent que :

-l'observateur d'ordre plein génère un résidu avec les mêmes signatures que celles obtenues pour le système linéaire sous les conditions de fonctionnement suivantes :

- Position initiale du pendule  $\theta_0 \in [-34^\circ, 41^\circ]$  et poursuite d'une référence positive.

ou

- position initiale du pendule  $\theta_0 \in [-35^\circ, 40^\circ]$  et poursuite d'une référence négative

-l'observateur généralisé sensible aux pannes capteurs insensible aux pannes actionneur génère un vecteur résidu avec les mêmes signatures que celles obtenues pour le système linéaire sous les conditions de fonctionnement suivantes :

- $\theta_0 \in [-35^\circ, 22^\circ]$  et poursuite d'une référence positive.

ou

- $\theta_0 \in [-22^\circ, 25^\circ]$  et poursuite d'une référence négative

**Simulations :**

Nous avons effectué les simulations suivantes :

- S<sub>23</sub> : Système de commande +observateur d'ordre plein avec : angle initial  $\theta_0=41^\circ$  , poursuite d'une référence positive ( $ref>0$ ) et panne actionneur  $f_a=0.1v$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-23).
- S<sub>24</sub> : Système de commande +observateur d'ordre plein avec : angle initial  $\theta_0=-34^\circ$  , poursuite d'une référence positive ( $ref>0$ ) et panne actionneur  $f_a=0.1v$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-24).
- S<sub>25</sub>: Système de commande +observateur d'ordre plein avec : angle initial  $\theta_0=-35^\circ$  , poursuite d'une référence négative ( $ref<0$ ) et panne actionneur  $f_a=0.1v$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-25).
- S<sub>26</sub>: Système de commande +observateur d'ordre plein avec : angle initial  $\theta_0=+40^\circ$  , poursuite d'une référence négative ( $ref<0$ ) et panne actionneur  $f_a=0.1v$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-26).
- S<sub>27</sub>: Système de commande +observateur d'ordre plein avec : angle initial  $\theta_0=+41^\circ$  , poursuite d'une référence négative ( $ref<0$ ) et panne actionneur  $f_a=0.1v$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-27).
- S<sub>28</sub>: Système de commande +observateur généralisé sensible aux pannes capteurs avec : angle initial  $\theta_0=+22^\circ$  , poursuite d'une référence positive ( $ref>0$ ) et panne sur le capteur de position longitudinale:  $f_x=0.05m$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-28).
- S<sub>29</sub> :Système de commande +observateur généralisé sensible aux pannes capteurs avec : angle initial  $\theta_0=-35^\circ$  , poursuite d'une référence positive ( $ref>0$ ) et panne sur le capteur de position longitudinale:  $f_x=0.05m$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-29).
- S<sub>30</sub>: Système de commande +observateur généralisé sensible aux pannes capteurs avec : angle initial  $\theta_0=-22^\circ$  , poursuite d'une référence négative ( $ref<0$ ) et panne sur le capteur de position longitudinale:  $f_x=0.05m$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-30).
- S<sub>31</sub>: Système de commande +observateur généralisé sensible aux pannes capteurs avec : angle initial  $\theta_0=+25^\circ$  , poursuite d'une référence négative ( $ref<0$ ) et panne sur le capteur de position longitudinale:  $f_x=0.05m$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-31).
- S<sub>32</sub>: Système de commande +observateur généralisé sensible aux pannes capteurs avec : angle initial  $\theta_0=+35^\circ$  , poursuite d'une référence négative ( $ref<0$ ) et panne sur le capteur de position longitudinale:  $f_x=0.05m$  survenu à  $t=2s$  (Figure3-32).

