

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'automatique

Spécialité Automatique

Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme

du Master en Automatique

Thème :

**Modélisation, observation et diagnostic des systèmes
cardiovasculaire et respiratoire**

Proposé et dirigé par :

Pr M.TADJINE

Réalisé par :

Lilia BELABED

Souad HADJ-SAID

Promotion juin 2013

ملخص

إن العمل الذي تم من خلال مذكرة مشروع مستر تناول دراسة التشخيص لحالات الشذوذ للقلب و الأوعية الدموية من خلال استخدام المناهج المؤسسة على المراقب.

الكلمات المفتاحية

المراقبة، الهجين، التشخيص، القلب والأوعية الدموية، والجهاز التنفسي

Résumé

Le travail effectué dans le cadre du Master consiste à étudier le diagnostic des anomalies du système cardiovasculaire en utilisant les méthodes à base d'observateurs.

Mots clé : observation, hybride, diagnostic, cardiovasculaire, respiratoire.

ABSTRACT

This thesis is about the study deals with the diagnostic of some cardiovascular anomalies using observers based methods.

Keywords: observation, hybrid, diagnostic, cardiovascular, breathing.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Détection des anomalies du système cardiovasculaire	15
1. Introduction.....	15
2. Intérêts et objectifs du diagnostic des systèmes physiques	15
3. Etat de l'art du diagnostic des systèmes physiques.....	16
a. Définitions et généralités sur les défauts	16
a. Etapes de diagnostic des défauts	20
b. Présentation des méthodes de diagnostic.....	21
4. Les pathologies cardiovasculaires :.....	28
a. Valvulopathies	28
b. Troubles du rythme cardiaque	29
c. Artériosclérose	31
5. Détection d'anomalies cardiovasculaires par les méthodes à base d'observateur	31
a. Méthode des résidus	31
b. Méthode d'estimation des défauts des paramètres.....	47
6. Conclusion	58

Liste des figures

- 1 Différents types de défauts.
- 2 Etapes du diagnostic
- 3 Méthodes du diagnostic des défauts
- 4 Schéma représentant la redondance matérielle (cas duplex)
- 5 Schéma représentant la redondance matérielle (cas triplex)
- 6 Méthodes du diagnostic à base de modèles analytiques
- 7 Schéma bloc de l'estimation paramétrique
- 8 Schéma de principe du diagnostic des défauts à base d'observateurs
- 9 L'erreur d'observation de la pression ventriculaire (e1) avec $u_1=0$
- 10 L'erreur d'observation de la pression auriculaire (e2) avec $u_1=0$
- 11 L'erreur d'observation de la pression systémique (e3) avec $u_1=0$
- 12 L'erreur d'observation de la pression aortique (e4) avec $u_1=0$
- 13 L'erreur d'observation du débit aortique (e5) avec $u_1=0$
- 14 L'erreur d'observation de la pression ventriculaire (e1) avec $u_1=1$
- 15 L'erreur d'observation de la pression auriculaire (e2) avec $u_1=1$
- 16 L'erreur d'observation de la pression systémique (e3) avec $u_1=1$
- 17 L'erreur d'observation de la pression aortique (e4) avec $u_1=1$
- 18 L'erreur d'observation du débit aortique (e5) avec $u_1=1$
- 19 L'erreur d'observation de la pression ventriculaire (e1) avec $u_2=0$
- 20 L'erreur d'observation de la pression auriculaire (e2) avec $u_2=0$
- 21 L'erreur d'observation de la pression systémique (e3) avec $u_2=0$
- 22 L'erreur d'observation de la pression aortique (e4) avec $u_2=0$
- 23 L'erreur d'observation du débit aortique (e5) avec $u_2=0$
- 24 L'erreur d'observation de la pression ventriculaire (e1) avec $u_2=1$
- 25 L'erreur d'observation de la pression auriculaire (e2) avec $u_2=1$
- 26 L'erreur d'observation de la pression systémique (e3) avec $u_2=1$
- 27 L'erreur d'observation de la pression aortique (e4) avec $u_2=1$

- 28 L'erreur d'observation du débit aortique (e5) avec $u_2=1$
- 29 Résidu 1
- 30 Résidu 1
- 31 Résidu 1
- 32 Résidu 1
- 33 Erreur d'observation de la pression ventriculaire (e1) avec Fréquence cardiaque égale à 90 battements/min.
- 34 Erreur d'observation de la pression auriculaire (e2) avec Fréquence cardiaque égale à 90 battements/min.
- 35 Erreur d'observation de la pression systémique (e3) avec Fréquence cardiaque égale à 90 battements/min.
- 36 Erreur d'observation de la pression aortique (e4) avec Fréquence cardiaque égale à 90 battements/min.
- 37 Erreur d'observation du débit aortique (e5) avec Fréquence cardiaque égale à 90 battements/min.
- 38 Pression ventriculaire réelle et estimée
- 39 Pression auriculaire réelle et estimée
- 40 Pression systémique réelle et estimée
- 41 Pression aortique réelle et estimée
- 42 Débit aortique réel et estimé
- 43 Défaut sur Rs réel et estimé
- 44 Défaut sur Ca réel et estimé
- 45 Pression ventriculaire réelle et estimée
- 46 Pression auriculaire réelle et estimée
- 47 Pression systémique réelle et estimée
- 48 Pression aortique systémique réelle et estimée
- 49 Débit aortique réel et estimé

Liste des tableaux

- 1 Table de Signature en présence d'anomalies valvulaires
- 2 Allocation des résidus

Nomenclature

R : résistance.

C : capacité.

P : pression.

V : volume.

ΔP : différence de pression.

ΔV : différence de volume.

Q : débit sanguin.

D_a : diode représentant la valvule aortique.

D_m : diode représentant la valvule mitrale.

R_a : résistance de la valvule aortique.

R_m : résistance de la valvule mitrale.

C_v : compliance du ventricule gauche.

R_c : résistance caractéristique.

L_s : inertie du sang dans l'aorte.

C_s : compliance systémique.

R_s : résistance systémique.

C_r : compliance auriculaire.

P_v : pression ventriculaire.

f_a : flux aortique.

P_a : pression aortique.

P_s : pression systémique.

f_r : flux du retour veineux.

P_r : pression dans l'oreillette.

V_0 : volume théorique correspond à une pression nulle dans le ventricule.

tn : temps normalisé.

tc : période du cycle cardiaque.

E(t) : élastance du ventricule gauche.

E_{max} : valeur maximal de l'élastance ventriculaire.
 E_{min} : valeur minimal de l'élastance ventriculaire.
 $E_r(t)$: élastance du de l'oreillette gauche.
 P_{Lg} : force d'entraînement dans la respiration
 R_{Lg} : inertie du flux d'air,
 E_{rmax} : valeur maximal de l'élastance auriculaire.
 E_{rmin} : valeur minimal de l'élastance auriculaire.
 X : vecteur d'état.
 $A_i(t)$: matrice dynamique du système.
 U : commande naturelle du système.
 $G(X; t)$: matrice de commande.
 $x(t)$: vecteur d'état.
 $\dot{x}(t)$: dynamique du vecteur d'état.
 $y(t)$: vecteur de sortie.
 A : matrice d'état.
 B : matrice de commande.
 C : matrice d'observation.
 D : matrice d'action directe.
 $f_p(t)$: défauts composants ou paramétriques.
 $f_c(t)$: défauts du type capteur.
 $f_a(t)$: défauts du type actionneur.
 $d_a(t)$: vecteur des perturbations agissant sur le système.
 $d_c(t)$: vecteur des bruits agissant sur le système.
 E : matrice de distribution des perturbations.
 $E_f(t)$: distribution vectorielle modélisant l'effet des défauts.
 \hat{x} : estimé du vecteur d'état.
 $\dot{\hat{x}}$: dynamique du vecteur d'état estimé.
 u_1 : commande réelle de la valvule mitrale.
 u_2 : commande réelle de la valvule aortique.
 f_m : défaut additif sur la valvule mitrale.
 f_{ao} : défaut additif sur la valvule aortique

Détection des anomalies du système cardiovasculaire

1. Introduction

Dans ce chapitre, dans un premier temps, nous commencerons par une introduction à l'état de l'art du diagnostic des défauts dans les systèmes physiques. L'intérêt portera essentiellement sur le problème de détection et d'isolation des défauts. Nous présenterons un panorama des défauts dans les systèmes physiques en général. Ensuite, il sera question, d'aborder les différents concepts et méthodes rencontrés dans la littérature du diagnostic des défauts. Nous aborderons après quelques approches de détection et d'isolation des défauts à base d'observateurs. Vu la nature hybride de notre système cardiovasculaire, nous évoquerons aussi la détection et l'isolation des défauts pour les systèmes hybrides.

Dans un second temps, nous appliquerons certaines méthodes de diagnostic à la détection d'anomalies cardiovasculaires. Pour cela, nous commencerons par citer quelques pathologies cardiovasculaires avec leur influence sur le modèle cardiovasculaire et ses paramètres. Ensuite, nous présenterons les résultats d'application des méthodes de diagnostic sur le système cardiovasculaire.

2. Intérêts et objectifs du diagnostic des systèmes physiques

Dans le domaine de l'industrie et de la production industrielle le champ de la compétitivité repose sur plusieurs critères de performance, de robustesse et de qualité. Mais malgré toutes les assiduités pour l'établissement de ces conceptions, les défaillances de celles-ci se font fréquentes et peuvent résulter soit d'une fin de cycle de vie d'un élément et aussi de l'apparition soudaine d'une panne brusque.

Alors que ces éléments de production représentent pour la plupart du temps des enjeux majeurs soit à but lucratifs (ex : chaîne de production dans une usine) ou pour assurer un service (ex : un scanner dans un hôpital), elles peuvent aussi toucher à un élément des plus importants qui représente la sécurité matérielle, environnementale, et même humaine. Pour éviter des conséquences irréversibles, des méthodes de supervision et de surveillance ont été mises en place et qui reposent toutes sur le diagnostic des systèmes.

Le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à identifier les défaillances et/ou les défauts qui affectent un système. Plus généralement, le diagnostic apporte une contribution à la solution de détection et de localisation d'un mauvais fonctionnement.

3. Etat de l'art du diagnostic des systèmes physiques

a. Définitions et généralités sur les défauts

- **Définitions**

- Anomalie : particularité non conforme à la loi naturelle ou à la logique.
- Défaut : anomalie de comportement au sein d'un système physique.
- Défaillance : anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique.
- Panne : inaptitude d'un dispositif à accomplir sa fonction.
- Perturbation : tout phénomène conçu comme normal influençant un processus représenté par un modèle de référence.
- Résidu : un signal conçu comme un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence.

- **Classification des défauts**

Les défauts sont des événements qui apparaissent à différents endroits du système. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation en trois catégories :

Défauts actionneurs : ils agissent au niveau de la partie opérative et détériorent ainsi le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale ou partielle d'un actionneur de l'organe de commande.

Défauts capteurs : ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur

affichée par rapport à la vraie valeur, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture, ainsi on pourra même extraire la partie utile du signal mesure. Tandis qu'un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer qui donne carrément des valeurs erronées hors de sens et d'utilité.

Défauts systèmes ou composants : ce sont des défauts qui ont lieu dans les composants du système lui-même. Ceci englobe tous les défauts qui ne peuvent pas être classés parmi les défauts de capteurs ou d'actionneurs. Ces défauts représentent les changements des paramètres physiques du système, par exemple la masse, les coefficients aérodynamiques, la constante de dissipation,...etc. Ils ont souvent comme conséquence le changement du comportement dynamique du système commandé. Les défauts de composants système sont en général modélisés sous la forme d'un système à paramètres variables.

La figure (1) illustre ces différents types de défauts.

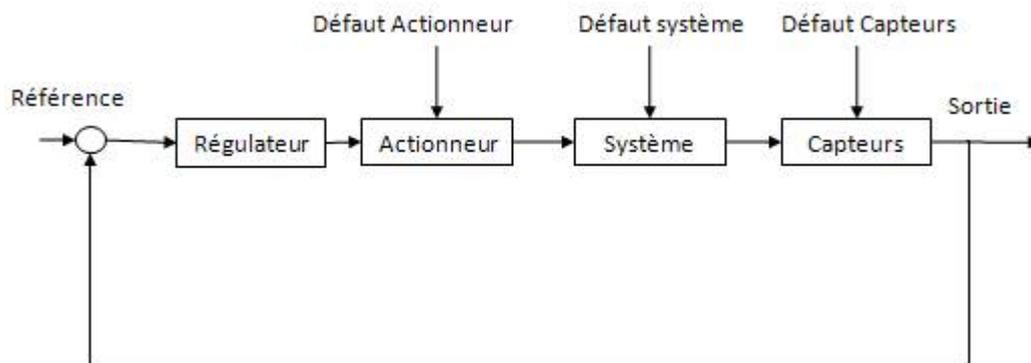


Figure 1 - Différents types de défauts.

Les défauts cités ci-avant peuvent être qualifiés d'additifs s'ils affectent le comportement du procédé indépendamment des entrées connues (tels que les défauts actionneurs et défauts capteurs), et de multiplicatifs (défauts système) s'ils affectent le procédé d'une façon dépendante des entrées connues

- **Comportement des défauts**

Selon leurs évolutions temporelles, il est possible de distinguer trois types de défauts, à savoir [2] :

Les défauts brusques (biais) : ils se produisent instantanément, souvent à cause de dommages matériels. Habituellement ils sont très graves car ils affectent les performances et/ou la stabilité du système commandé, de tels défauts exigent une réaction rigoureuse du bloc de la commande tolérante aux défauts (FTC).

Les défauts progressifs (dérives) : ils représentent les changements lents des valeurs paramétriques. Souvent dus au vieillissement, Ils sont plus difficiles à détecter en raison de leur dynamique lente, mais sont également moins graves.

Les défauts intermittents (valeurs aberrantes) : c'est des défauts qui apparaissent et disparaissent à plusieurs reprises, par exemple à cause d'un câblage partiellement endommagé.

- **Modélisation des défauts**

Supposons que l'on dispose d'un modèle linéaire d'un procédé sous la forme d'une représentation d'état, tel que :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1)$$

Où $x(t)$ représente le vecteur d'état, $u(t)$ le vecteur de commande et $y(t)$ le vecteur de sortie du système, tels que : $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^p$. A, B, C et D sont des matrices de dimensions respectives $n \times n$, $n \times m$ et $p \times m$. Alors :

- Les défauts actionneurs sont modélisés comme des signaux additifs aux signaux d'entrée.
- Les défauts composants sont modélisés comme une dynamique additionnelle avec une matrice de distribution.
- Les défauts capteurs sont modélisés par des signaux additifs aux signaux de sortie.

Si l'on suppose que les trois types de défauts agissent sur le système, la modélisation mettant en évidence ces derniers peut être donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Hf_p(t) + B(u(t) + f_a(t)) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + f_c(t) \end{cases} \quad (2)$$

Où $f_a(t)$, $f_p(t)$ et $f_c(t)$ représentent respectivement les défauts d'actionneurs, les défauts composants et les défauts des capteurs, tel que : $f_a(t) \in \mathbb{R}^{m \times 1}$, $f_p(t) \in \mathbb{R}^{c \times 1}$, $f_c(t) \in \mathbb{R}^{p \times 1}$. La matrice H est dite matrice de distribution de $f_p(t)$ et traduit l'effet de f_p sur le système.

• Modélisation des perturbations

En plus des défauts, le système peut être soumis à d'autres signaux dits entrées inconnues (perturbations et bruits), ainsi qu'à des incertitudes de modélisation. Si l'influence de ces signaux sur le système est connue, alors il est possible de réécrire les équations précédentes sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Hf_p(t) + B(u(t) + f_a(t)) + Ed_a(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + f_c(t) + d_c(t) \end{cases} \quad (3)$$

Où $d_a(t) \in \mathbb{R}^{d \times 1}$, $d_c(t) \in \mathbb{R}^{p \times 1}$ représentent respectivement les perturbations et les bruits agissant sur le système. La matrice E est dite matrice de distribution de $d_a(t)$

L'origine des perturbations est souvent due à une modélisation imparfaite du système, engendrant une action non connue sur ce dernier. Les perturbations font l'objet de caractéristiques particulières. Lorsque ces dernières sont d'ordre statistique, le système est dit bruité.

Pour des raisons de simplicité, il est possible de mettre le système (3) sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Hf_p(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_d d(t) + F_f f(t) \end{cases} \quad (4)$$

Où $E_f = [B \quad H \quad 0_{n \times p}]$, $E_f = [E \quad 0_{n \times p}]$, $E_f = [0_{p \times m} \quad 0_{p \times c} \quad I_{p \times p}]$,
 $E_f = [0_{p \times d} \quad I_{p \times p}]$, $d(t) = [d_a d_c]^T \in \mathbb{R}^q$ et $f(t) = [f_a f_c f_p]^T \in \mathbb{R}^s$.

Les matrices $0_{p \times d}$ et $I_{p \times p}$ sont respectivement la matrice nulle de dimension $n \times p$ et la matrice identité $p \times p$.

Généralement, dans les problèmes de détection et de localisation des défauts à base d'observateurs, c'est cette dernière modélisation qui est prise en compte. Cependant, il faut signaler que selon le contexte, les objectifs du diagnostic, les techniques utilisées et bien d'autres critères, ce modèle peut différer de façon à s'adapter aux exigences. Par exemple, pour résoudre le problème de détection et de localisation des défauts, il est possible de décomposer le vecteur défaut en des défauts que l'on désire détecter et qui constitueront alors le vecteur $f(t)$ et les défauts que l'on ne veut pas détecter et que l'on regroupera dans le vecteur $d(t)$. Ceci permet d'appliquer certaines méthodes de localisation.

Pour être exploitable, au vu des objectifs de diagnostic fixés, le modèle doit traduire au mieux le comportement du système. Cependant, la précision d'un modèle est généralement obtenue au détriment de sa simplicité. Le choix entre :

- Les modèles linéaires pour lesquels de nombreuses méthodes de traitement sont connues mais possédant une plage de fonctionnement limitée ;
- Les modèles non linéaires d'utilisation complexe mais possédant un domaine de validité étendu est difficile à effectuer [2].

a. Etapes de diagnostic des défauts

En se référant à la figure (2), on distingue deux étapes de diagnostic, qui sont :

- Génération de résidus : cette phase consiste à générer un signal résiduel reflétant la distance entre le modèle du système et son comportement observé au cours du temps.
- Prise de décision : cette phase permet à l'utilisateur de détecter et localiser la présence éventuelle d'un ou de plusieurs défauts en implémentant un test de détection sur les résidus générés.

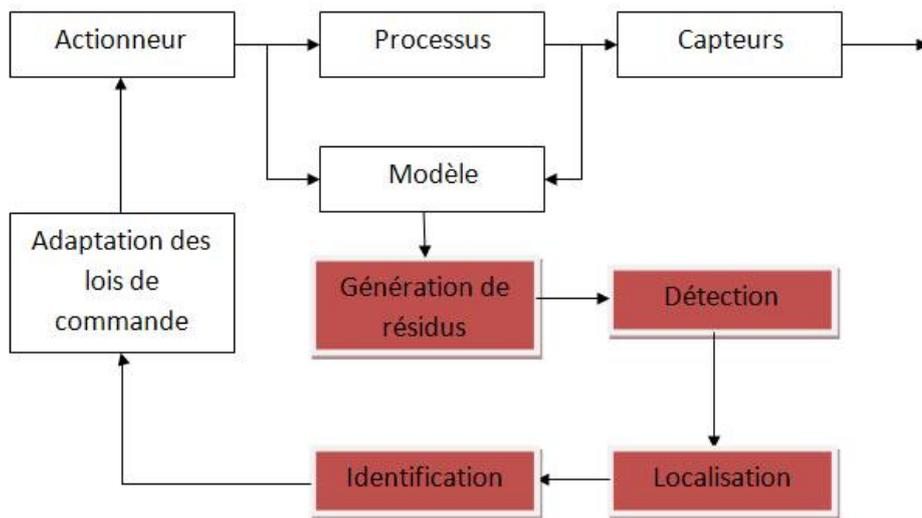


Figure 2 - Etapes du diagnostic à base de modèles

Cette deuxième étape oblige une bonne connaissance du système et elle se divise en trois actions successives [3] :

- Module de détection: consiste à signaler la présence d'un défaut, c'est-à-dire à déterminer si l'état courant du système et ses éléments sont normaux ou anormaux, signalant toute déviation par rapport au fonctionnement attendu.
- Module de localisation : consiste à indiquer quel organe ou quel composant est affecté par le défaut.
- Module d'identification : cette tâche a pour objectif de caractériser le défaut en durée et amplitude, afin d'en déduire sa sévérité.

b. Présentation des méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés en pratique et en théorie. On peut les classer selon le schéma de la figure (3).

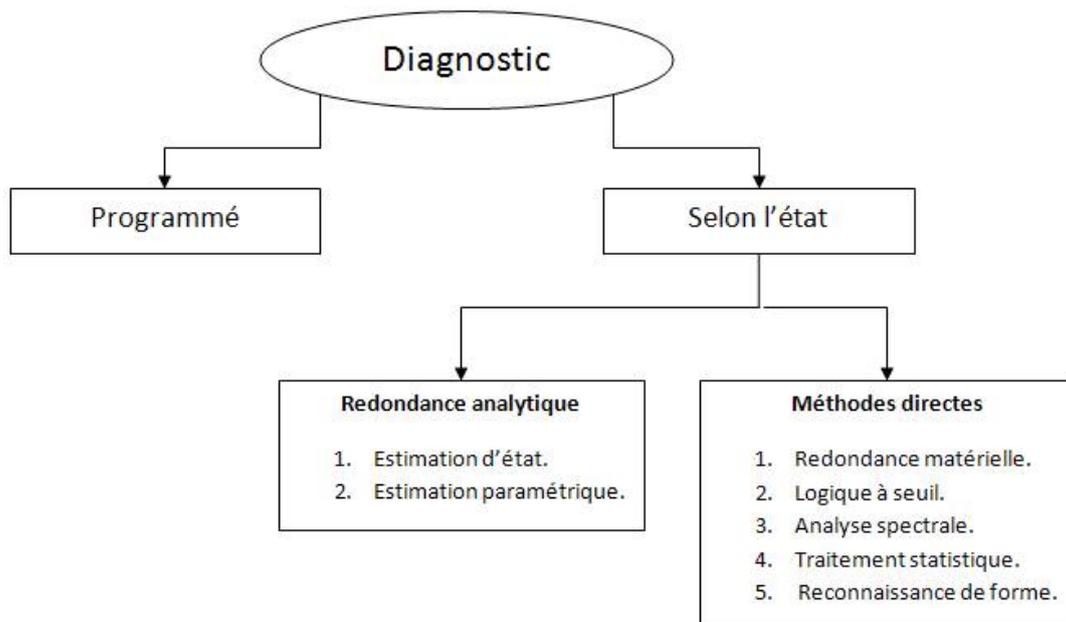


Figure 3 - Méthodes du diagnostic des défauts.

- **Les méthodes systématiques (ou maintenance programmée)**

La méthode systématique désigne une technique fondée sur une étude statistique de la fiabilité du système. Par observation, les temps moyens de bon fonctionnement des éléments du système sont déterminés, et un remplacement programmé des pièces est établi, entraînant soit un changement prématuré, soit un arrêt du système physique à cause de la défaillance ou de la panne.

- **Les méthodes selon l'état**

La maintenance selon l'état nécessite la mise en place de divers blocs cités auparavant (la détection, la localisation et l'identification de défaut). L'intérêt de cette stratégie est d'optimiser le fonctionnement et la disponibilité des installations. De manière globale, cette stratégie se décompose en deux familles de méthodes :

➤ Les méthodes directes :

Ces méthodes ne nécessitent pas de modèle analytique et font appel aux diverses techniques dont les principales sont citées ci-après :

- La redondance matérielle : Cette méthode consiste à doubler ou tripler les chaînes d'instrumentation afin d'obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système.

Les figures (4) et (5) montrent la redondance matérielle duplex et triplex, respectivement.

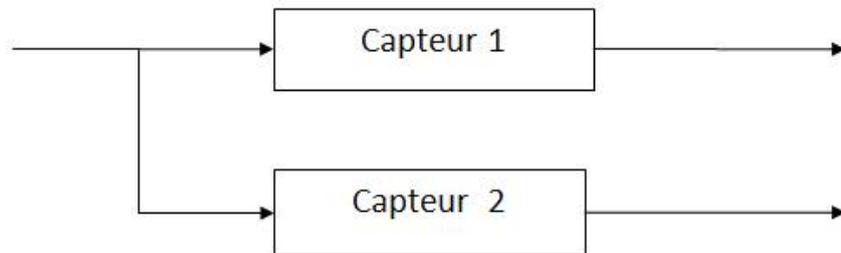


Figure 4 - Schéma représentant la redondance matérielle (cas duplex).

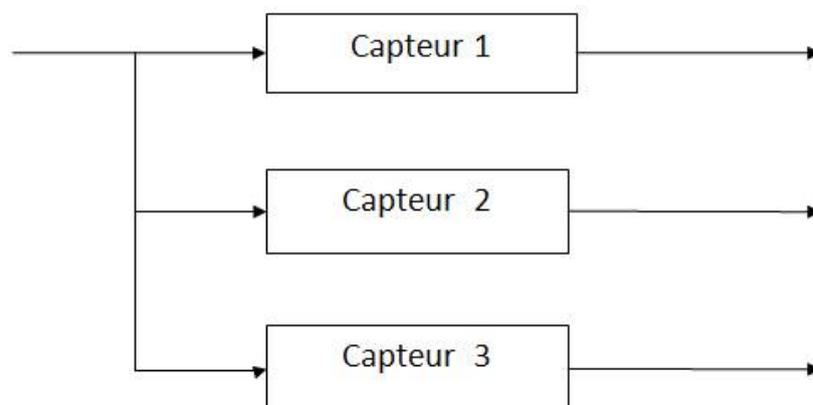


Figure 5 - Schéma représentant la redondance matérielle (cas triplex).

- Logique à seuil : Les variables mesurées sont comparées avec des valeurs limites constantes ou adaptatives. Un premier niveau indique la présence probable d'un défaut alors qu'un second niveau peut en caractériser la gravité. Le franchissement d'un seuil révèle la présence d'une anomalie.
- Analyse spectrale : Certains signaux mesurés ont une fréquence typique en fonctionnement normale et tout changement de celle-ci peut être considéré comme un indicateur de défaut. Le contenu spectral des signaux est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter les défauts dans les machines électriques, tels que les ruptures de barres au rotor des machines synchrones.

- Traitement statistique : Cette méthode de traitement du signal repose sur la détection de changement de caractéristiques (moyenne et variance) d'une variable aléatoire.
- Reconnaissance de forme : Cette technique utilise des algorithmes afin de classer des objets dont l'aspect a varié par rapport à une référence. A chaque instant, la forme type à laquelle un objet ressemble le plus doit être déterminée.
- Système expert : Un système expert est un système informatique, destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et d'un raisonnement d'un ou plusieurs spécialistes [3].

➤ Les méthodes à base de modèle analytique :

Ces méthodes nécessitent un modèle analytique du système. Un tel modèle est constitué d'un ensemble de relations analytiques, statistiques ou dynamiques, entre différentes variables représentant les phénomènes associés au système. Deux grands types de méthodes se dégagent pour le diagnostic à base de modèles analytiques : l'estimation paramétrique et l'estimation d'états. La figure (4.6) montre ces différentes méthodes.

- Estimation paramétrique

L'approche d'estimation paramétrique considère que l'influence des défauts se reflète sur les paramètres et non pas uniquement sur les variables du système physique. Le principe de cette méthode consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en évaluant la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé

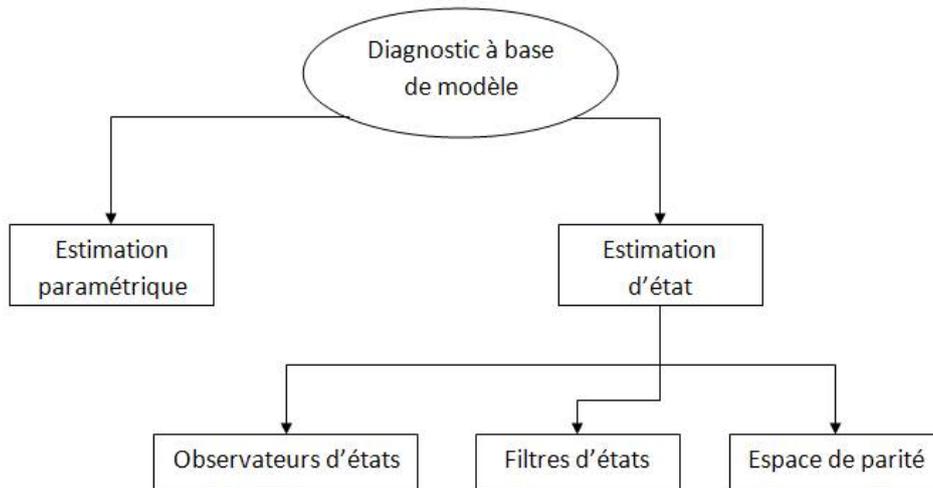


Figure 6 - Méthodes du diagnostic à base de modèles analytiques.

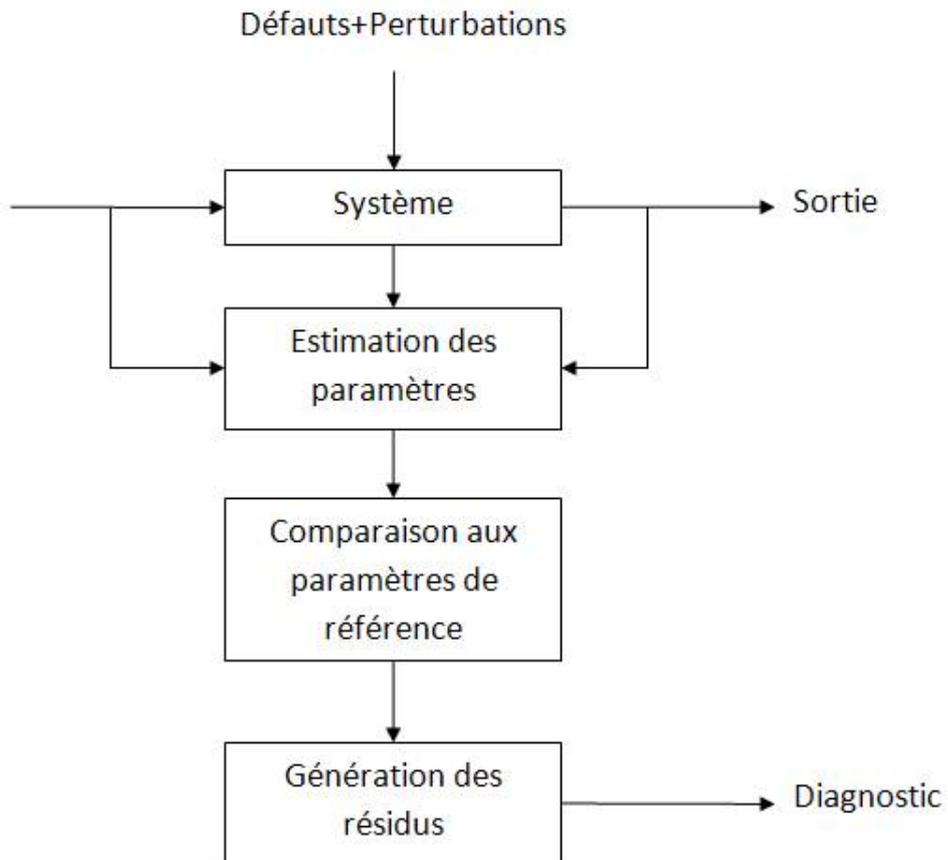


Figure 7 – Schéma bloc de l'Estimation paramétrique.

- Estimation d'état

Les méthodes d'estimation d'état ont pour principe de reconstruire les états et les sorties du système à partir des entrées et des sorties. On va citer par la suite trois méthodes différentes de l'estimation d'état qui sont : espace de parité, filtres d'état et observateurs d'état.

1. Espace de parité : Les équations du modèle sont projetées dans un espace particulier appelé espace de parité, permettant ainsi d'éliminer les inconnues à l'aide de redondances. Les équations projetées ne font intervenir que des variables mesurables (les entrées et les sorties du système) sur une fenêtre d'estimation. L'idée est de tester la cohérence des mesures par rapport à leurs estimées données par le modèle.

2. Filtres d'état: Les filtres d'états utilisent une formulation qui repose sur l'estimation d'état, mais uniquement pour des modèles stochastiques. Les filtres sensibles aux défauts peuvent être considérés comme des observateurs particuliers, dont les gains sont fixés de manière à ce que le vecteur des résidus prenne une direction particulière pour chaque situation de défaut [4].

3. Observateurs d'état : La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état consiste à reconstruire l'état ou, plus généralement, la sortie du processus à l'aide d'observateurs et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. Cette méthode s'est beaucoup développée car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles.

- **Les méthodes à base d'observateurs**

Le modèle hybride du système cardiovasculaire décrit dans le chapitre 2 dépend des paramètres cardiovasculaires qui ont un sens physiologique. Les variations dans ces paramètres de leur valeur nominale peuvent être reliées aux pathologies cardiovasculaires. Dans notre travail, nous avons considéré les maladies les plus répandues qui sont les valvulopathies, les troubles dans le rythme cardiaque, le durcissement des artères chez les personnes âgées et l'hypertension artérielle. Pour les valvulopathies peuvent être représentées par un blocage au niveau des valvules mitrale et aortique en ouverture ou en fermeture total ou partiel. Les troubles dans le rythme cardiaque, quant à eux, ils sont associés à une baisse ou à une augmentation de la fréquence cardiaque. Le durcissement des artères est lié à la

variation de la résistance systémique R_s . L'hypertension artérielle, comme son nom l'indique, peut être liée à la déviation de la valeur nominale de la compli-ance aortique C_a . L'information de la présence de ce type de maladies n'est pas toujours chose évidente. C'est pour cela, détecter les variations dans les paramètres facilitera le diagnostic de ces pathologies.

Dans ce mémoire, nous allons appliquer deux méthodes à base d'observateurs pour le diagnostic d'anomalies valvulaires. La première méthode, méthode des résidus, se base sur l'erreur d'observation qui va détecter et isoler les défauts, quant à la deuxième, c'est une méthode qui part du principe d'estimer les valeurs des défauts existants.

- Méthode des résidus :

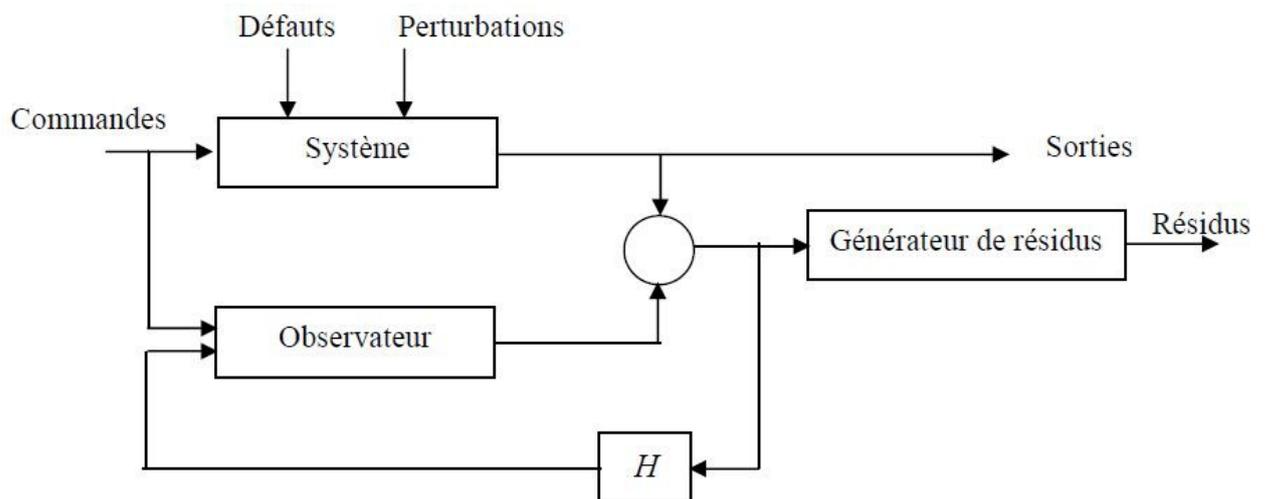


Figure 8 – Schéma de principe du diagnostic des défauts à base d'observateurs.