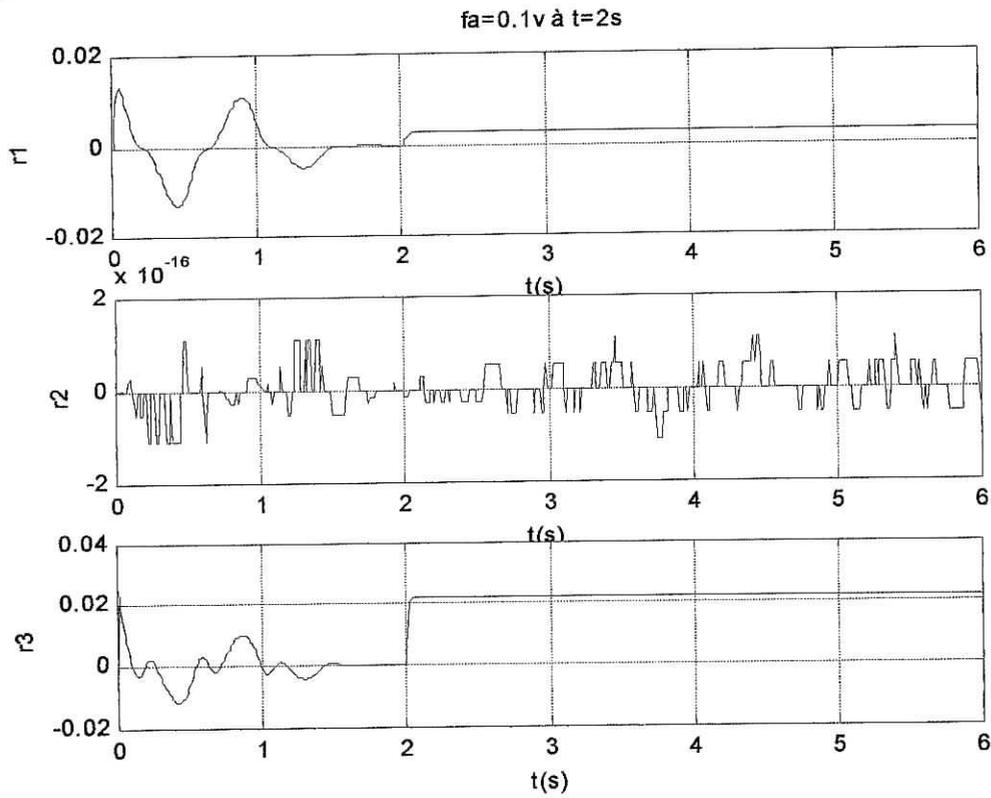


Figure 3-23  $\theta_0=41^\circ$  et  $ref>0$

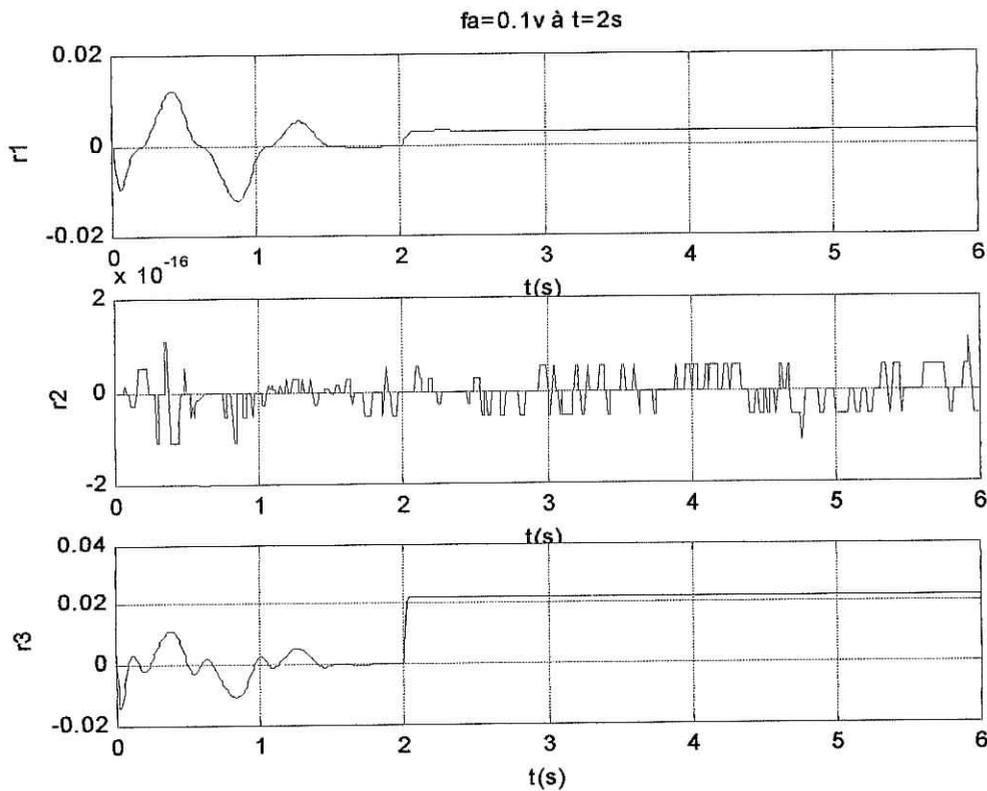


Figure 3-24  $\theta_0=-34^\circ$  et  $ref>0$

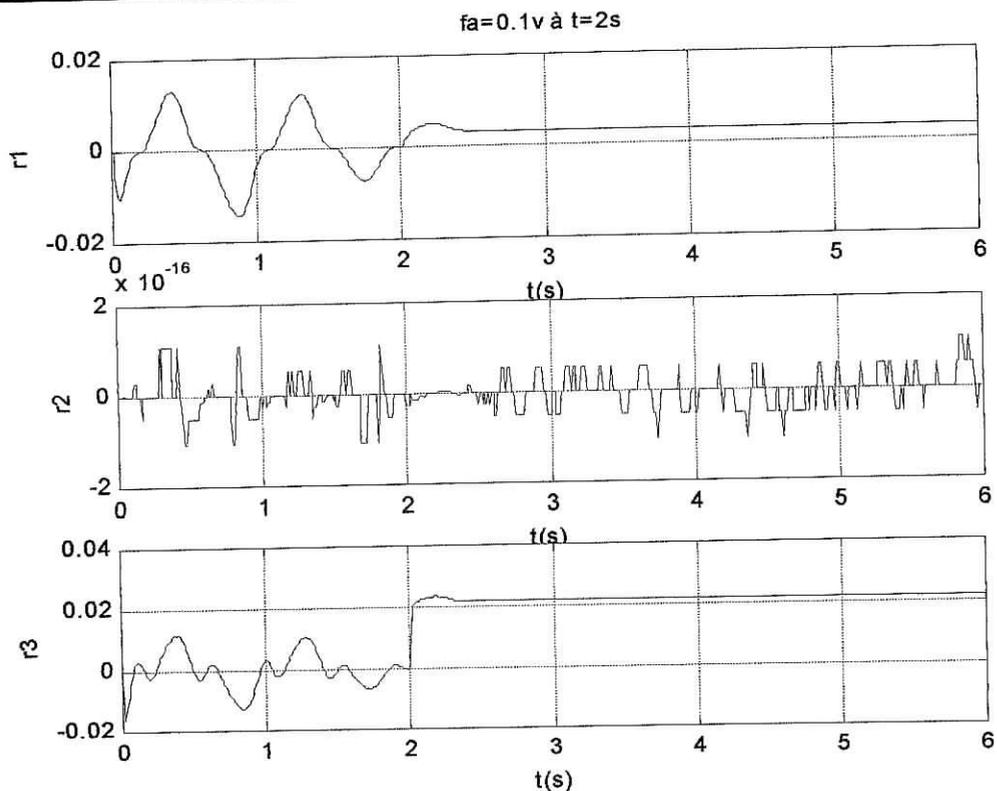


Figure 3-25  $\theta_0 = -35^\circ$  et  $ref < 0$

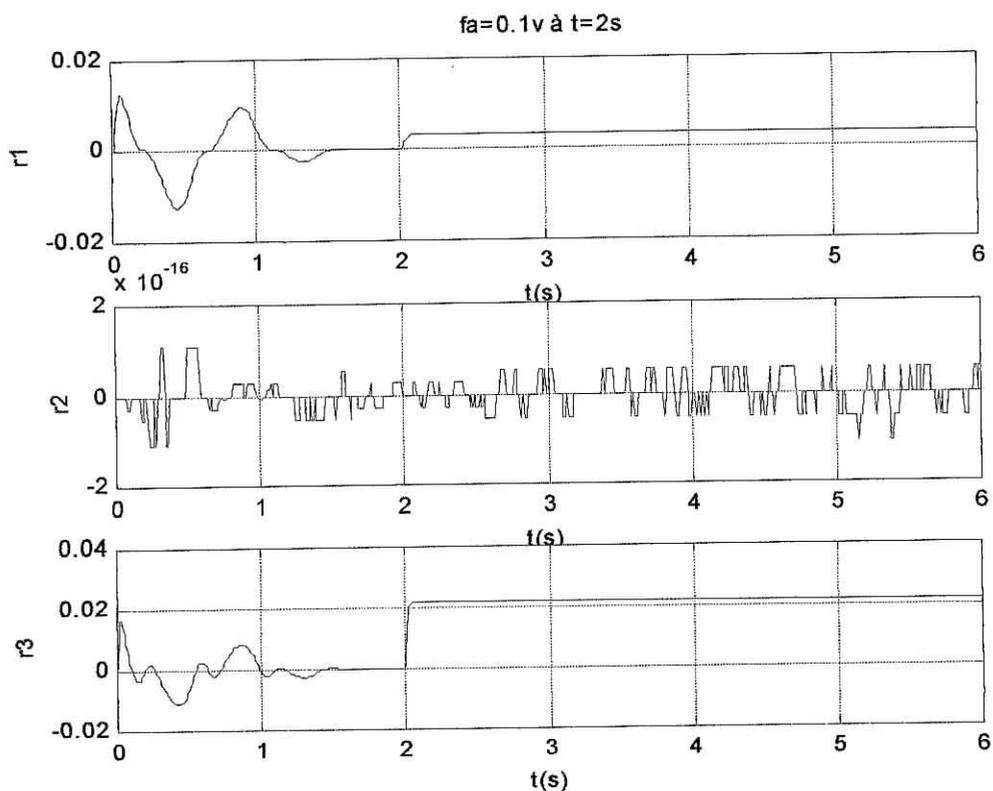


Figure 3-26  $\theta_0 = +40^\circ$  et  $ref < 0$

$f_a = 0.1v$  à  $t = 2s$

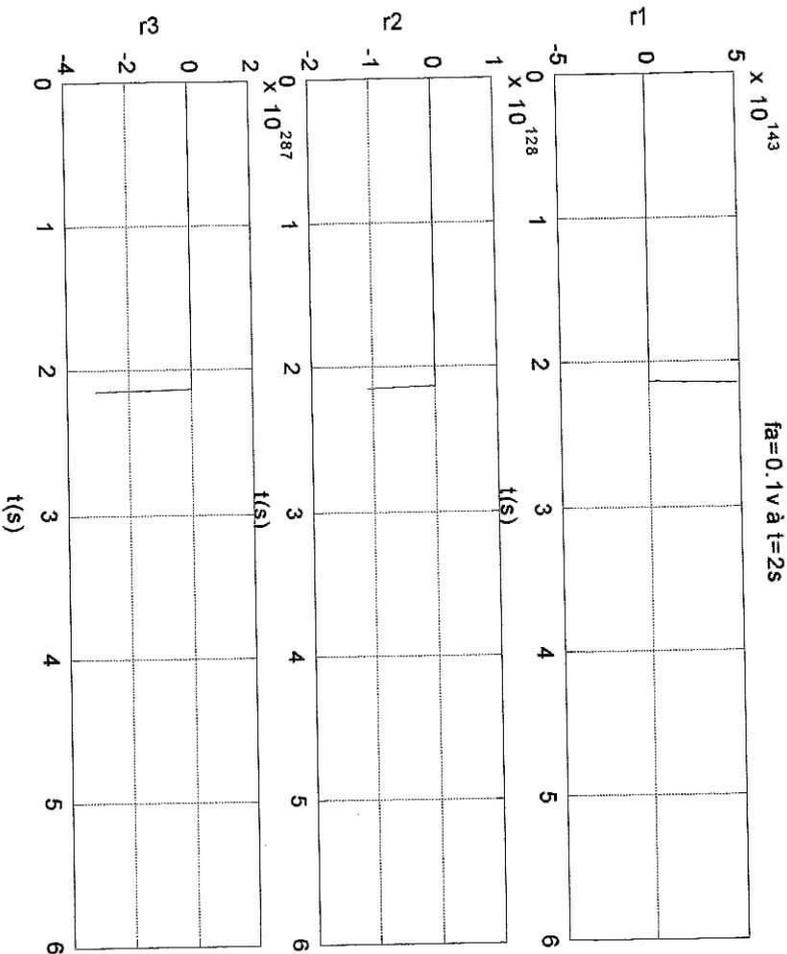


Figure 3-27  $\theta_0 = +41^\circ$  et  $ref < 0$

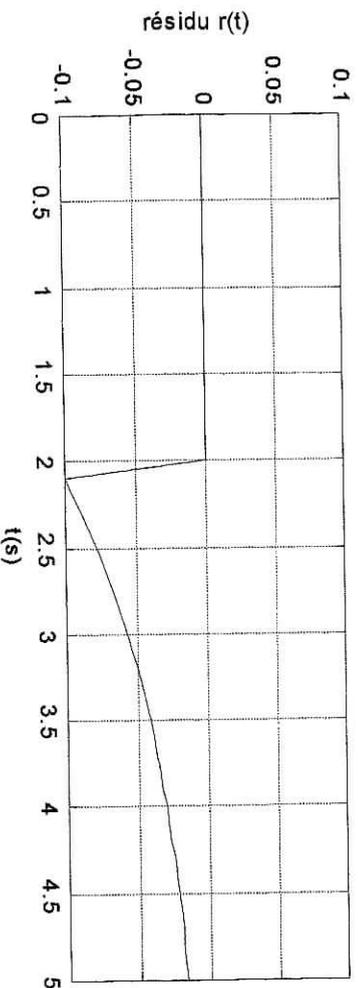
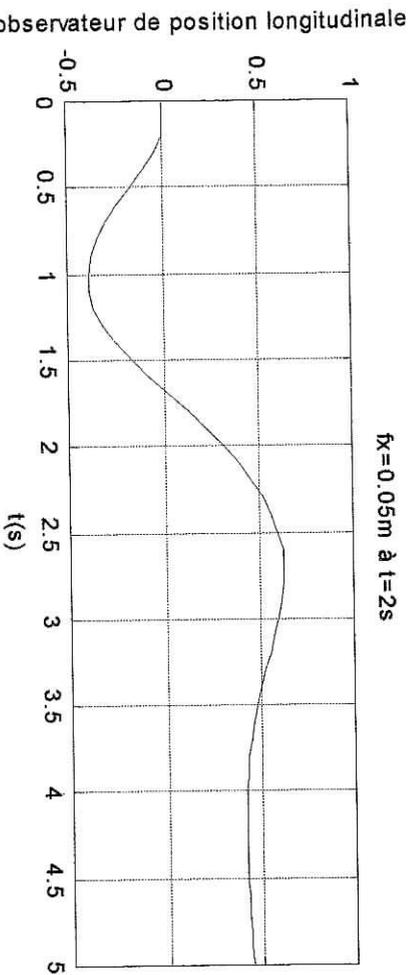


Figure 3-28  $\theta_0 = +22^\circ$  et  $ref > 0$

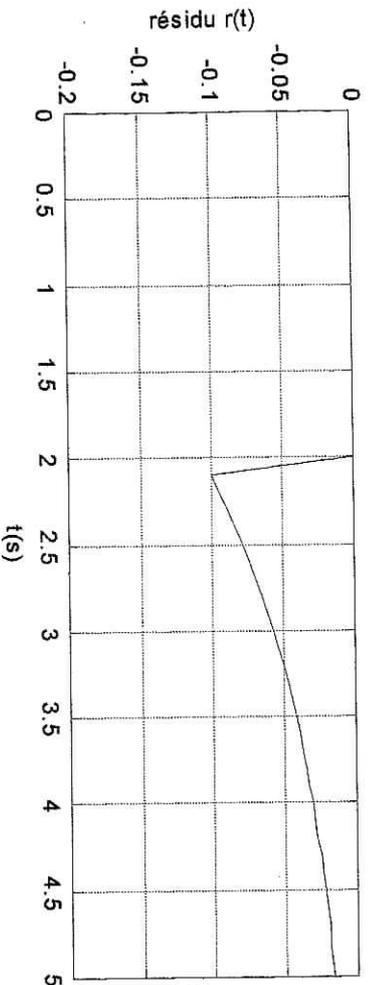
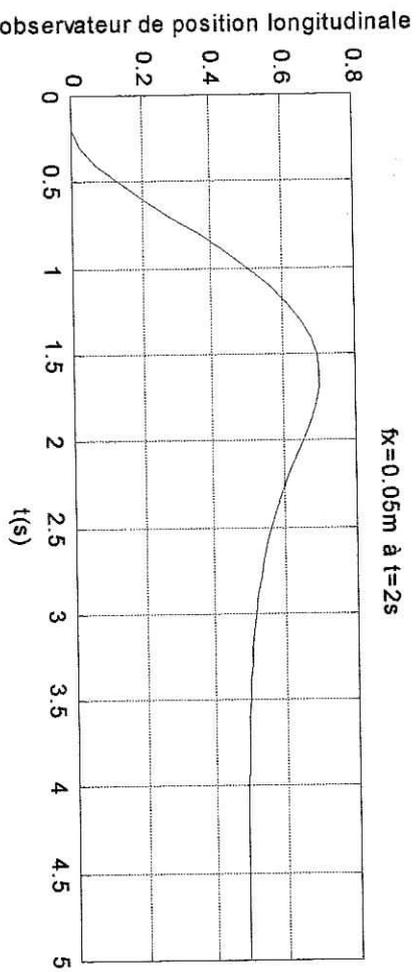


Figure 3-29  $\theta_0=35^\circ$  et  $\text{ref}>0$

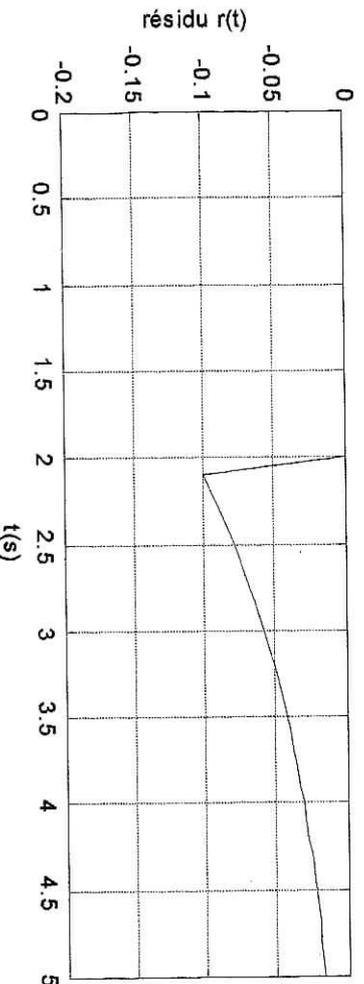
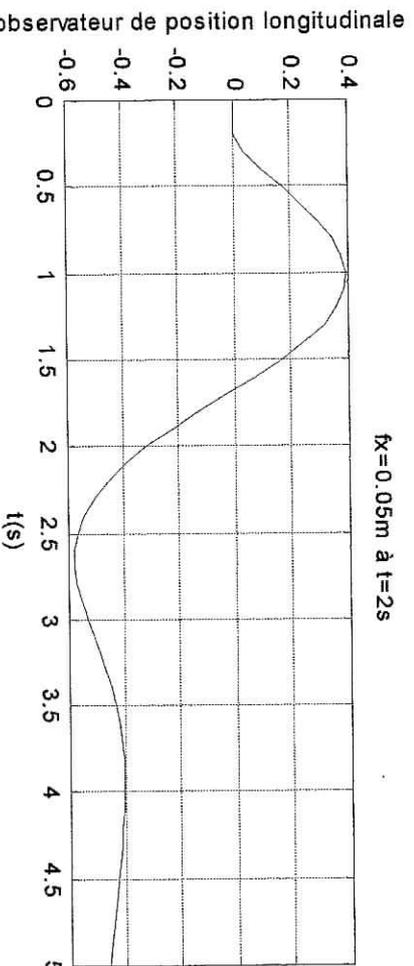