Elle consiste à générer des résidus à l'aide d'une estimation d'état en utilisant l'erreur d'estimation ou l'état estimé (voir figure 8). Dans notre cas, nous prenons l'erreur d'observation comme résidu. Donc, le générateur de résidu est « l'identité ». Nous utiliserons cette méthode pour la détection d'anomalies valvulaires du système cardiovasculaire vu que notre observateur à mode glissant n'est pas robuste par rapport aux défauts valvulaires [5].

- Méthode d'estimation des défauts :

Nous utiliserons cette méthode pour la détection des défauts paramétrique puisque notre observateur mode glissant est robuste face aux variations paramétriques. Nous effectuerons aussi l'estimation de ces défauts en utilisant le filtre de Kalman étendu [6].

4. Les pathologies cardiovasculaires :

Nous allons décrire très sommairement certaines pathologies cardiaques qui influent sur les états physiologiques de notre système, susceptibles d'être diagnostiquées par la méthode de diagnostic que nous proposons dans notre travail, ainsi que les méthodes médicales de détection existantes [9].

a. Valvulopathies

- **Rétrécissement aortique** : c'est la valvulopathie la plus fréquente. Il s'agit d'une diminution de la surface aortique ce qui constitue un obstacle à l'éjection du ventricule gauche entraînant une diminution de la compliance avec augmentation des pressions de remplissage.

Diagnostic paraclinique

- Electrocardiogramme: il faut rechercher des troubles du rythme ventriculaire (surtout sur l'enregistrement sur un enregistrement ECG).
- Radiographie du thorax : le volume du cœur peut avoir augmenté un peu, la silhouette cardiaque est modifiée avec dilatation de l'aorte initiale et hyper concavité de l'arc moyen gauche. Possibilité de calcifications de la valve aortique.
- Echographie doppler : c'est un examen médical échographique en deux dimensions non invasif qui permet d'explorer les flux sanguins intracardiaques et intravasculaires. Elle est basée sur un phénomène physique des ultrasons, l'effet Doppler. Il met en évidence :
 - Une accélération du flux systolique éjectionnel.
 - Permet de calculer la surface aortique (une surface aortique inférieure à 1 cm^2 traduit un rétrécissement aortique serré).
 - Permet de calculer de gradient moyen (un gradient moyen supérieur à 40 mmHg traduit un rétrécissement aortique serré)
- **Insuffisance mitrale (IM)**: deuxième valvulopathie par ordre de fréquence après le rétrécissement aortique. Il s'agit d'une dysfonction de la valve mitrale consistant à un défaut de coaptation des deux feuillets de cette dernière, entraînant un reflux de sang du ventricule gauche dans l'atrium gauche pendant la phase d'expulsion du sang (systole), au lieu d'aller dans l'aorte.

Diagnostic paraclinique :

- Electrocardiogramme :
 - Signes d'hypertrophie (développement trop important) auriculaire gauche.
 - Déviation axiale gauche.
- Radiographie thoracique :
 - Dilatation de l'oreillette gauche avec aspect en double contour de l'arc inférieur droit et convexité de l'arc moyen gauche.
 - Dilatation du ventricule gauche.
 - Calcification mitrale (expansion systolique de l'oreillette gauche)
- Doppler cardiaque :
 - Permet le diagnostic positif d'insuffisance mitrale en retrouvant un jet de régurgitation dans l'oreillette gauche voire dans les veines pulmonaire.
 - Permet également de déterminer l'orientation de la fuite.
 - Permet de donner une évaluation semi-quantitative de l'importance de la fuite (IM minimale : volume régurgitant < 30 ml ; IM modérée : volume régurgitant 30-60 ml ; IM sévère : volume régurgitant > 60 ml).
- **Insuffisance aortique (IA) :** est une maladie valvulaire cardiaque correspondant à un défaut d'étanchéité des valves aortiques du cœur qui provoque un flux sanguin rétrograde au cours de la diastole, de l'aorte vers le ventricule gauche.

Diagnostic paraclinique :

- Electrocardiogramme : Permet de faire une estimation semi quantitative de son importance, d'en rechercher la cause et d'en évaluer le retentissement sur le ventricule gauche.
- Radiographie thoracique :
 - Dilatation du ventricule gauche.
 - Dilatation de l'aorte ascendante.
- Doppler cardiaque :
 - Le flux de l'insuffisance aortique est directement visualisé par doppler soit en mode continu soit en mode couleur.

b. Troubles du rythme cardiaque

- **Fibrillation auriculaire (FA) :** trouble le plus fréquent du rythme cardiaque. Elle fait partie des troubles du rythme supra-ventriculaires. Elle correspond à une action

non coordonnée des cellules myocardiques auriculaires, ce qui va entraîner une contraction rapide et irrégulière des oreillettes cardiaques.

Diagnostic paraclinique :

- Electrocardiogramme :
 - Diagnostic facile sous la forme habituelle : la FA est quasiment la seule cause de tachycardie irrégulière (un rythme cardiaque plus rapide que la normale).
 - Amplitude de l'activité auriculaire variable.
 - Rythme de l'activité ventriculaire irrégulier.
 - Rythme de l'activité ventriculaire rapide (120-180/min).
- Radiographie pulmonaire de face : Anomalie du parenchyme pulmonaire (la partie intime du poumon composée des bronchioles respiratoires, des conduits alvéolaires et des alvéoles).
- Echo doppler cardiaque transthoracique (ETT) : permet d'apprécier
 - Les dimensions des cavités cardiaques : taille de l'oreillette droite, oreillette gauche et le ventricule gauche
 - Les dimensions des valves
 - La fonction contractile et segmentaire et globale du ventricule gauche
 - La fonction diastolique du ventricule gauche
 - Les pressions artérielles pulmonaires
 - L'existence d'un épanchement péricardique (accumulation de gaz dans le péricarde qui est un sac à double paroi qui contient le cœur et les racines des gros vaisseaux sanguins).
- Echo doppler cardiaque transoesophagien (ETO) :
 - Permet de s'assurer de l'absence de thrombus dans l'oreillette ou dans l'auricule gauche.
 - Embolie artérielle : découverte de thrombus intra-auriculaire certifie l'origine cardiaque de l'embolie.
- **Maladie de Bouveret** : correspond à des crises de tachycardie (accélération du rythme cardiaque), se manifestant par des palpitations à débuts et à fins brusques et dont le mécanisme est bien individualisé.

Diagnostic paraclinique

- Electrocardiogramme : permet de retrouver une tachycardie régulière à fréquence cardiaque rapide (en général aux alentours de 150 pulsations par minute). Les

complexes ventriculaires (QRS) sont fins (durée < 0,10 s). Ils peuvent être élargis (durée > 0,12 s) en cas de bloc de branche associé (qu'il soit organique ou fonctionnel).

c. Artériosclérose

Cette maladie désigne tout durcissement des artères. Les artères vieillissent, elles deviennent plus dures, plus épaisses, elles perdent de leur souplesse et de leur élasticité. Elles ne peuvent plus adapter leur calibre aux besoins de l'organisme et cela surtout au moment de l'effort car le besoin d'irrigation est plus important. L'artériosclérose est un processus normal, physiologique, dû au vieillissement et irréversible.

5. Détection d'anomalies cardiovasculaires par les méthodes à base d'observateur

a. Méthode des résidus

- **Génération des résidus**

Pour appliquer cette approche, nous allons utiliser l'observateur à mode glissant décrit dans le chapitre précédent. On suppose tout au long de cette étude qu'il y a un et un seul défaut qui se produit à la fois car la production de plusieurs défauts en même temps est rarement réalisable. Les figures suivantes représentent les erreurs d'estimation des états physiologiques du système cardiovasculaire avec introductions de défauts à l'instant $t = 4$ sec. Nous avons défini, dans le chapitre précédent, les erreurs d'observations des états physiologiques du système cardiovasculaire comme suit :

$$\begin{cases} e1 = x_1 - \hat{x}_1 \\ e2 = x_2 - \hat{x}_2 \\ e3 = x_3 - \hat{x}_3 \\ e4 = x_4 - \hat{x}_1 \\ e5 = x_5 - \hat{x}_5 \end{cases} \quad (7)$$

Nous commencerons par les valvulopathies (anomalies valvulaires blocage de u_1 ou u_2), puis les troubles du rythme cardiaque (cas d'une fréquence cardiaque supérieure à sa valeur normale 80 battements/minute).

D'après les figures (de 9 jusqu'à 28) et la table de signature (1), il est clair que la présence d'un défaut au niveau des valvules mitrale et aortique, provoque un changement dans la dynamique de certaines erreurs d'observation des états physiologiques du système

cardiovasculaire. Par exemple, dans le blocage de u_1 à 0 ou à 1 et dans le blocage à 0 de u_2 , les erreurs e_3 , e_4 et e_5 , représentées par les figures ([11, 12, 13], [16, 17, 18] et [21, 22, 23]) respectivement, sont relativement insensibles à ce défaut. De même, l'erreur e_1 est relativement insensible aux défauts de blocage en fermeture de u_1 et en ouverture de u_2 (voir figures 9 et 19). Quant à l'erreur e_2 , elle varie aussi bien dans le cas d'un blocage de u_1 : elle augmente puis diminue et de u_2 : elle augmente (voir figures [10, 15] et [20, 25]). Pour u_2 , le blocage en fermeture de celle-ci provoque un changement dans la dynamique de e_1 , elle augmente puis diminue (voir figure 14). Le blocage en ouverture de u_2 engendre la dynamique suivante : e_4 ne varie pas beaucoup, e_5 diminue puis augmente (voir figures 22 et 23) et e_3 est relativement insensible (voir figure 21).

Les résultats obtenus peuvent être résumés dans le tableau suivant, tableau de signature (1) :

Valvule Bloquée	Évolution de e_1	Évolution de e_2	Évolution de e_3	Évolution de e_4	Évolution de e_5
$U_1=0$	Ne varie pas beaucoup	Augmente Puis diminue	Ne varie pas beaucoup	Ne varie pas beaucoup	Ne varie pas beaucoup
$U_1=1$	Diminue puis augmente	Augmente puis diminue	Ne varie pas beaucoup	Ne varie pas beaucoup	Ne varie pas beaucoup
$U_2=0$	Augmente puis diminue	Augmente	Ne varie pas beaucoup	Ne varie pas beaucoup	Ne varie pas beaucoup
$U_2=1$	Ne varie pas beaucoup	Augmente	Ne varie pas beaucoup	Ne varie pas beaucoup	Diminue puis augmente

Tableau 1 - Table de Signature en présence d'anomalies valvulaires.

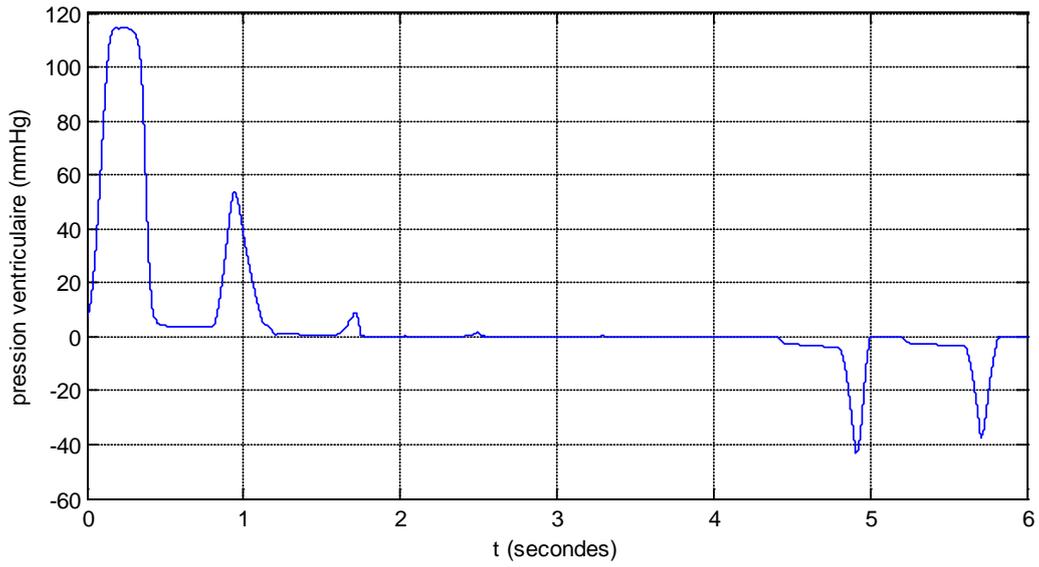


Figure 9 - L'erreur d'observation de la pression ventriculaire (e_1) avec $u_1=0$.

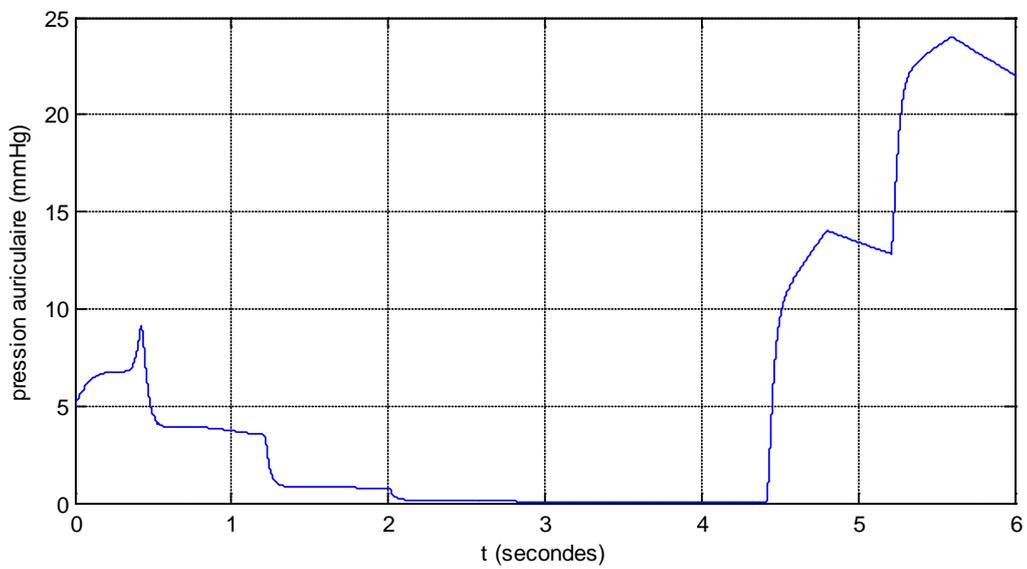


Figure 10 - L'erreur d'observation de la pression auriculaire (e_2) avec $u_1=0$.