Figure 3-30  $\theta_0=-22^\circ$  et  $\text{ref}<0$

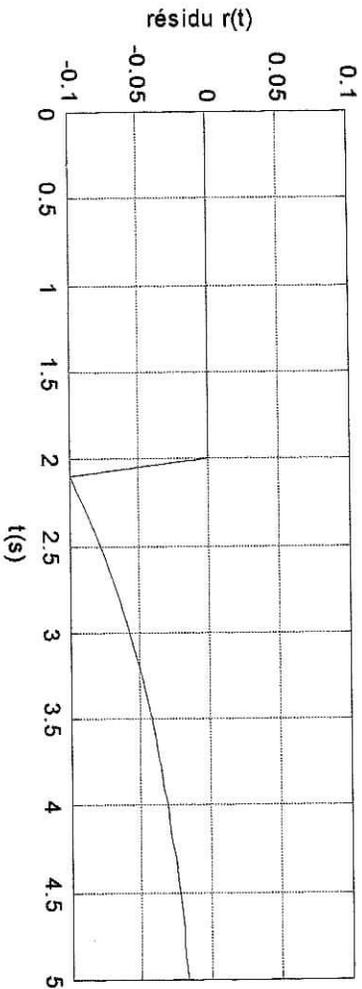
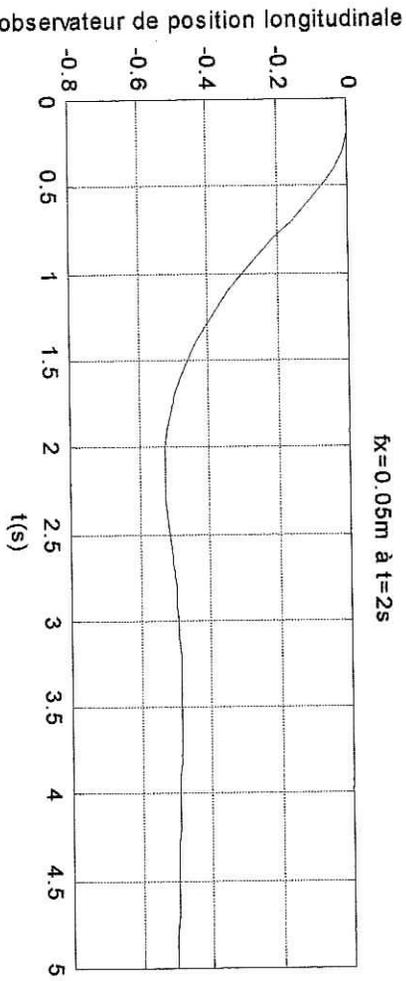


Figure 3-31  $\theta_0=+25^\circ$  et  $ref<0$

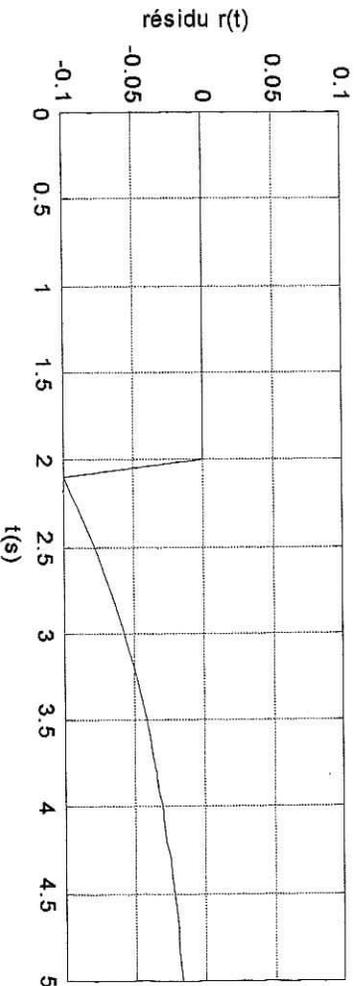
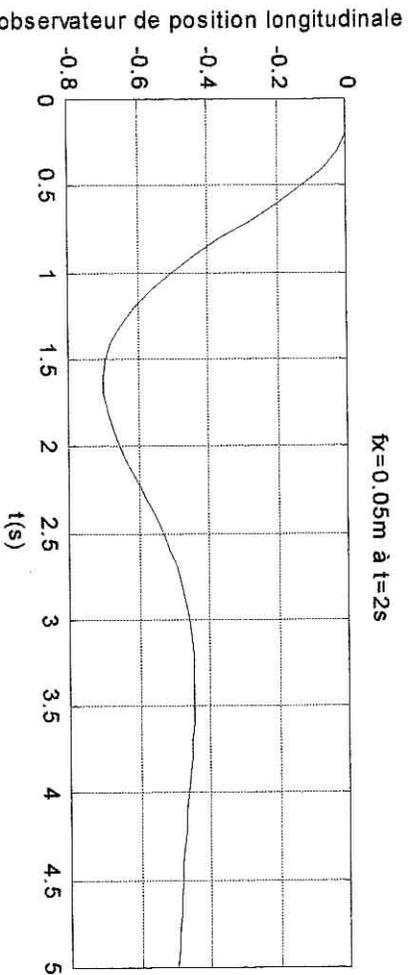


Figure 3-32  $\theta_0=+35^\circ$  et  $ref<0$

***Conclusion :***

En combinant les résultats obtenus par l'observateur d'ordre plein et ceux fournis par l'observateur généralisé sensible aux défauts de l'actionneur insensible à ceux des capteurs ,nous pouvons détecter et localiser toutes les pannes actionneur et celles des capteurs .Par contre les pannes système n'ont pas pu être détectées par aucun des observateurs synthétisés .Ces observateurs ont aussi permis de diagnostiquer le système non linéaire sous certaines conditions de fonctionnement .

*CHAPITRE 4 :*  
***COMMANDE TOLERANTE***

**Introduction :**

Il existe des pannes dites catastrophiques à cause desquelles le système ne peut plus fonctionner. Et aucune technique de commande ne peut atténuer les effets indésirables causés, citons par exemple un court-circuit dans le moteur d'entraînement. La seule solution pour y remédier est de remplacer l'élément défectueux.

Cependant, les pannes à faibles magnitudes dites non catastrophiques peuvent être accommoder grâce à une commande tolérante, afin de préserver la stabilité et les même performances que celles du système nominal.

Il existe deux types de commande tolérante l'une basée sur la détection et l'isolation de pannes, l'autre indépendante du diagnostic. Pour la première, une fois la panne détectée et localisée la loi de commande est reconfigurée afin de maintenir les performances. La seconde consiste à synthétiser dès le début un régulateur robuste vis à vis des pannes. Dans ce qui suit, on s'intéressera au premier type de commande[9].

**1-Commande tolérante aux pannes capteurs :**

Si on considère la représentation d'état suivante du système pendule-chariot :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ y &= CX \end{aligned} \tag{4.1}$$

avec :  $C = I_{(4 \times 4)}$ ,  $I$  : la matrice identité.

On dispose donc de 4 capteurs : de positions et de vitesses angulaires et longitudinales dont les mesures sont utilisées pour calculer la loi de commande qui est donnée par :

$$u(t) = -K[X(t) - X_r(t)] \tag{4.2}$$

Dès que la panne de l'un des capteurs est détectée et avant que le système ne devienne instable et l'accommodation impossible, on doit switcher de la commande précédente à une commande tolérante aux défauts. Pour ce faire, afin de synthétiser la commande on utilisera l'estimée de la variable d'état au lieu de sa mesure obtenue du capteur défaillant. Cette variable d'état sera estimée grâce a un observateur d'ordre plein dont la structure est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}} &= A\hat{X} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{X} \end{aligned} \tag{4.3}$$

où la matrice C dépendra du capteur défaillant.