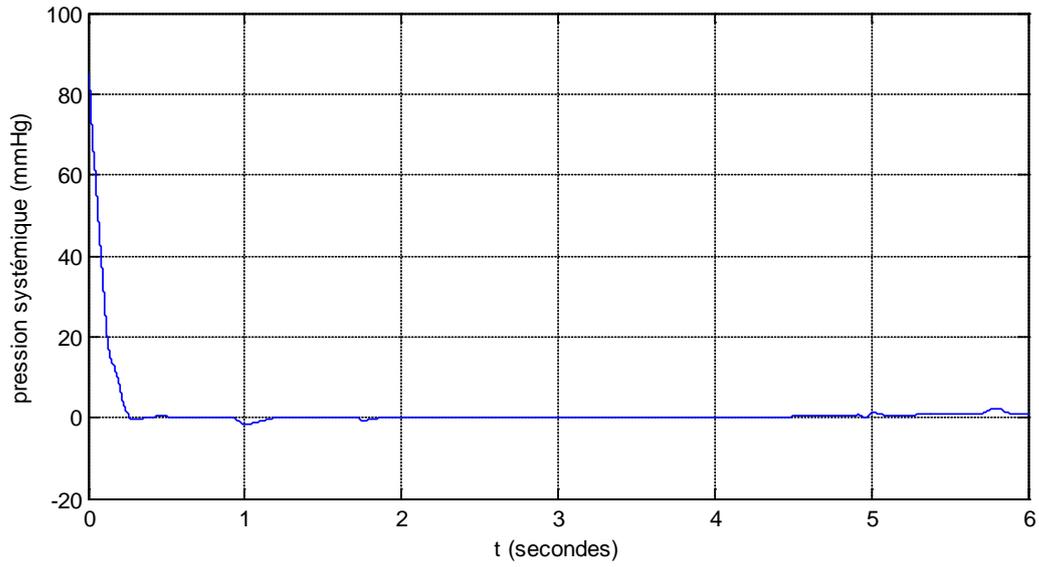


Figure 11 - L'erreur d'observation de la pression systémique (e3) avec $u_1=0$

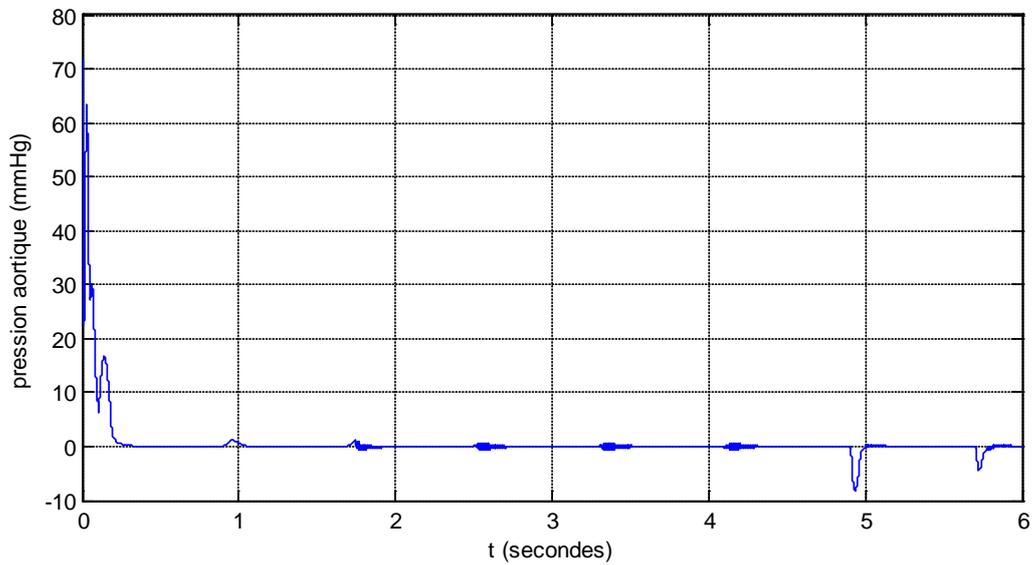


Figure 12 - L'erreur d'observation de la pression aortique (e4) avec $u_1=0$

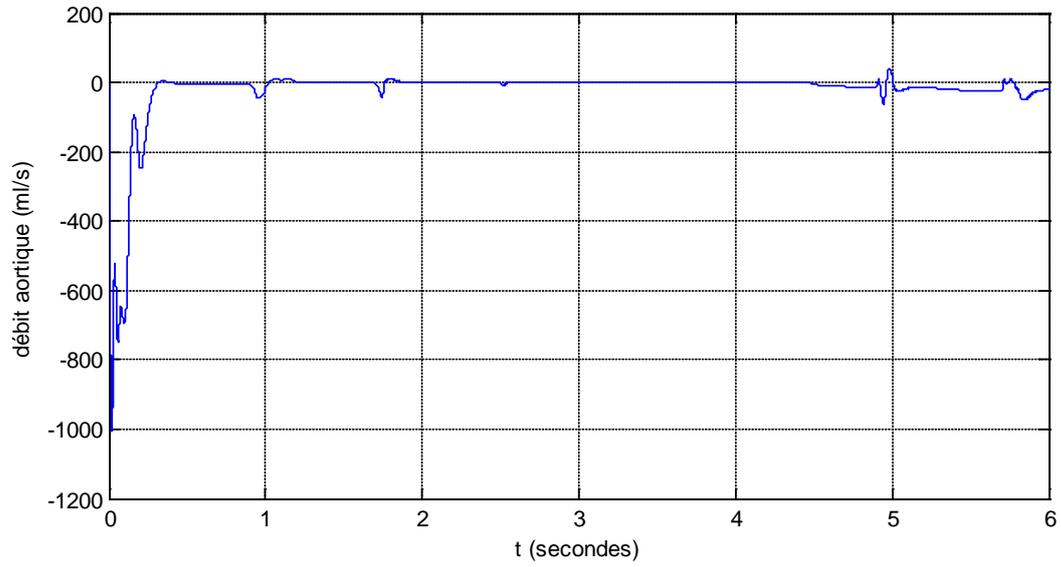


Figure 13 - L'erreur d'observation du débit aortique (e_5) avec $u_1=0$.

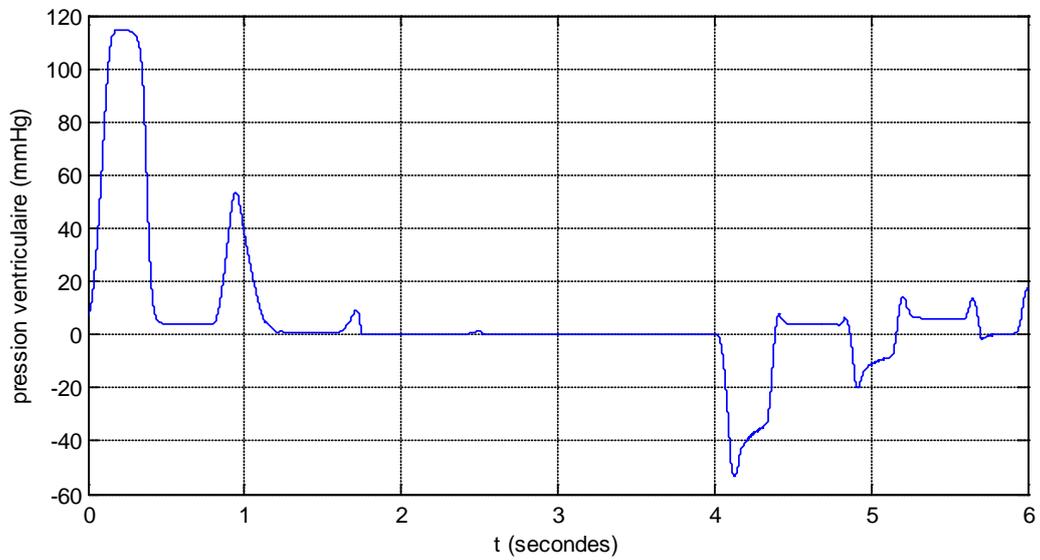


Figure 14 - L'erreur d'observation de la pression ventriculaire (e_1) avec $u_1=1$.

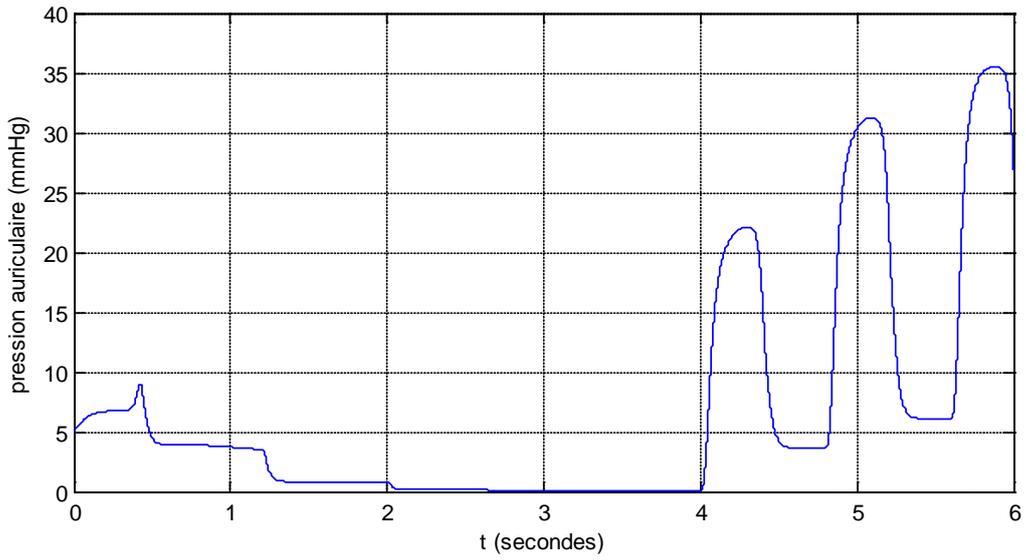


Figure 15 - L'erreur d'observation de la pression auriculaire (e2) avec $u_1=1$

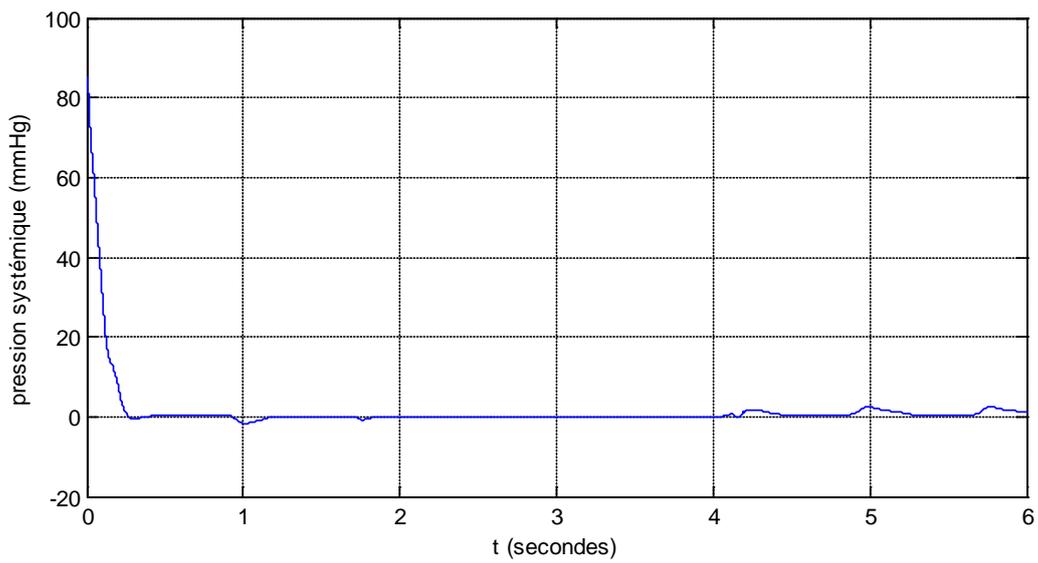


Figure 16 - L'erreur d'observation de la pression systématique (e3) avec $u_1=1$

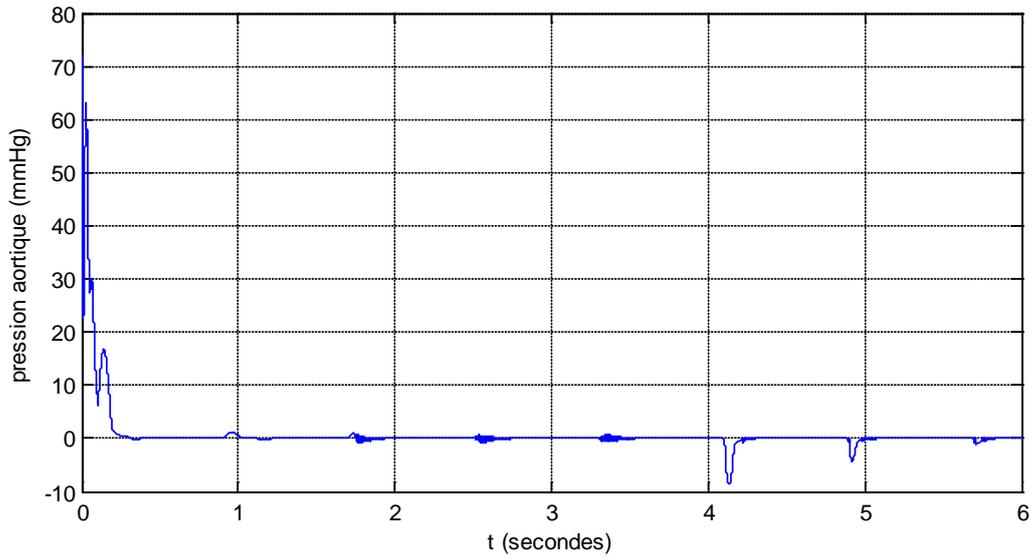


Figure 17 - L'erreur d'observation de la pression aortique (e4) avec $u_1=1$

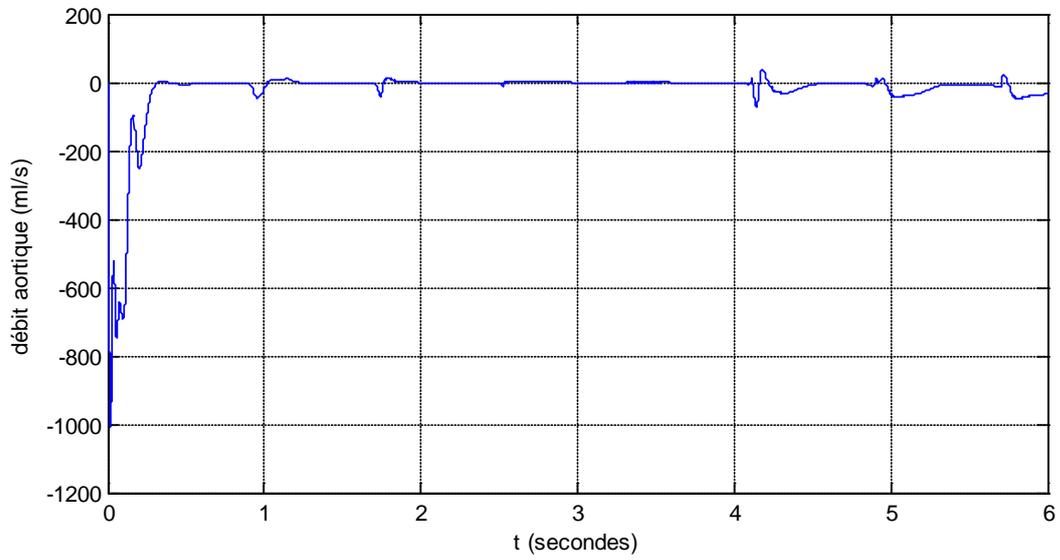


Figure 18 - L'erreur d'observation du débit aortique (e5) avec $u_1=1$

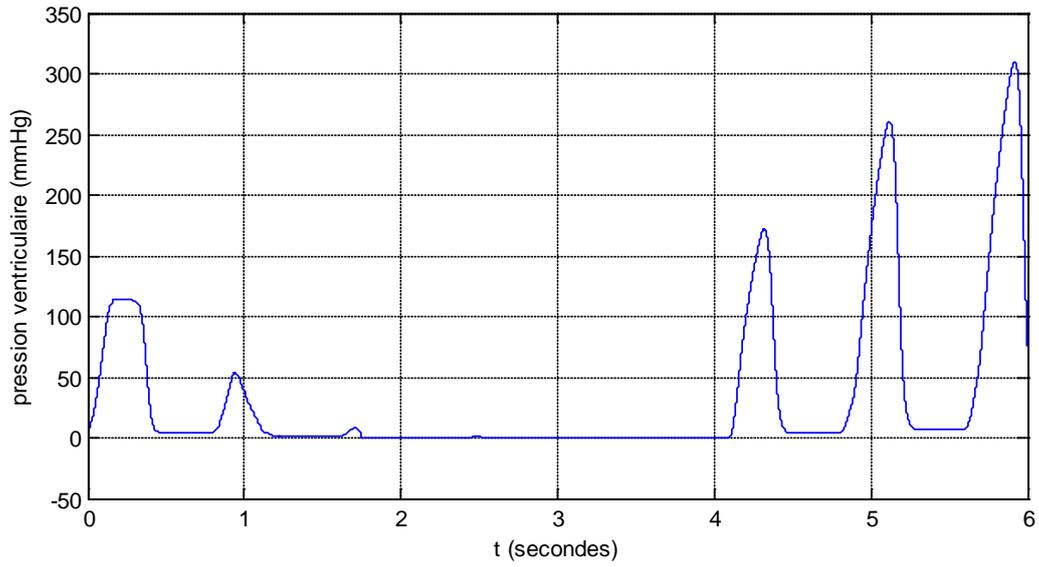


Figure 19 - L'erreur d'observation de la pression ventriculaire (e_1) avec $u_2=0$

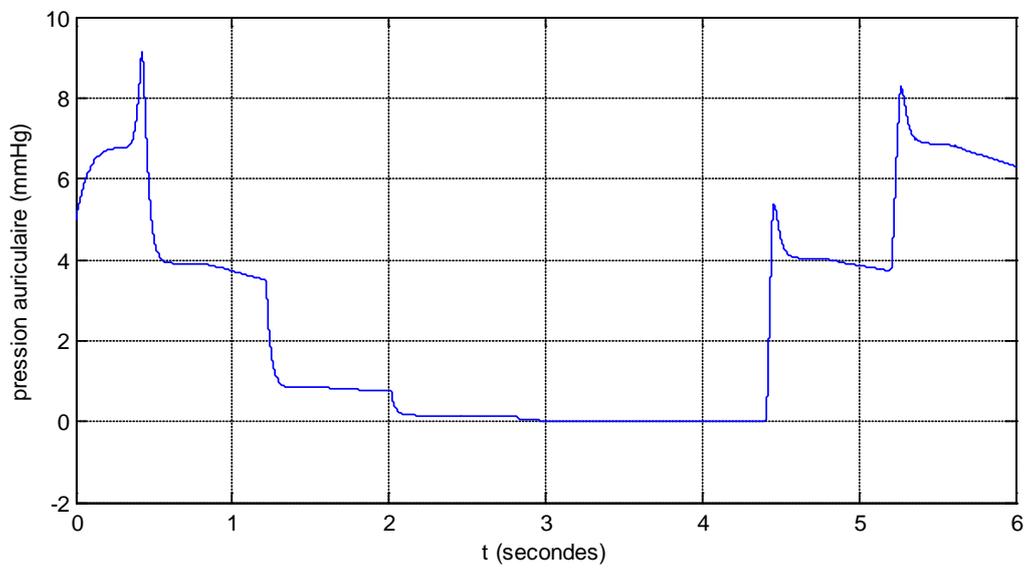


Figure 20 - L'erreur d'observation de la pression auriculaire (e_2) avec $u_2=0$

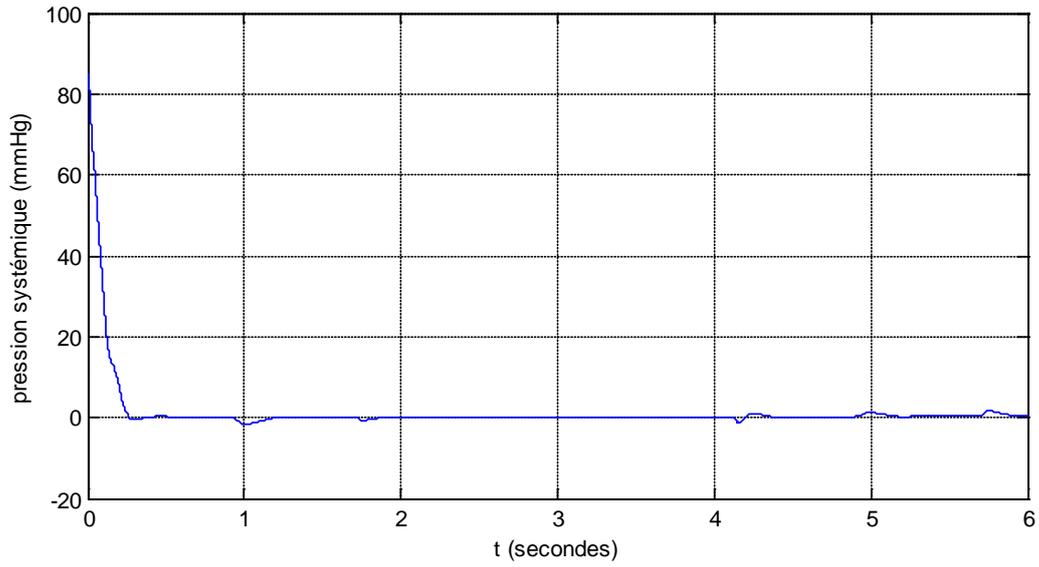


Figure 21 - L'erreur d'observation de la pression systémique (e_3) avec $u_2=0$

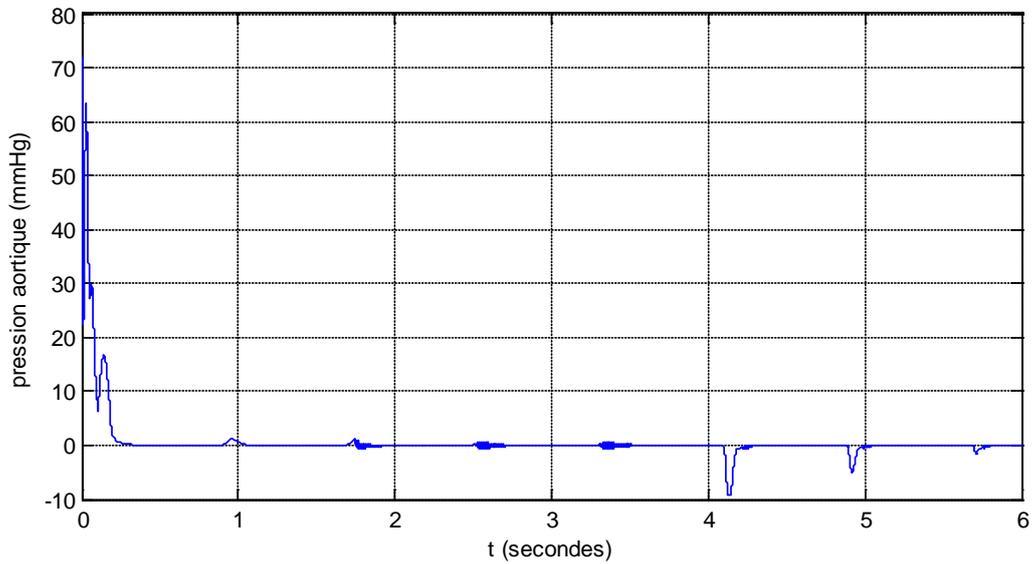


Figure 22 - L'erreur d'observation de la pression aortique (e_4) avec $u_2=0$

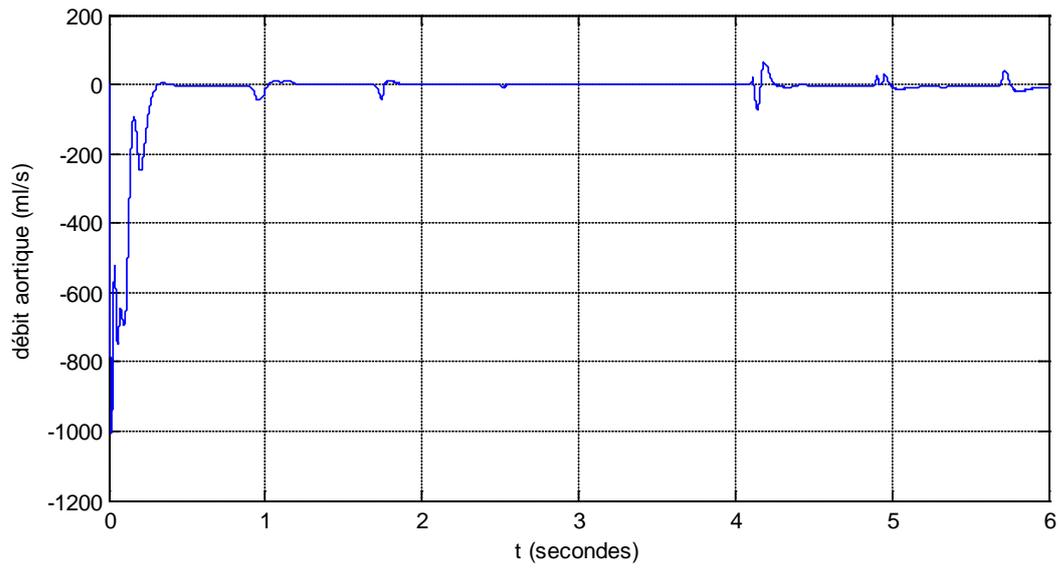


Figure 23 - L'erreur d'observation du débit aortique (e_5) avec $u_2=0$

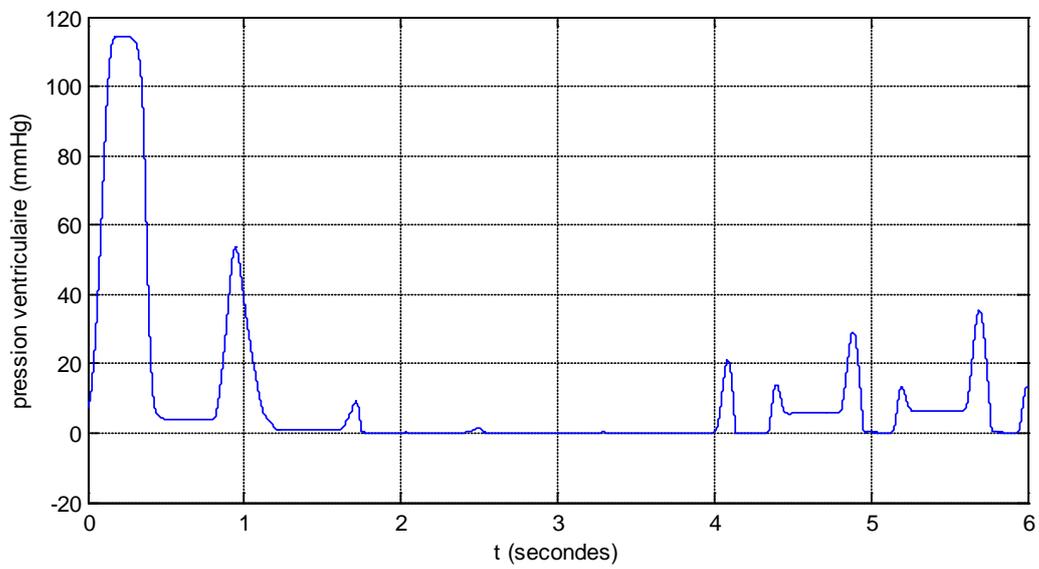


Figure 24 - L'erreur d'observation de la pression ventriculaire (e_1) avec $u_2=1$

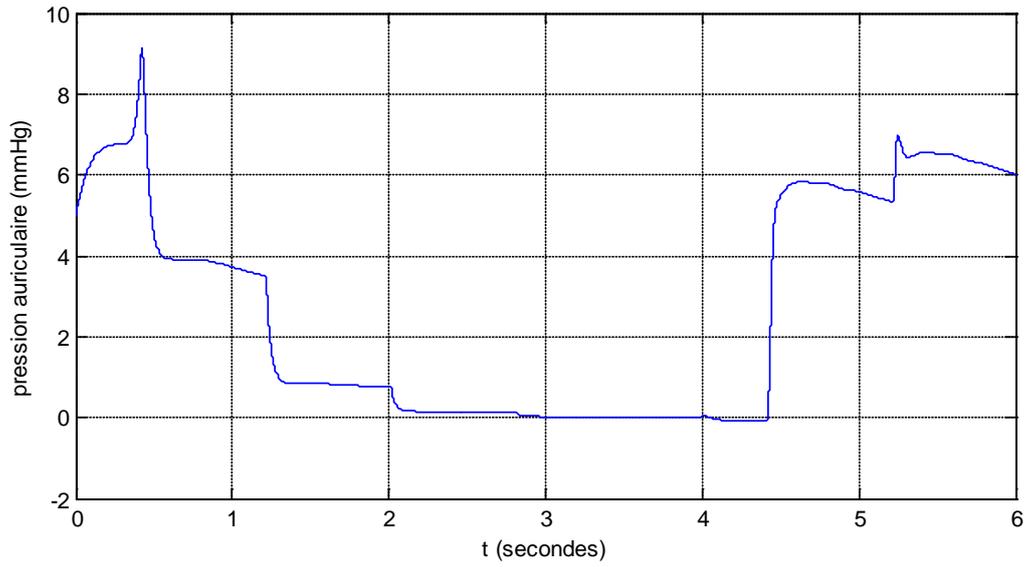


Figure 25 - L'erreur d'observation de la pression auriculaire (e2) avec $u_2=1$

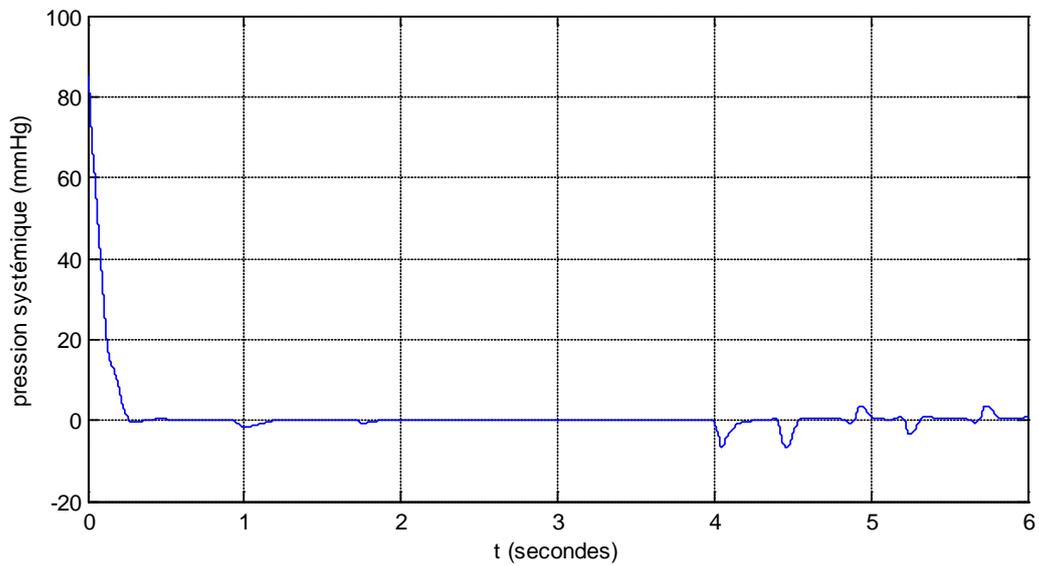


Figure 26 - L'erreur d'observation de la pression systématique (e3) avec $u_2=1$

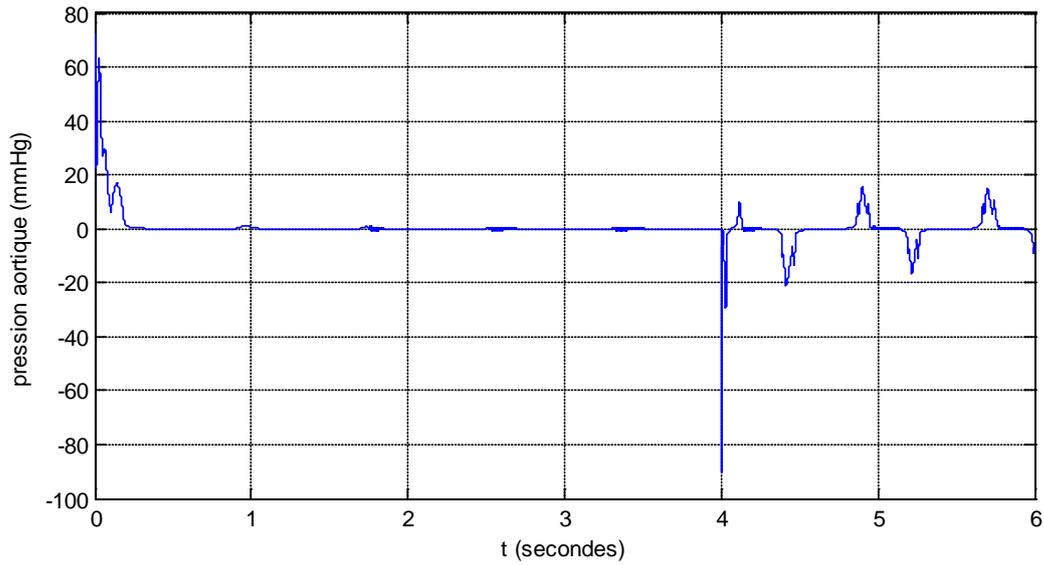


Figure 27 - L'erreur d'observation de la pression aortique (e4) avec $u_2=1$

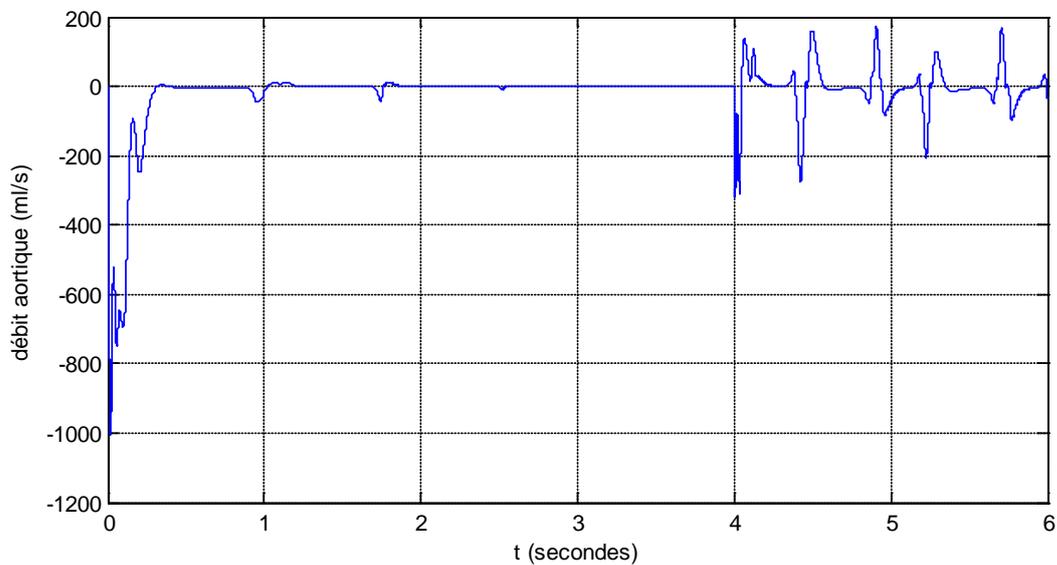


Figure 28 - L'erreur d'observation du débit aortique (e5) avec $u_2=1$

Nous définissons trois résidus r_1 , r_2 , r_3 et r_4 associés à $u_1=0$, $u_1=1$, $u_2=0$, $u_2=1$ respectivement. Ces résidus sont générés en faisant un test de seuil des erreurs d'estimation. Nous remarquons, d'après le tableau (1), que pour détecter le défaut de blocage de u_1 en fermeture, on désigne e2 comme résidu r_1 et en ouverture e1 comme résidu r_2 . Pour détecter le défaut de blocage en fermeture de u_2 , nous nous baserons sur l'erreur d'estimation e1 qui définit aussi le résidu r_3 . Il faut utiliser l'erreur d'estimation e5, qui sera égale à r_4 , pour détecter le défaut de

blocage en ouverture de u_2 . Nous avons imposé un seuil pour e_1 , e_2 et e_5 , dans le choix des résidus, vu que ne n'avons pas accès aux mesures réelles obtenues par des médecins.

D'où :

$$r_1 = e_2 \quad r_2 = e_1 \quad r_3 = e_5$$

Nous avons appliqué la méthode des résidus pour détecter l'anomalie sur la valeur de la fréquence cardiaque. Les figures (29 à 33) montrent que les erreurs d'observations sont insensibles à la variation de la fréquence cardiaque. Elles subissent un changement transitoire, au moment de l'introduction du défaut ($t=4s$), puis tendent vers zéro.