**1-1 Panne du capteur de position angulaire :**

Aussitôt qu'une panne du capteur de position angulaire est signalée, on doit switcher de la commande(4.2), à la commande :

$$u(t) = -K [\hat{\theta}, \dot{\theta}, x - x_r, \dot{x}]^T \tag{4.4}$$

Dans ce cas on estimera la position angulaire et on mesurera les vitesses longitudinale et angulaire et la position longitudinale :

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On note que la paire (A, C) est observable.

**1-2 Panne du capteur de position longitudinale :**

Si on mesure en sortie les vitesses longitudinale et angulaire ainsi que la position angulaire, on ne pourra pas estimer la position longitudinale. Autrement dit si on fixe :

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

la paire (A, C) ne sera pas observable.

La technique proposée est dans ce cas inutilisable.

**1-3 Panne du capteur de vitesse angulaire :**

Dès qu'une panne du capteur de vitesse angulaire est détectée, on doit passer de la commande(4.2), à la commande :

$$u(t) = -K [\theta, \dot{\theta}, x - x_r, \dot{x}]^T \tag{4.5}$$

Et on mesurera uniquement la vitesse longitudinale et les positions longitudinale et angulaire :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

#### 1-4 Panne du capteur de vitesse longitudinale :

pour une panne survenue sur le capteur de position longitudinale la commande tolérante choisit est :

$$u(t) = -K [\theta, \dot{\theta}, x - x_r, \dot{x}]^T \quad (4.6)$$

et les variables d'état mesurées sont la vitesse angulaire et les positions longitudinale et angulaire :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

#### Simulations :

Nous avons effectué les simulations suivantes :

- S<sub>1</sub>: système de commande avec panne du capteur de position angulaire  $f_{léta} = 0.05 \text{ rad}$  (figure 4-1).
- S<sub>2</sub>: système de commande avec panne du capteur de position angulaire  $f_{léta} = 0.05 \text{ rad}$  et commande tolérante à ce type de panne (figure 4-2).
- S<sub>3</sub>: système de commande avec panne du capteur de position longitudinale  $f_x = 0.05 \text{ m}$  (figure 4-3).
- S<sub>4</sub>: système de commande avec panne du capteur de vitesse angulaire  $f_{vitang} = 0.05 \text{ rad/s}$  (figure 4-4).
- S<sub>5</sub>: système de commande avec panne du capteur de vitesse angulaire  $f_{vitang} = 0.05 \text{ rad/s}$  et commande tolérante à ce type de panne (figure 4-5).
- S<sub>6</sub>: système de commande avec panne du capteur de vitesse longitudinale  $f_{\dot{x}} = 0.05 \text{ m/s}$  (figure 4-6).
- S<sub>7</sub>: système de commande avec panne du capteur de vitesse longitudinale  $f_{\dot{x}} = 0.05 \text{ m/s}$  et commande tolérante à ce type de panne (figure 4-7).
- S<sub>8</sub>: système de commande avec panne actionneur  $f_a = 0.1 \text{ v}$  (figure 4-9).

On note que toutes les pannes ont été introduites sous forme d'échelons à partir de  $t = 2 \text{ s}$ .

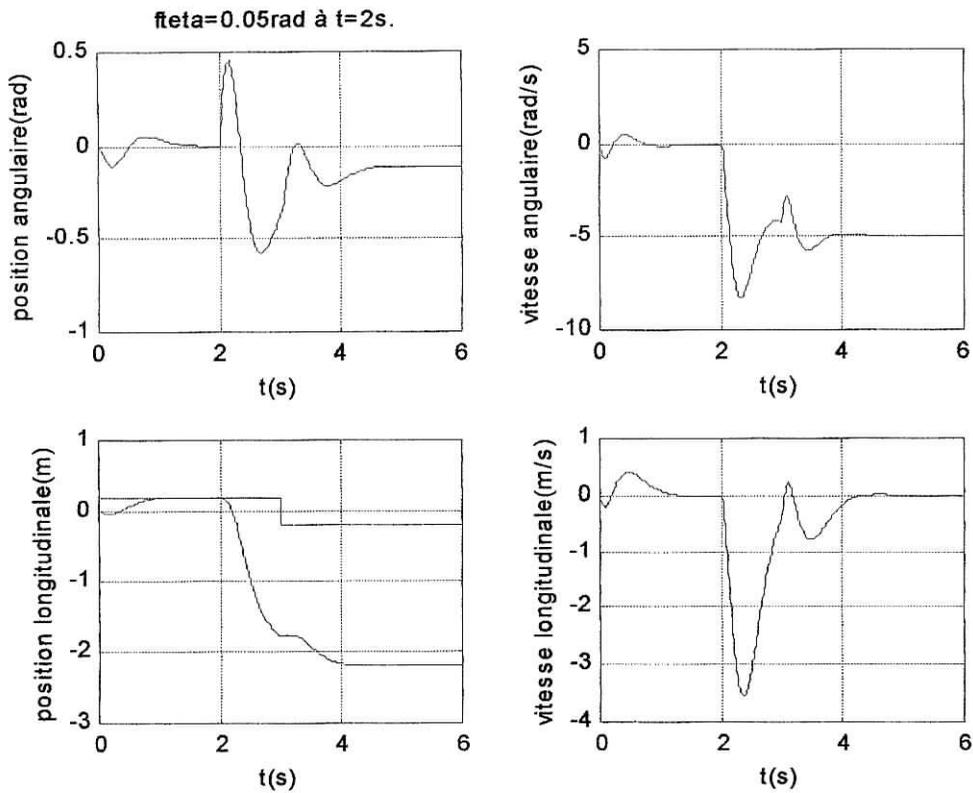


figure 4-1 système sans commande tolérante.

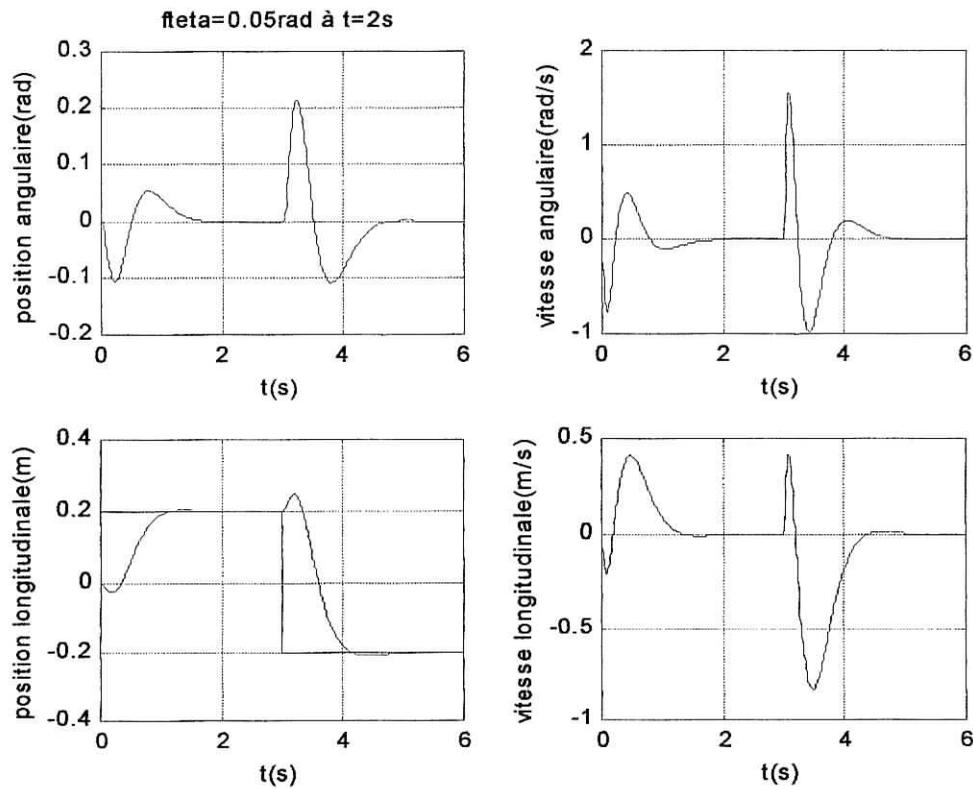


figure 4-2 système avec commande tolérante.

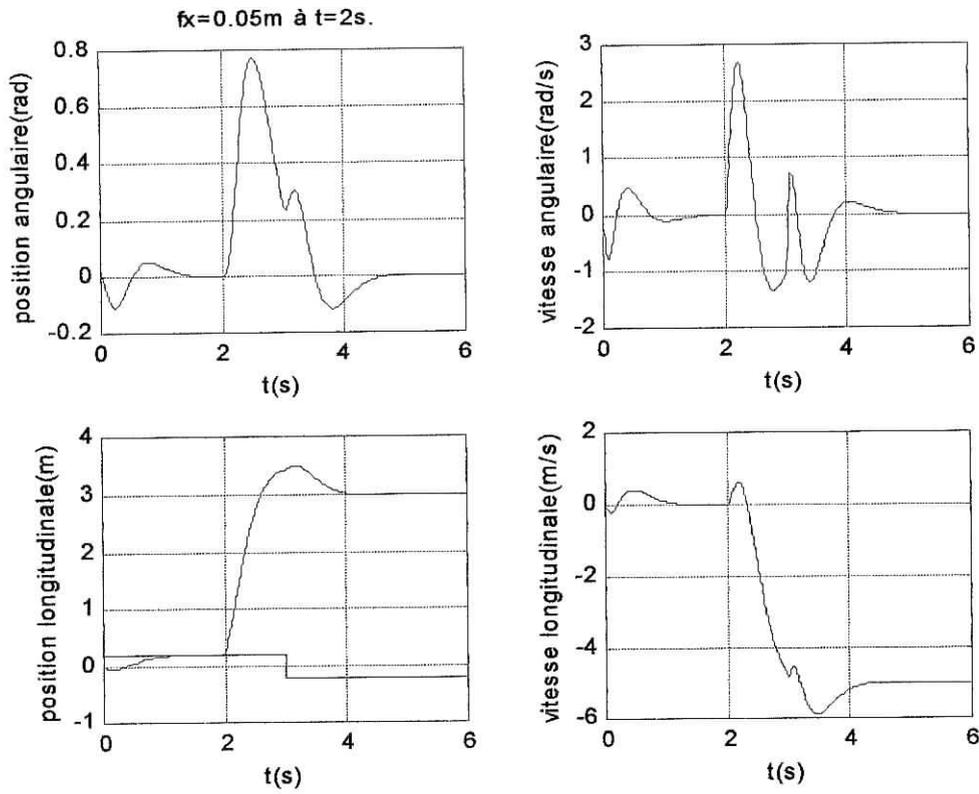


figure 4-3 système sans commande tolérante.

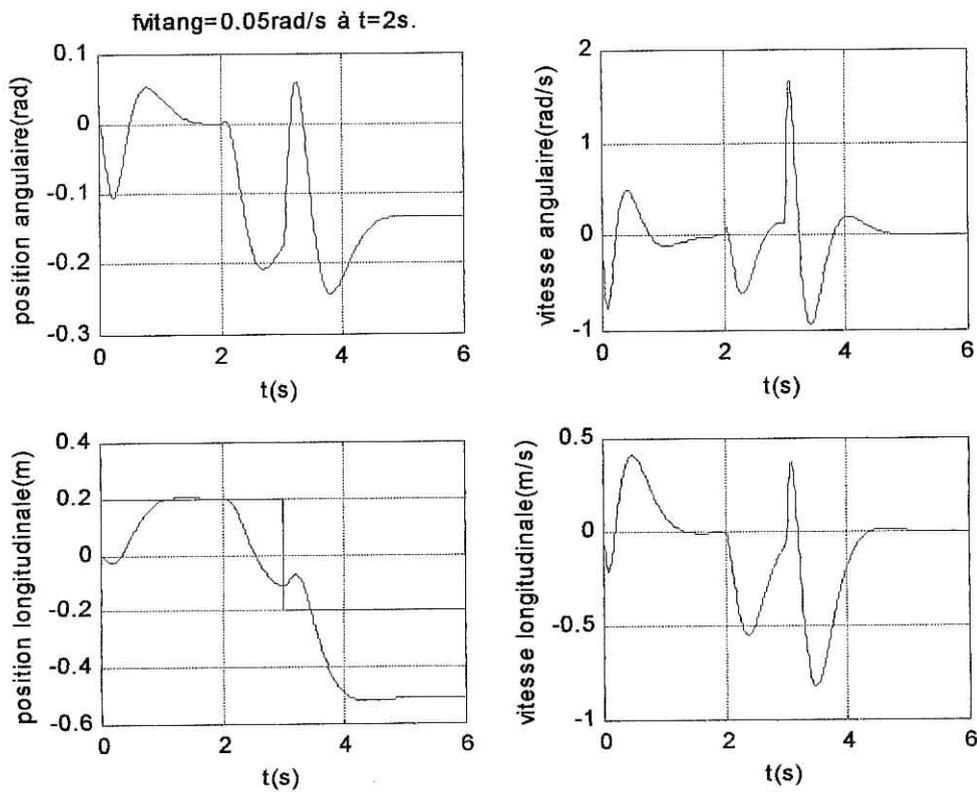


figure 4-4 système sans commande tolérante.

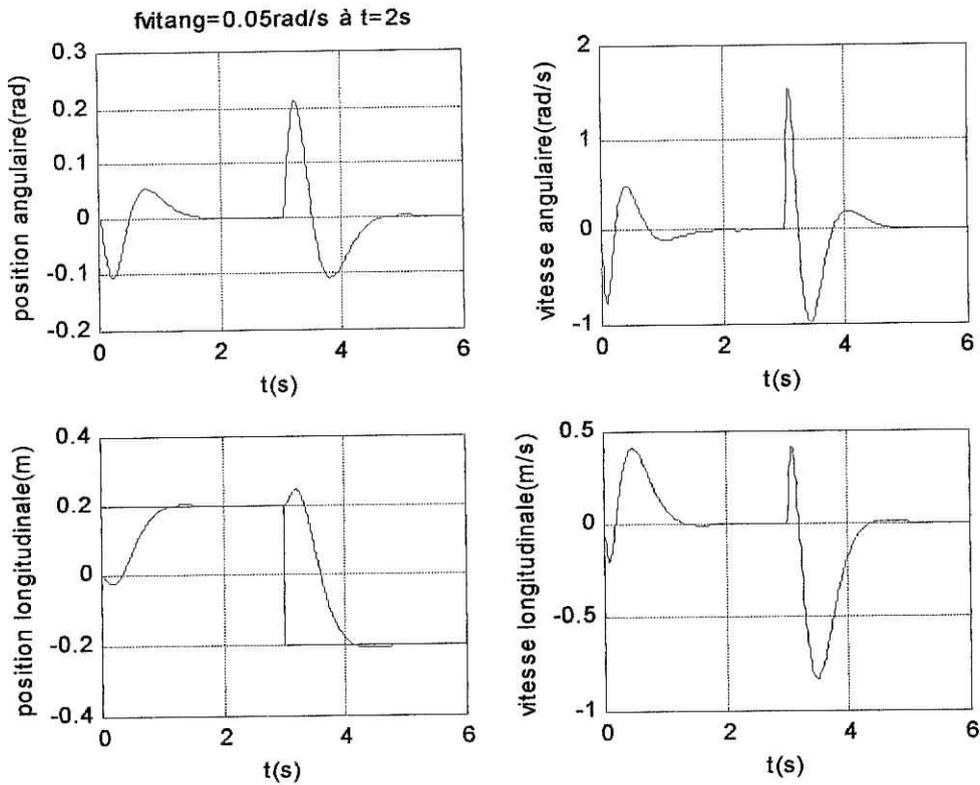


figure 4-5 système avec commande tolérante.