- **Gestion des résidus**

Nous allons gérer, dans cette section, les résidus à travers le tableau suivant :

Erreur d'observation	Evolution de l'erreur d'observation	Résidu 1	Résidu 2	Résidu 3
e_1	Diminue puis augmente	0	-1	0
e_1	Augmente puis diminue	0	1	0
e_2	Augmente	1	0	0
e_5	Diminue puis augmente	0	0	-1

Tableau 2 – Allocation des résidus

Nous obtenons les résultats de simulation suivants :

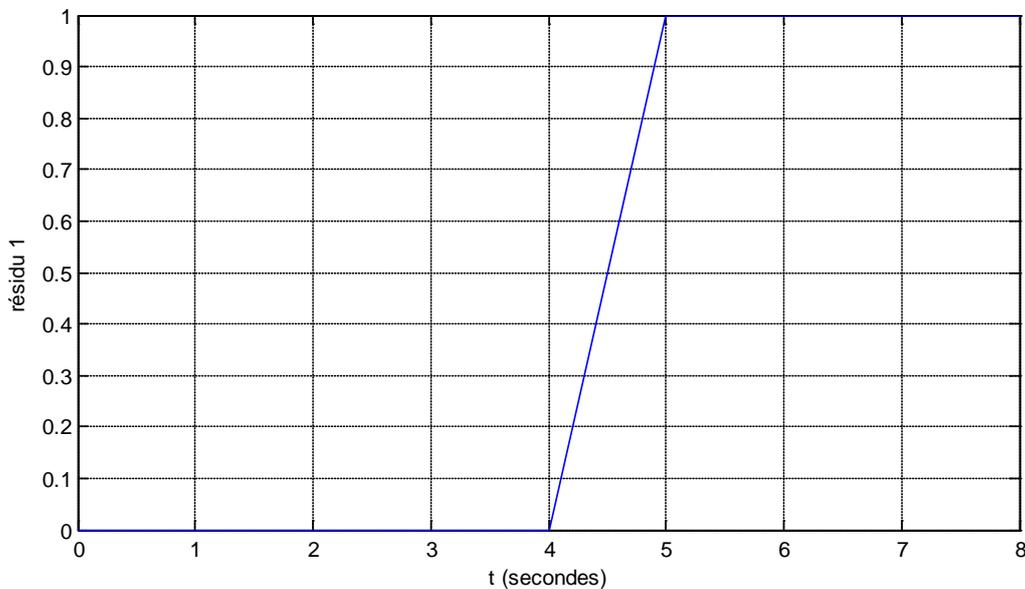


Figure 29 – Résidu 1

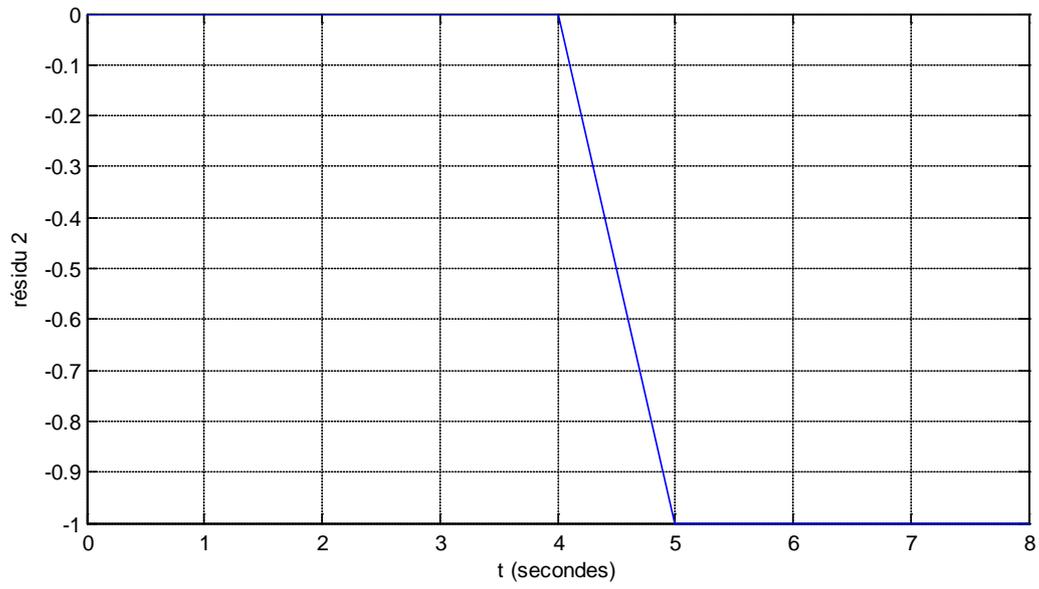


Figure 30 – Résidu 2

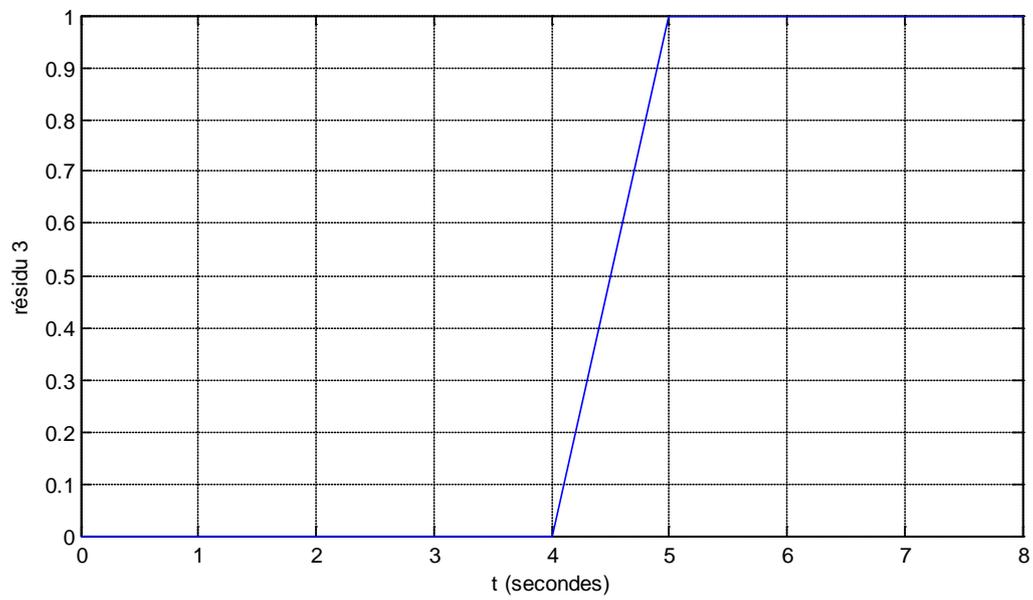


Figure 31 – Résidu 3

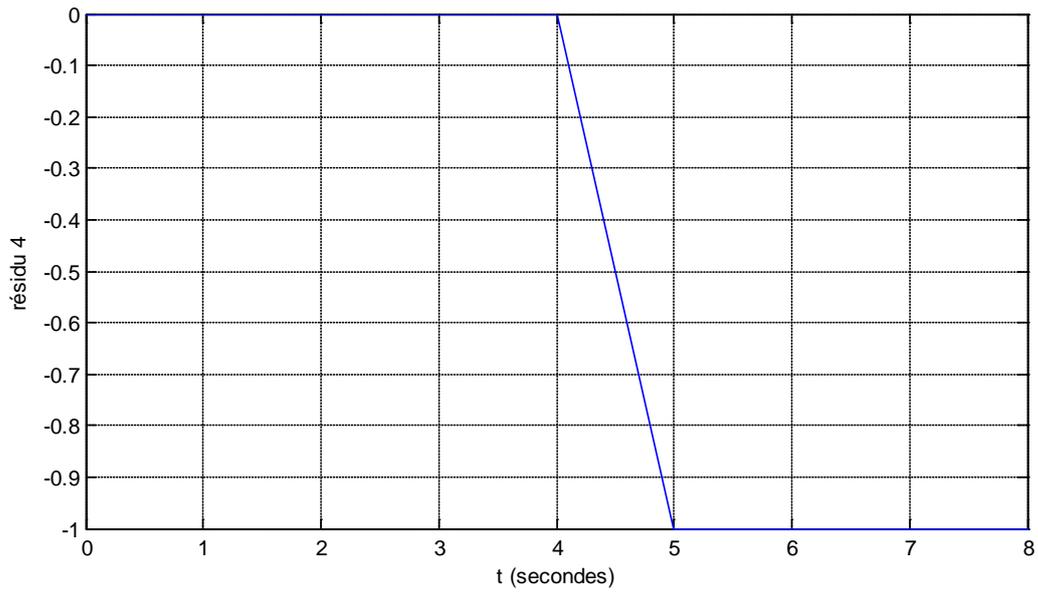


Figure 32 – Résidu 4

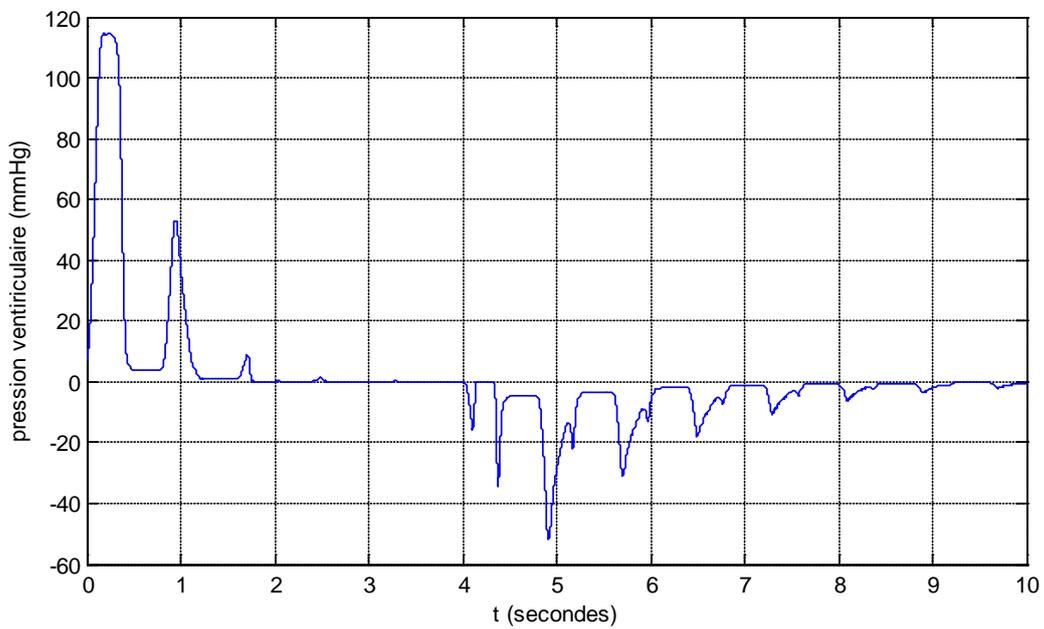


Figure 33 - Erreur d'observation de la pression ventriculaire (e1) avec Fréquence cardiaque égale à 90 battements/min

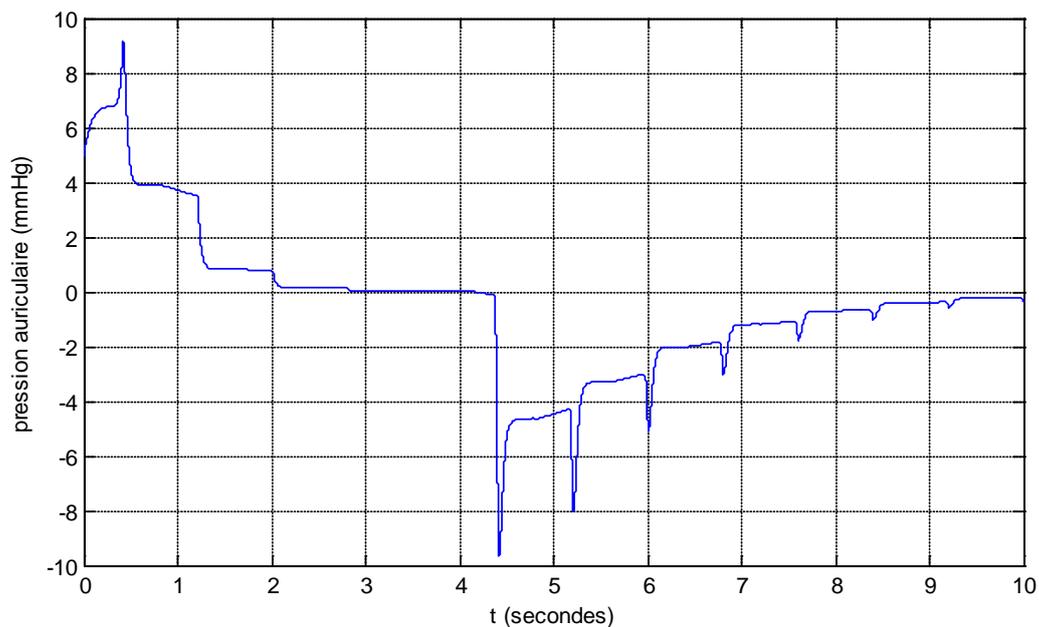


Figure 34 - Erreur d'observation de la pression auriculaire (e2) avec Fréquence cardiaque égale à 90 battements/min

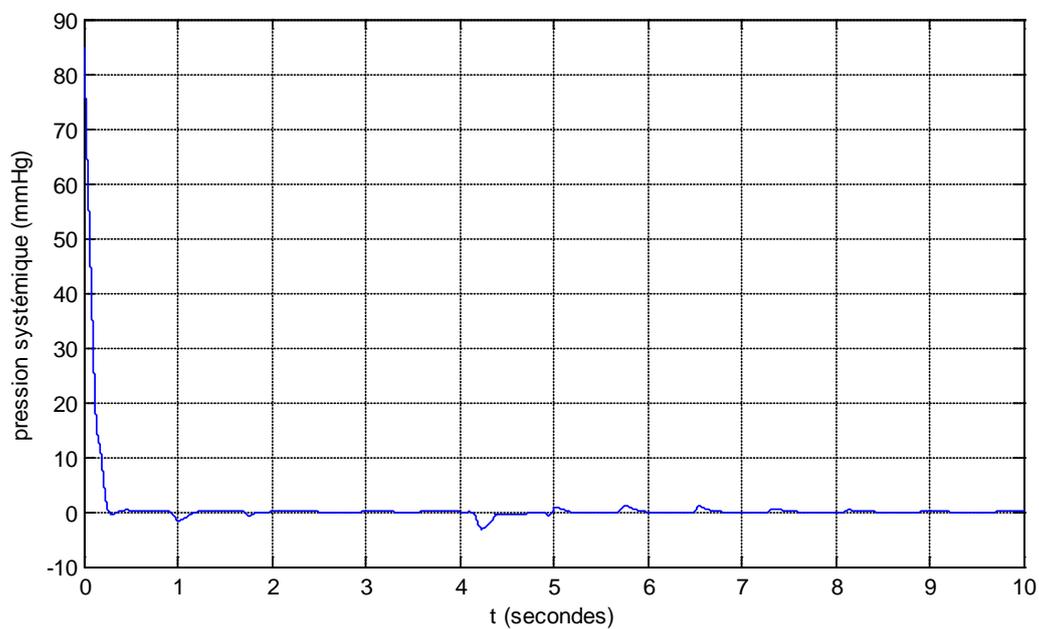


Figure 35 - Erreur d'observation de la pression systémique (e3) avec Fréquence cardiaque égale à 90 battements/min

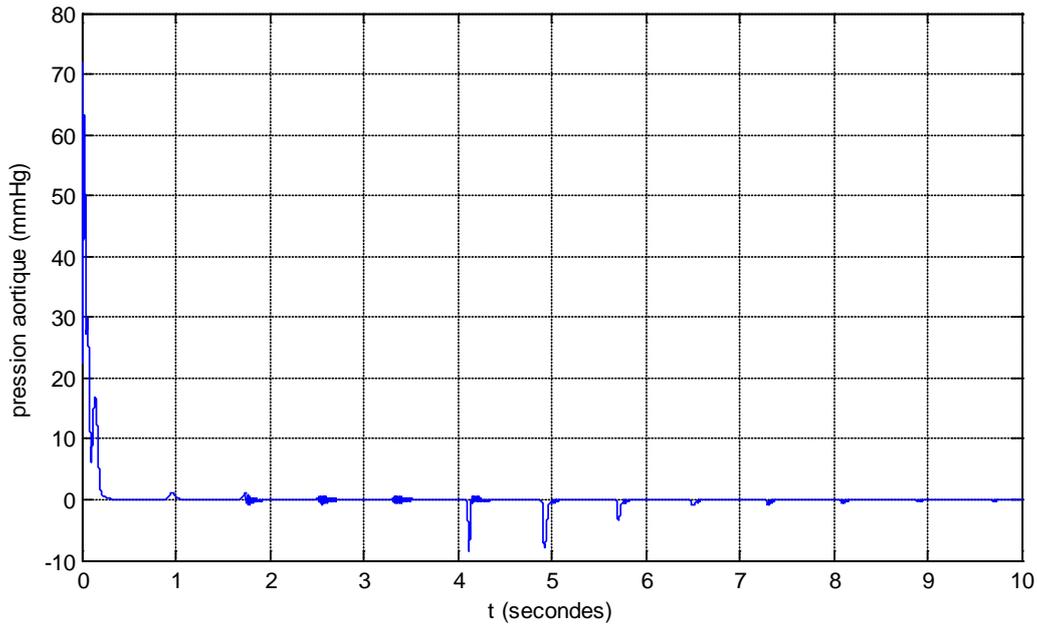


Figure 36 - Erreur d'observation de la pression aortique (e4) avec Fréquence cardiaque égale à 90 battements/min

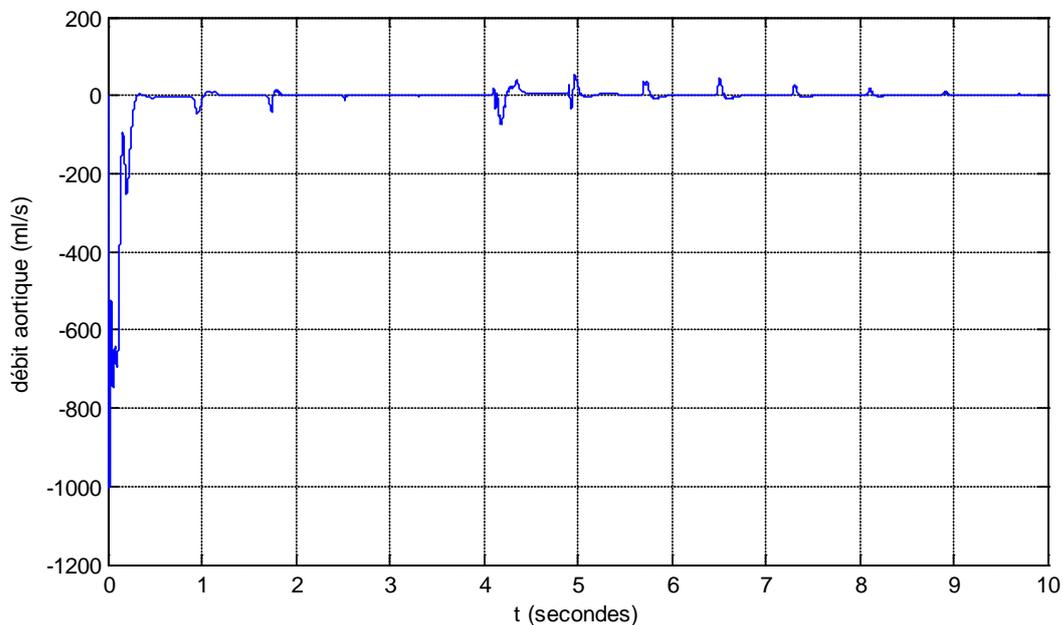


Figure 37 - Erreur d'observation du débit aortique (e5) avec Fréquence cardiaque égale à 90 battements/min.

b. Méthode d'estimation des défauts des paramètres

Lors d'un changement brusque ou lent dans les valeurs nominales des paramètres, le système de détection et d'isolation des défauts est supposé capable de le détecter. En estimant la variation de la valeur nominale, il est possible d'associer ce changement à un défaut donné. Dans cette section, en utilisant le modèle hybride du système cardiovasculaire donné dans le

chapitre 2, nous allons synthétiser un observateur hybride [7] pour estimer les états physiologiques ainsi que les variations des paramètres cardiovasculaires de leur valeur nominale. Cette estimation des paramètres sert à la détection des anomalies paramétriques.

Soit le modèle hybride du système cardiovasculaire décrit dans le chapitre modélisation du SCV (voir mémoire de fin d'études) :

$$\dot{x}(t) = A_i(t).x(t) \quad (7)$$

Soit le vecteur f , le vecteur des paramètres représentant le changement de leur valeur nominale :

$$f = [\Delta R_s \quad \Delta C_a] \quad (8)$$

Nous nous sommes intéressés aux variations R_s et C_a parce qu'elles représentent les pathologies cardiaques vues précédemment. De ce fait, l'équation (7) peut s'écrire d'une manière générale :

$$\dot{x}(t) = f_i(x(t), f, t) \quad (9)$$

Pour une petite variation du vecteur, nous pouvons faire le développement de Taylor du premier ordre :

$$\dot{x}(t) \approx f_i(x(t), f, t) + \left. \frac{df_i(x(t), p, t)}{df} \right|_{(f=f_n)} (f - f_n) \quad (10)$$

$$\dot{x}(t) = A_i(t).x(t) + E_i(t)f(t) \quad (11)$$

Où $A_i(t) = f_i(x(t), f, t)$ et $E_i(t) = \left. \frac{df_i(x(t), p, t)}{df} \right|_{(f=f_n)}$

La matrice $E_i(t)$ est la jacobienne de l'équation (8) par rapport au vecteur paramètres f . Elle relie l'effet des défauts (f) dans l'équation d'état (9) résultant du développement de Taylor. Cette matrice de transfert des défauts est donnée pour chaque phase :

Phase isovolumique :

$$E_1(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{x_2-x_3}{CrRs^2} & 0 \\ \frac{x_3-x_2}{CsRs^2} & 0 \\ 0 & \frac{x_5}{Ca^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Phase d'éjection :

$$E_2(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{x_2-x_3}{CrRs^2} & 0 \\ \frac{x_3-x_2}{CsRs^2} & 0 \\ 0 & \frac{x_5}{Ca^2} + \frac{x_1-x_4}{RaCa^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Phase de remplissage :

$$E_3(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{R_S x_2 - R_m x_3}{C_S R_S^2} & 0 \\ \frac{x_3-x_2}{C_r R_S^2} & 0 \\ 0 & \frac{x_5}{Ca^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Et la matrice $A_i(t)$ donnée dans le chapitre modélisation (voir mémoire de fin d'études), pour chaque phase, par:

Phase isovolumique :

$$A_1(t) = \begin{bmatrix} \frac{\dot{E}(t)}{E(t)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{RsCr} & \frac{1}{RsCr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{RsCs} & \frac{-1}{RsCs} & 0 & \frac{1}{Cs} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{Ca} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{Ls} & \frac{1}{Ls} & \frac{-Rc}{Ls} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Phase d'éjection :

$$A_2(t) = \begin{bmatrix} \frac{\dot{E}(t)}{E(t)} - \frac{E(t)}{Ra} & 0 & 0 & \frac{E(t)}{Ra} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{RsCr} & \frac{1}{RsCr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{RsCs} & \frac{-1}{RsCs} & 0 & \frac{1}{Cs} \\ \frac{1}{RaCa} & 0 & 0 & \frac{-1}{RaCa} & \frac{-1}{Ca} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{Ls} & \frac{1}{Ls} & \frac{-Rc}{Ls} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Phase de remplissage :

$$A_3(t) = \begin{bmatrix} \frac{\dot{E}(t)}{E(t)} - \frac{E(t)}{Rm} & \frac{E(t)}{Rm} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{RmCr} & \frac{-1}{RsCr} - \frac{1}{RmCr} & \frac{1}{RsCr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{RsCs} & \frac{-1}{RsCs} & 0 & \frac{1}{Cs} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{Ca} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{Ls} & \frac{1}{Ls} & \frac{-Rc}{Ls} \end{bmatrix} \quad (17)$$

La dynamique des paramètres cardiovasculaires, en général, se produit très lentement par rapport à la dynamique des variables d'états du système cardiovasculaire (pression et flux).

Pour cela, considérons le vecteur de dynamique

$$\frac{df}{dt} = \dot{f} = 0$$

Alors considérons le système donné par l'équation (10). L'estimation des états physiologiques et des défauts est prévue ; le vecteur d'état augmenté donné par l'équation (8), tel que:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{f}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i(t) & E_i(x, t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ f(t) \end{bmatrix} \\ y(t) = [C \quad 0] \end{cases} \quad (18)$$

- **Estimation par observateur mode glissant hybride**

Dans ce paragraphe, nous allons synthétiser un observateur mode glissant estimant les états physiologiques et les défauts ΔR_s et ΔC_a pour le système (voir figures de 34 à 40). Notons que les matrices $A_i(t)$ et $E_i(t)$ de la matrice augmentée change pour chaque phase. En se basant sur l'approche proposée par [1] (voir chapitre 2, PFE), nous avons pu calculer les gains L_1 et L_2 pour chaque phase. Nous avons obtenu les résultats de simulation ci-dessous montrés par les figures de (34) à . Nous remarquons un changement après introduction des défauts à l'instant $t=4s$. Les états estimés sont relativement fidèles aux états réels.

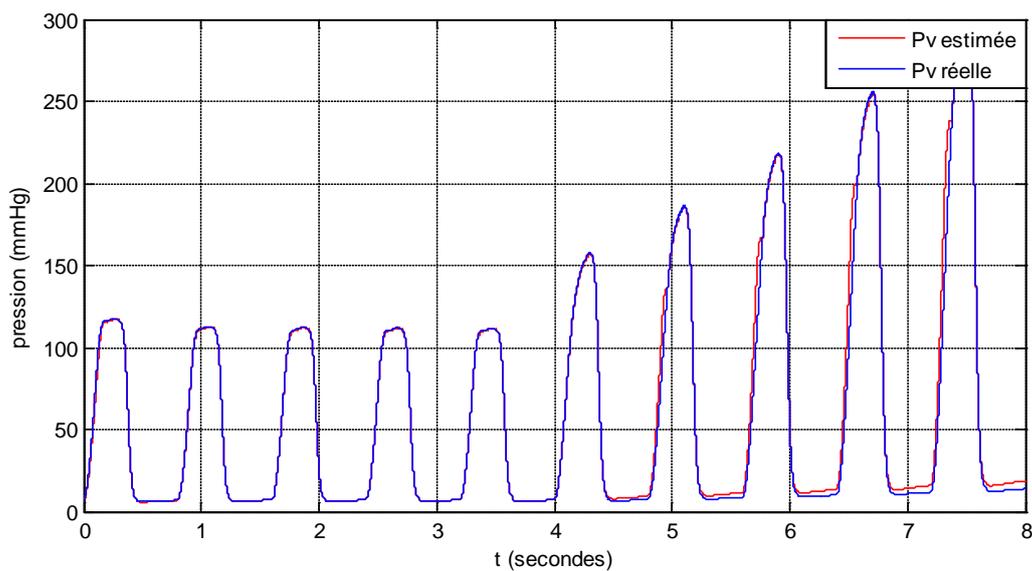


Figure 38 – Pression ventriculaire réelle et estimée.

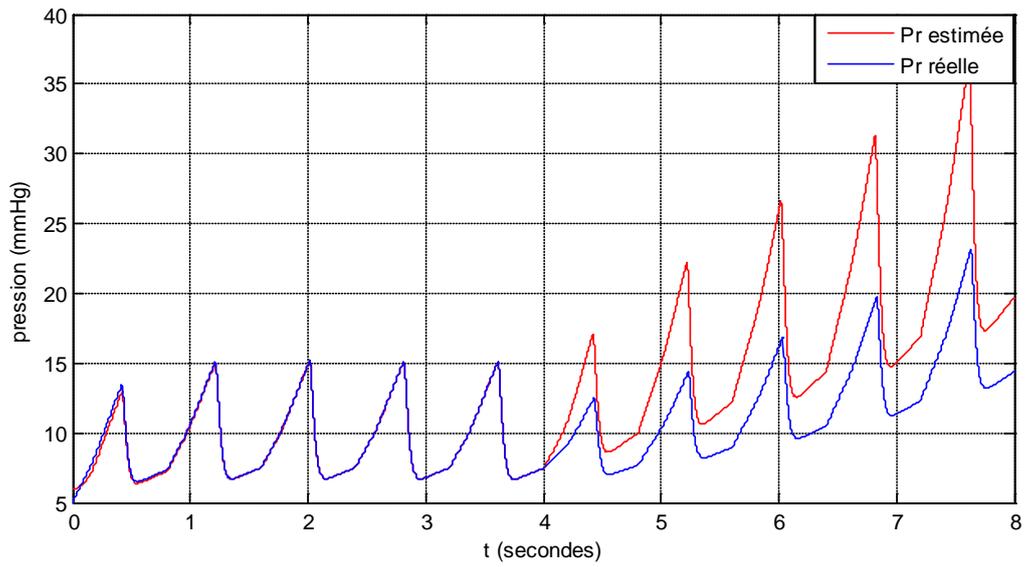


Figure 39 – Pression auriculaire réelle et estimée.

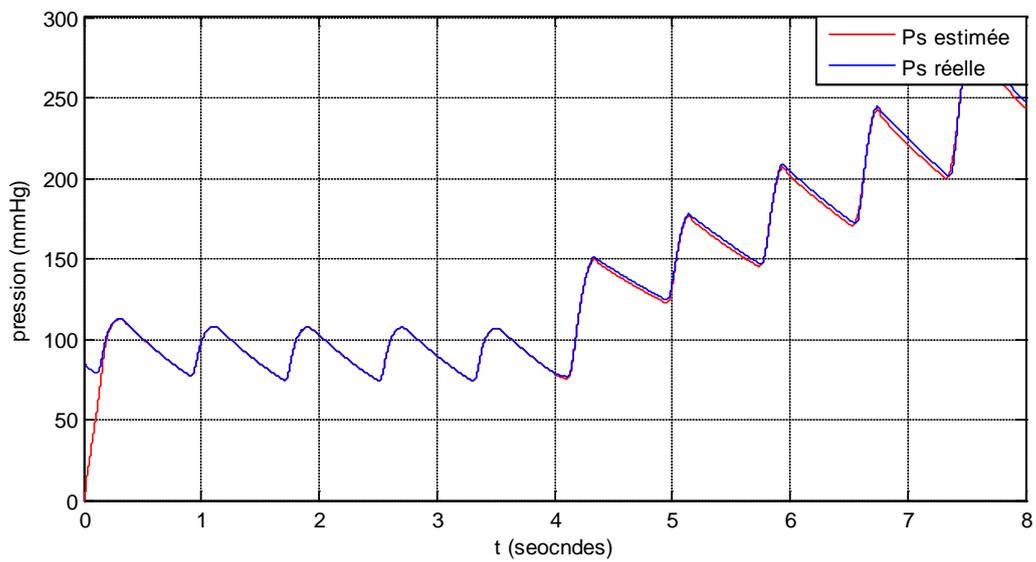


Figure 40 – Pression systémique réelle et estimée.

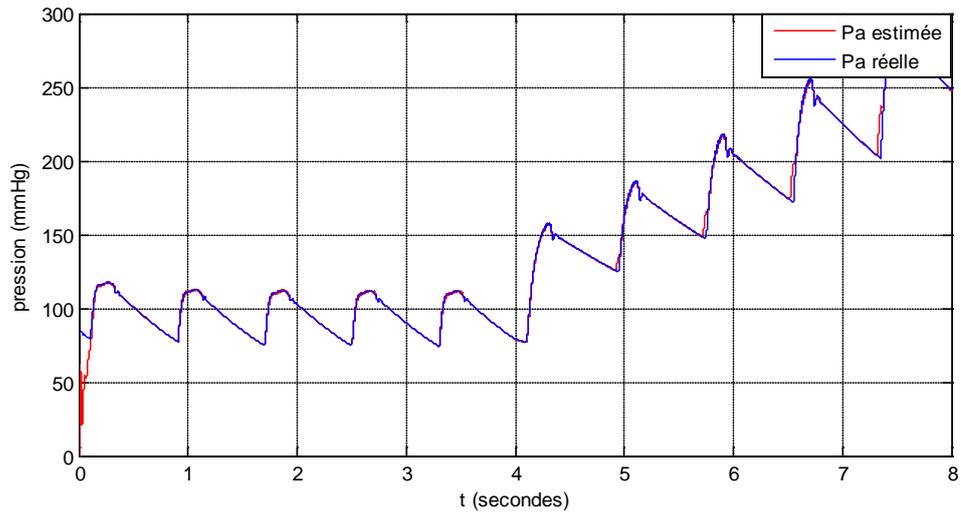


Figure 41 – Pression aortique réelle et estimée.

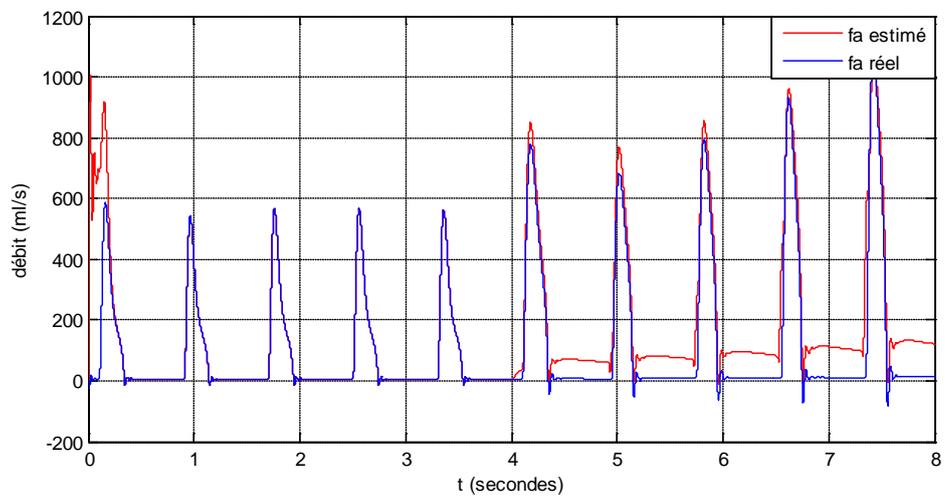


Figure 42 – Débit aortique réel et estimé.

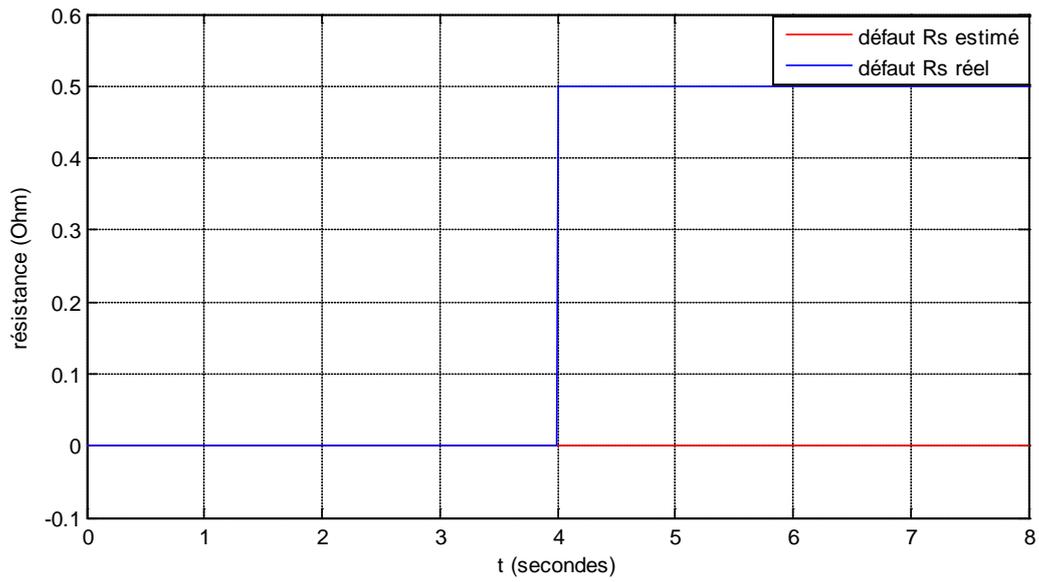


Figure 43 – Défaut sur Rs réel et estimé.