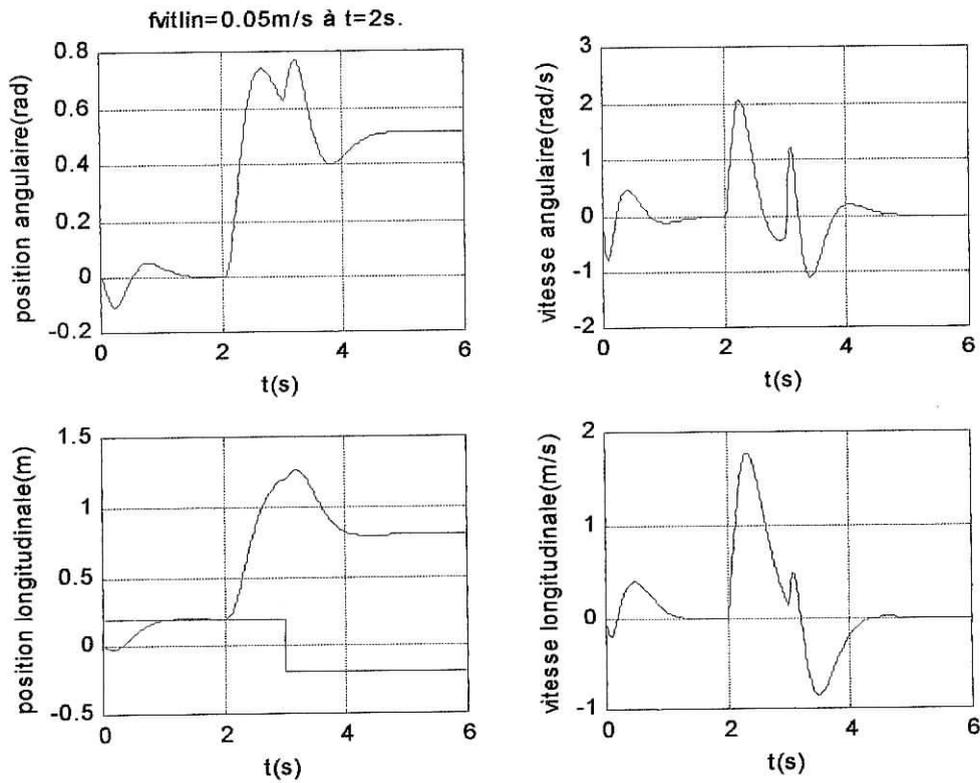


figure 4-6 système sans commande tolérante.

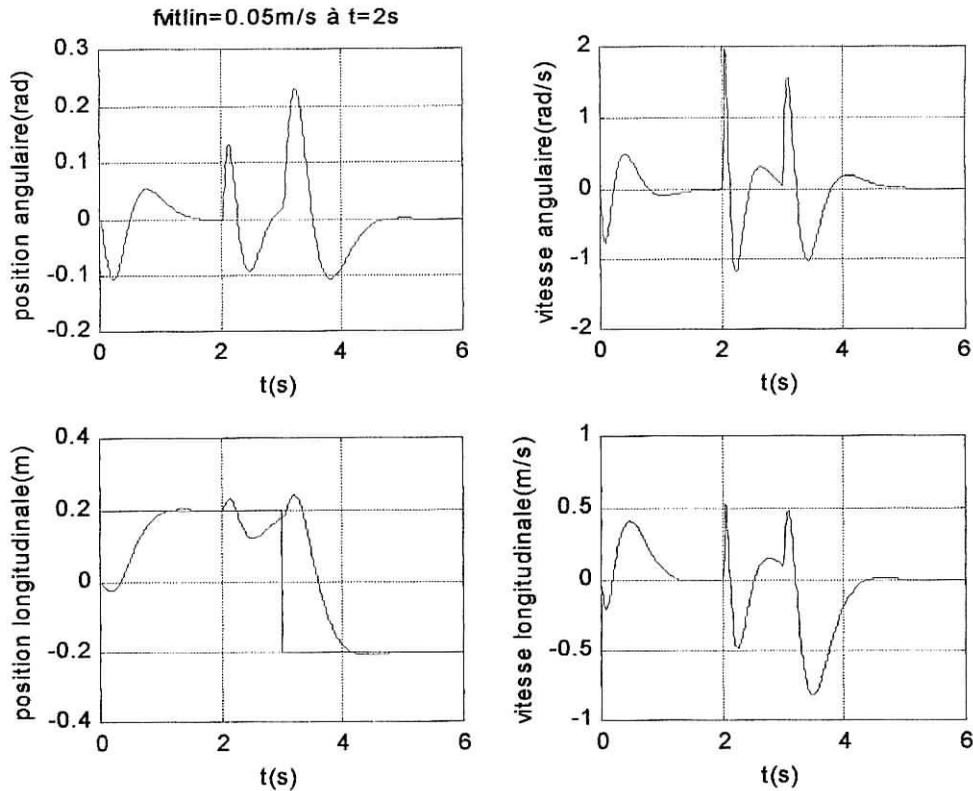


figure 4-7 système avec commande tolérante.

**Interprétation :**

Des figures précédentes, on note que les commandes tolérantes synthétisées ont permis de garder exactement les performances nominales du système(voir chapitre 2).Ceci a été possible car la reconfiguration de la commande a été effectuée juste au moment de l'apparition de la panne(à t=2s).En pratique, le switch n'est pas fait aussi rapidement il faut un certain temps pour décider qu'il y a panne et procéder à l'isolation.

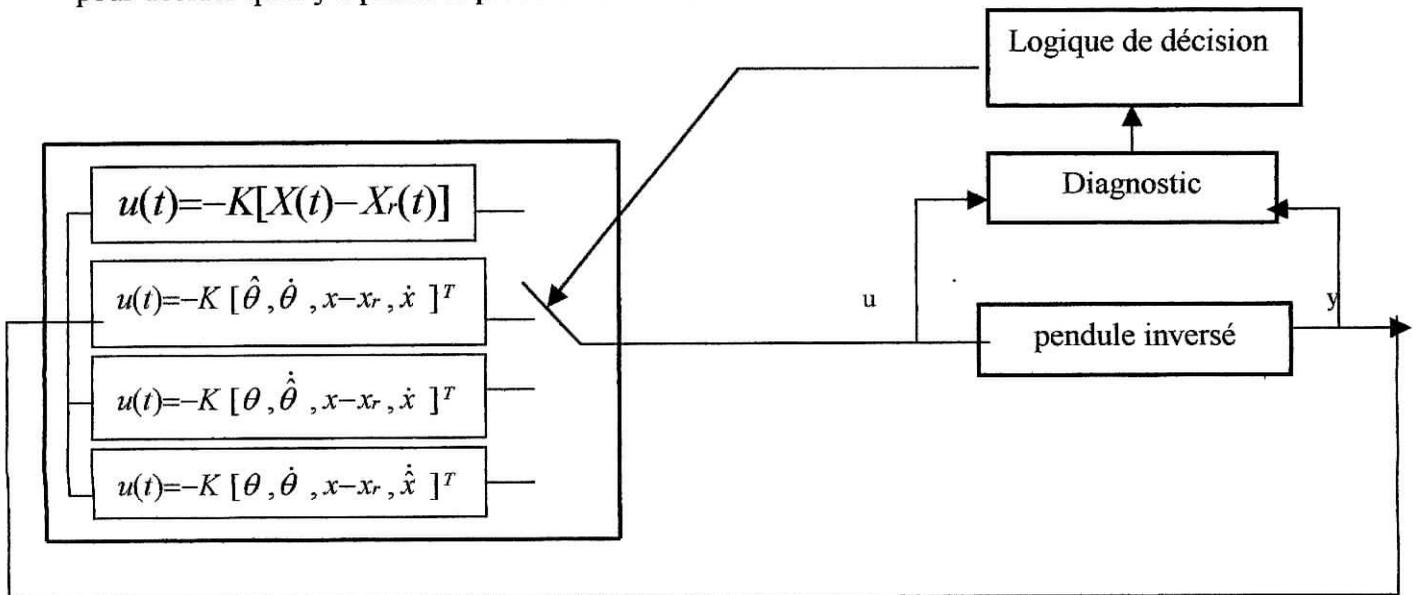
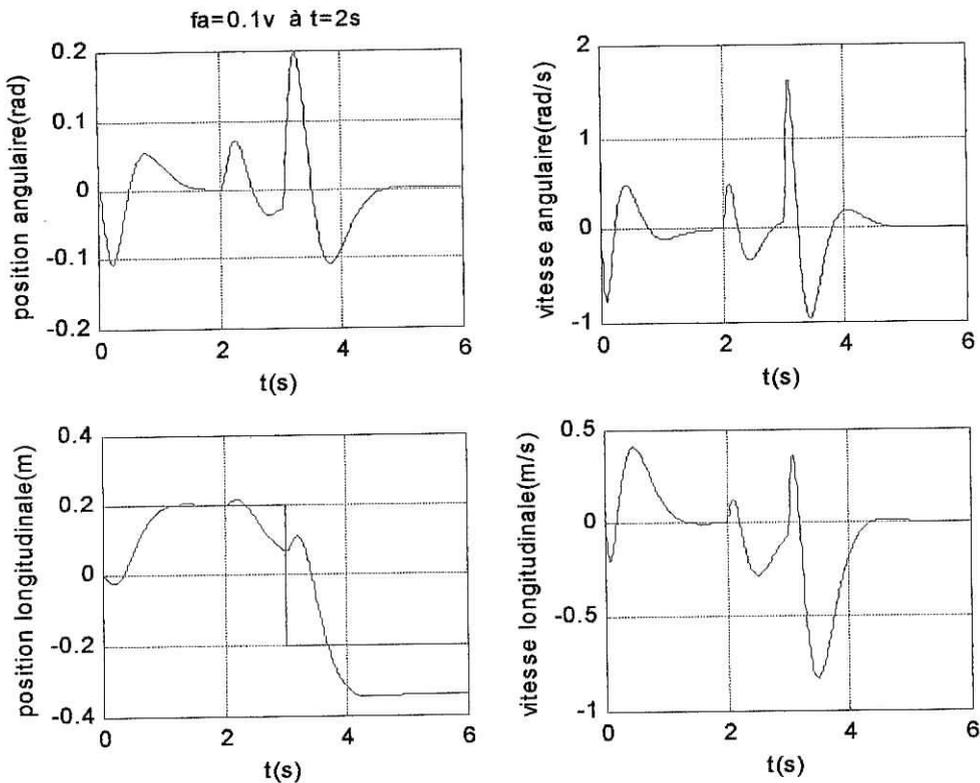