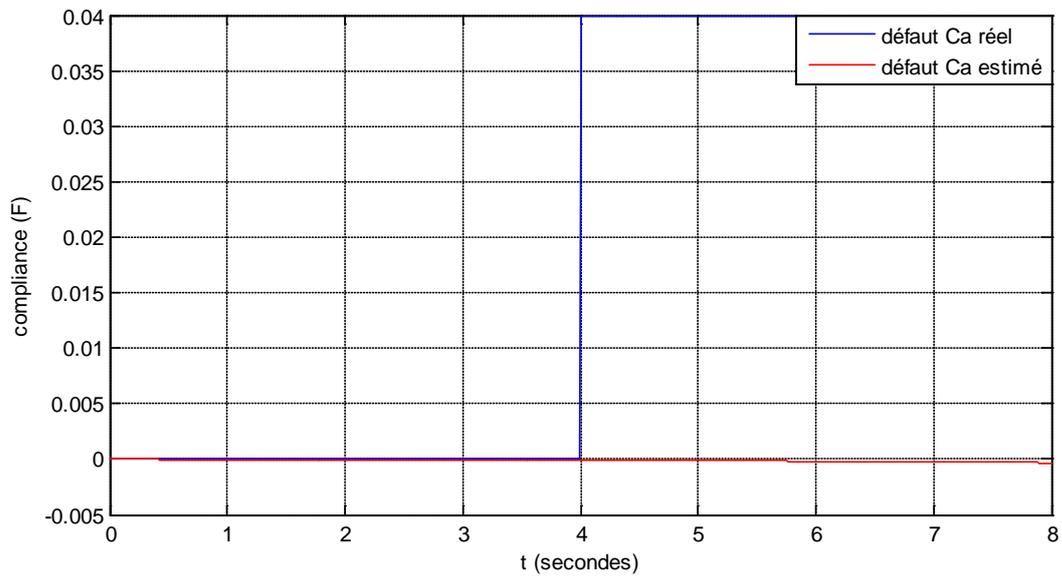


Figure 44 – Défaut sur Ca réel et estimé.

- **Estimation par Filtre de Kalman Etendu**

Nous voulons synthétiser un filtre de Kalman étendu [8] pour d'estimer les défauts ΔR_s et ΔC_a et ce afin de comparer entre les performances de l'observateur en mode glissant et le Filtre de Kalman. Pour cela, nous considérons le système (18) réécrit comme suit :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{f}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i(t) & E_i(x, t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ f(t) \end{bmatrix} + w \\ y(t) = [C \ 0] + v \end{cases} \quad (19)$$

Tels que w et v sont les bruits du processus et du capteur respectivement. Ces bruits sont de moyenne nulle et covariance Q et R respectivement. Vu que les matrices $A_i(t)$ et $E_i(t)$ dépendent du temps et de plus des états pour $E_i(t)$ ce qui rend le système non-linéaire. Ceci implique la nécessité d'utiliser un Filtre de Kalman Etendu. Les équations (20) à (23) composent l'algorithme d'estimation :

$$\dot{\hat{z}} = A_{z,i}(t)z(t) + K_i(y - C_z \hat{z}(t)) \quad (20)$$

$$F_i = \frac{dA_{z,i}(t)}{dz} = \begin{bmatrix} A_{z,i}(t) + \frac{\partial E_i(t)}{\partial x} & E_i(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_i &= -P_i(t)C^T R^{-1} C P_i(t) + A_{z,i}(t)P_i(t)^T + P_i(t)A_{z,i}(t)^T + Q \\ K_i(t) &= P_i(t)C^T R^{-1} \end{aligned}$$

Avec $A_{z,i}(t)$ et C_z et le vecteur z sont les matrices augmentées et le vecteur augmenté définis comme suit :

$$\begin{aligned} z &= \begin{bmatrix} x \\ f \end{bmatrix} \\ C_z &= [C \ 0] \\ A_z &= \begin{bmatrix} A_i(t) & E_i(x, t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Nous avons testé le Filtre de Kalma synthétisé pour ce système en absence d'anomalies, les résultats de simulation sont présentés par les figures (de 41 à 46). Nous constatons qu'il donne des résultats satisfaisants en absence de défauts.

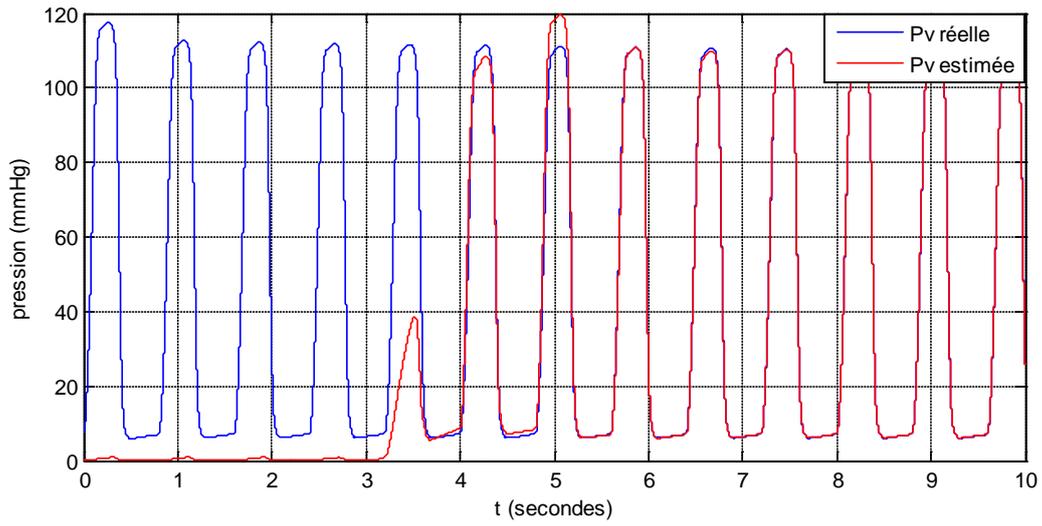


Figure 45 – Pression ventriculaire réelle et estimée.

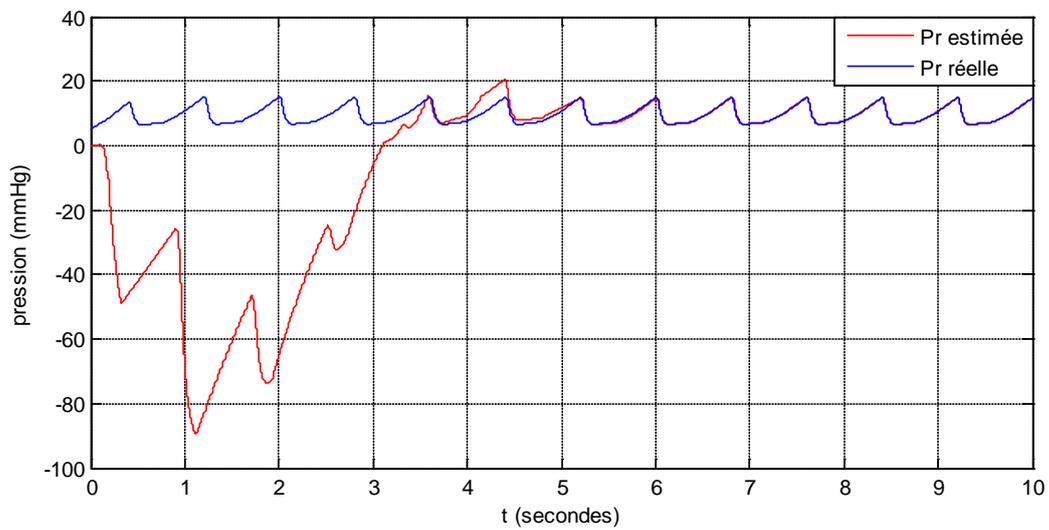


Figure 46 – Pression auriculaire réelle et estimée.

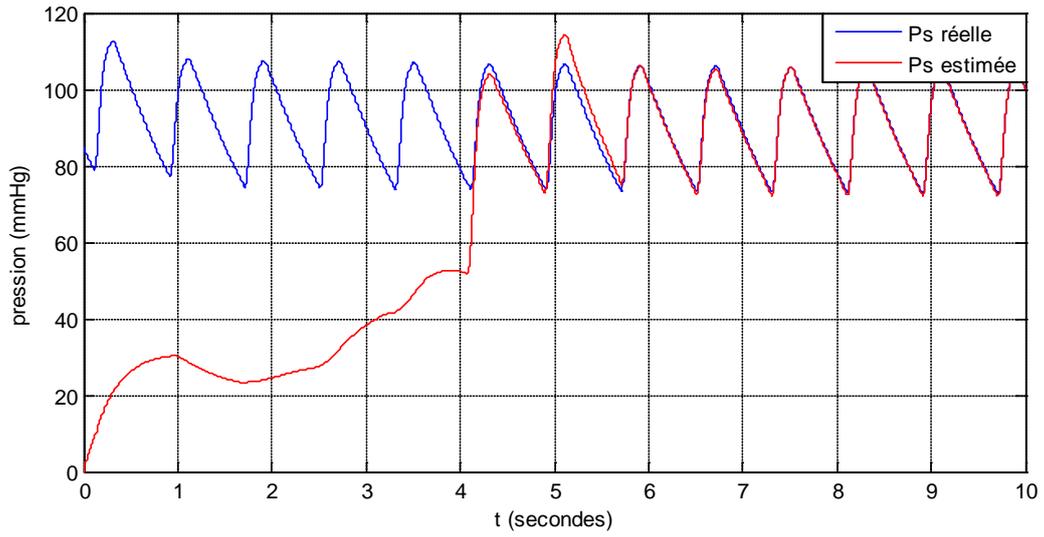


Figure 47 – Pression systémique réelle et estimée.

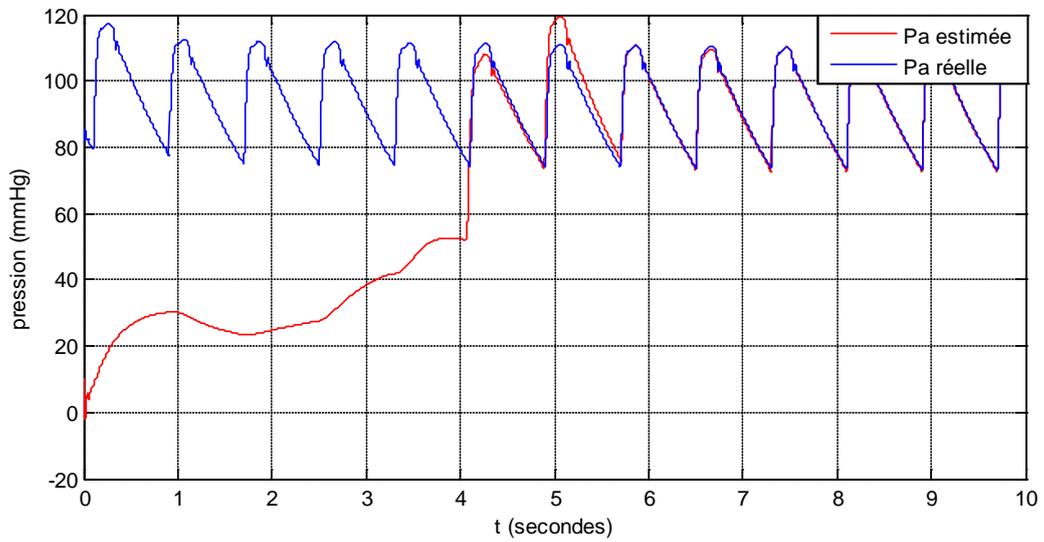


Figure 48 – Pression aortique réelle et estimée.

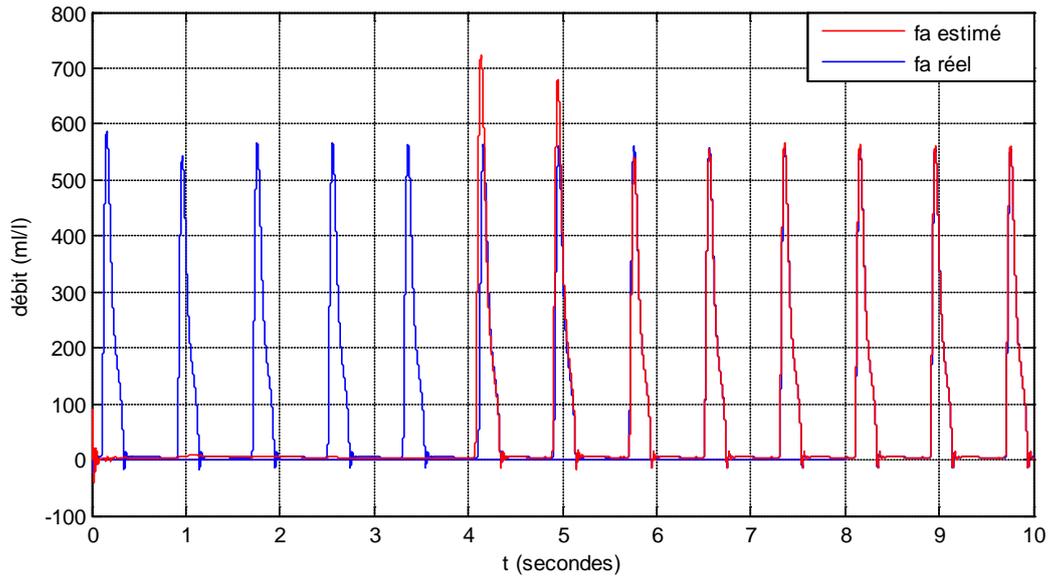


Figure 49 – débit aortique réel et estimé.

6. Conclusion

Dans ce document, nous avons utilisé différentes méthodes de diagnostic appliquées au système cardiovasculaire. La première méthode nous a permis d'obtenir une table de signature pour les différentes anomalies valvulaires afin de les détecter, les localiser et les identifier. Cette table nous a aidées à associer chacune des pathologies valvulaires à un résidu. Ce résidu est égal à l'erreur d'observation, sera donc témoin de la présence de chacune des anomalies. Nous avons synthétisé dans la deuxième méthode un observateur hybride mode glissant et un Filtre de Kalman Etendu pour estimer les états augmentés qui sont les défauts sur R_s et C_a . Pour l'observateur mode glissant, nous n'avons pas pu estimer les états augmentés. Pour le Filtre de Kalman, son test en absence d'anomalies a donné de bons résultats.

Annexe Méthodes de diagnostic cliniques

L'**électrocardiographie** (ECG) est une représentation graphique de l'activité électrique du cœur. Cette activité électrique est liée aux variations de potentiel électrique des cellules spécialisées dans la contraction (myocytes) et des cellules spécialisées dans l'automatisme et la conduction des influx. Elle est recueillie par des électrodes à la surface de la peau.

L'électrocardiogramme est le tracé papier de l'activité électrique dans le cœur. L'électrocardiographe est l'appareil permettant de faire un électrocardiogramme. L'électrocardioscope, ou scope, est un appareil affichant le tracé sur un écran.

C'est un examen rapide ne prenant que quelques minutes, indolore et non invasif, dénué de tout danger. Il peut être fait en cabinet de médecin, à l'hôpital, voire à domicile. Son interprétation reste cependant complexe et requiert une certaine expérience du clinicien. Il permet de mettre en évidence diverses anomalies cardiaques et a une place importante dans les examens diagnostiques en cardiologie.

Le **cathétérisme cardiaque** est une méthode d'exploration hémodynamique relativement ancienne. Elle consiste à introduire une sonde dans les différentes cavités cardiaques pour mesurer des pressions et le taux de saturation en oxygène du sang.

L'**échographie Doppler** est un examen médical échographique en deux dimensions non invasif qui permet d'explorer les flux sanguins intracardiaques et intravasculaires. Elle est basée sur un phénomène physique des ultrasons, l'effet Doppler. Il est souvent appelé **écho Doppler**.

Bibliographie

[1] H.CHEKIREB, "Investigation sur les Modèles de Commandes Non Linéaires de la Machine Asynchrone", Thèse de doctorat, spécialité Automatique, École Nationale Polytechnique d'Alger, juin 2003.

[2] T.M. Laleg Kirati, "Contribution aux Méthodes de Diagnostic à Base d'Observateurs et à la Commande Tolérante aux Défauts Application à la Machine Asynchrone et au Robot SCARA", Projet de Fin d'Etudes, Spécialité Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juin 2004.

[3] O. Adrot, "Diagnostic à Base de Modèles Incertains Utilisant l'Analyse par Intervalle : l'Approche Bornante", Thèse de Doctorat, Spécialité Automatique et Traitement Numérique du Signal, Institut Nationale Polytechnique IAEM de Lorraine, France, Décembre 2000.

[4] M. Alhaj Dibo, "Validation de Données et Diagnostic des Systèmes Incertains à l'Aide de l'Analyse par Intervalle", Thèse de Doctorat, Spécialité Automatique et Traitement du Signal, Institut Nationale Polytechnique de Lorraine, Juillet 2005.

[5] F.TAIBI, "Diagnostic et commande tolérante aux défauts des convertisseurs multicellulaires - Approche hybride", Mémoire de Magister, spécialité Automatique, École Nationale Polytechnique d'Alger, janvier 2011.

[6] D.ICHALAL, "Estimation et diagnostic des systèmes non-linéaires décrit par un modèle de Takagi-Sugeno", Thèse de doctorat, spécialité Automatique, Traitement de signal, Génie informatique, Institut National Polytechnique de Lorraine, novembre 2009.

[7] F.D.LEDEZMA, « Detection of cardiovascular anomalies: An observer based approach », Thèse de mastère, spécialité mécatronique, King Abdulah univeristy of Sciences Technology, Juillet 2012.

[8] Hervé Guénard, « Physiologie humaine », 3 ème édition, pradel, 2009.