figure 4-8 Reconfiguration de la commande en présence de pannes capteurs.

**2-Solution pour prévenir les pannes actionneur :**

Pour palier au problème du défaut actionneur, on peut procéder comme suit :  
 3 actionneurs identiques (l'actionneur incluant le microcontrôleur et le moteur à courant continu) sont mis en parallèle pour générer la commande voulue. La commande qui sera appliquée au système sera alors celle donnée par au moins deux d'entre eux.



**figure 4-9** système avec actionneur défaillant.

**Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre une technique de synthèse de la commande tolérante pour les pannes capteurs. Cette technique se réduit à remplacer dans le calcul de la commande, la mesure de la variable d'état relevée du capteur défaillant par son estimée. Cette méthode nécessite donc l'observabilité de cette variable.

***CONCLUSION GENERALE***

***Conclusion générale :***

Dans le chapitre introductif, nous avons essayé de mettre en exergue les méthodes de détection et d'isolation de pannes. Celles ci peuvent être réparties en deux grandes classes :

- Les méthodes à base de modèle analytique : approche par espace de parité, par estimation paramétrique ou par observateurs d'état.
- Les méthodes à base de modèle qualitatif ou d'intelligence artificielle.

Ensuite, au second chapitre, nous avons développé pour le pendule inversé, le système à diagnostiquer, une commande linéaire quadratique à partir d'un modèle linéarisé autour d'un point de fonctionnement. Cette commande a pu garantir la stabilité ainsi que les performances pour une zone du domaine de fonctionnement. Elle s'est avérée valide pour le système non linéaire, mais pour un domaine de fonctionnement plus restreint.

Au troisième chapitre, nous avons mis en œuvre deux types d'observateurs d'état : un observateur d'ordre plein et des observateurs généralisés afin de générer des résidus sensibles aux défaillances de l'actionneur, des capteurs et des pannes système du pendule inversé linéarisé. Ce qui a permis de détecter puis de localiser grâce à une logique de décision toutes les pannes sauf les variations paramétriques. Les observateurs synthétisés ont aussi permis le diagnostic du système non linéaire sous certaines conditions de fonctionnement.

Enfin, au dernier chapitre, afin de maintenir les performances du système étudié en présence de pannes, nous avons déterminé une loi de commande tolérante aux défauts capteurs par une technique d'estimation d'état et proposer une solution pour remédier aux pannes de l'actionneur.

Le sujet est loin d'être épuisé. Plusieurs problèmes restent encore ouverts, nous proposons comme perspective : l'utilisation des observateurs non linéaires pour la génération des résidus et comme application le diagnostic du double pendule inverse.

*Bibliographie :*

- [1] A.CORDOSO, A.DOURLADO « synthesis of a robust controller and fault detection filter for an unstable system », Site internet: [www.control.dei.uc.pt/pdf/AC062000.pdf](http://www.control.dei.uc.pt/pdf/AC062000.pdf)
- [2] E.CHOW, A.WILLSKY (1984) . « Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems », IEEE Trans. Automat. contr., vol.29, No.7, pp.603-614.
- [3] P.FELICIO « Applying Parametric Fault detection to a Mechanical system », Proceeding of the American Control Conference 2002.
- [4] P.M. FRANK, B.KOPPEN-SELIGER. (1995). « Fault Detection and Isolation in Technical Processes with Neural Networks », zur Conference on Decision and Control CDC'95, New Orleans, U.S.A.
- [5] P.M. FRANK . « The application of fuzzy logic to Fault diagnosis and supervision », Rencontres sur la logique floue 1998.
- [6] E. FRISK. (1996). « Model-based fault diagnosis applied to an SI - engine », thèse de master de l'institut de technologie de Linköping.
- [7] E. FRISK. (2001). « Residual génération for fault diagnosis », thèse de PHD de l'institut de technologie de Linköping.
- [8] J.GERTLER, D.SINGER. « A new Structural Framework for parity equation based failure detection and isolation », Automatica, vol.26, 1990, pp.381-388.
- [9] Y.HUO, P. IOANNOU, M. MIRMIRANI. « Fault tolerant control and reconfiguration for high performance aircraft: Review », Catt technical Report 01-11-01.
- [10] R.ISERMANN .(1984). « Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods », Automatica, vol.20, pp.387-404.
- [11] R.ISERMANN .(1994). « Integration of Fault Detection and Diagnosis Methods », Reprints of IFAC sympo. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process, Espoo, Finland, vol.2, pp.575-590.
- [12] R.ISERMANN. (1997). « Supervision Fault-detection and Fault-diagnosis Methods – An Introduction », Control Eng.Practice; vol5 ,No.5, pp.639-652.
- [13] J. KARLSSON.(2001). « Diagnosis of the air distribution system of the JAS39 Gripen environmental control system », thèse de master de l'institut de technologie de Linköping.
- [14] D. MAQUIN , J.RAGOT.(2000). « Diagnostic des systèmes linéaires », édition Hermès, Paris.
- [15] A. MEZHOUD. (2000). « Détection et Localisation de Pannes dans les Systèmes de commande : Approche par Observateurs de Luenberger », thèse de magister de l'ENP.

- [16] F. MUDRY. « Modélisation et régulation d'un pendule inversé », note d'application, Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud, 2001.
- [17] M. NOURA, D.SAUTER, C. AUBRUN. «A fault detection and accommodation method applied to an inverted pendulum », 3<sup>rd</sup> IEEE Conference Control Applications Glasgow, vol.3,pp1393-1402, 1994.
- [18] P. NYGREN. (1996).«Implementation of model based diagnosis methods on an invented pendulum», these de master de l'institut de technologie de Linköping.
- [19] R.J.PATTON, J.CHEN . «Observer-based Fault Detection and Isolation :robustness and applications»,Control Eng Practice, vol n°5,1997.
- [20] A.S.WILLSKY .(1976). «A survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic systems», Automatica,vol.12,pp.601-611.