

Chapitre 2 Les méthodes de diagnostic

1. Introduction

Grâce aux développements rapides de l'électronique, de l'informatique et de la technologie de l'information, les processus industriels modernes deviennent de plus en plus complexes. Ainsi, les problèmes de sécurité et de la sûreté de fonctionnement révèlent une importance considérable vu que la présence d'une défaillance peut entraîner des conséquences désastreuses. Ainsi, il est indispensable de faire appel à des techniques de surveillances modernes combinant le diagnostic et la correction des défauts afin d'améliorer la sécurité et la sûreté des processus, de minimiser les coûts de maintenance et de protéger l'installation dans les états critiques. De nombreuses techniques ont été proposées dans la littérature pour le diagnostic des défauts. La plupart d'entre elles peuvent être classées en deux principales approches :

- Les méthodes basées sur la redondance matérielle,
- Les méthodes basées redondance analytique.

2. Approche à base de redondance matérielle

Les premières méthodes de diagnostic de défaut utilisaient la **redondance matérielle** (capteurs ou actionneurs multiples réalisant la même fonction) associée à de simples logiques à seuils.

Le concept de cette approche consiste à reconstruire un second processus redondant en utilisant les composants matériels utilisés pour le processus principal concerné par le diagnostic. La détection et l'identification des défauts peuvent être obtenues à partir d'une comparaison continue entre les deux sorties du processus à surveiller et de son correspondant redondant. Cette approche permet une meilleure fiabilité et peut ainsi être appliquée dans des applications dont la sécurité est fortement indispensable (l'aérospatial, le nucléaire).

Cependant, les coûts économiquement élevés des composants matériels redondants limitent leurs applications.

3. Approche à base de redondance analytique

Afin de détecter et d'isoler les défauts d'un système, une certaine redondance d'information est nécessaire. Cette redondance est utilisée dans le but d'établir les tests de consistance entre les variables couplées du système. Elle constitue une source de bon et de mauvais fonctionnement. La redondance matérielle fût la première technique de redondance utilisée pour la détection et la localisation des défauts capteurs, essentiellement dans les applications nécessitant un niveau élevé de sécurité. Par ailleurs, cette technique présente de nombreux inconvénients et contraintes majeurs.

La redondance analytique, elle, présente une alternative intéressante à la redondance matérielle. Le problème de génération des relations de redondance analytique a fait l'objet

de très nombreux travaux. La redondance d'information dans ce cas est assurée par un modèle du système ou une base de données à la place du matériel additionnel. La redondance analytique, c'est l'exploitation des relations entre les grandeurs mesurées ou estimées. Les méthodes développées à partir de ce concept sont communément appelées à base de modèles, à base de connaissances et de traitement du signal.

4. Classification des méthodes de diagnostic à base de redondance analytique

Les méthodes de diagnostic se distinguent selon différents critères :

- la dynamique du procédé (discret, continu ou hybride),
- la complexité du procédé, l'implémentation du diagnostic en ligne et/ou hors ligne,
- la nature de l'information (qualitative et/ou quantitative),
- la profondeur de l'information (structurelle, fonctionnelle et/ou temporelle), sa distribution (centralisée, décentralisée ou distribuée),

En général, ces méthodes sont divisées en deux catégories :

- **Les méthodes à base de modèles** : basées sur des modèles quantitatifs et/ou qualitatifs.
- **Les méthodes sans modèles**: qui sont des méthodes soit à base de connaissances, soit des méthodes empiriques et/ou de traitement du signal.

4.1. Les méthodes à base de modèles :

Le diagnostic à base de modèles génère des indicateurs de défauts, résidus, contenant des informations sur les anomalies ou les dysfonctionnements du procédé à diagnostiquer. Un écart entre l'état réel du système et celui estimé par le modèle, représentant le fonctionnement nominal, est mesuré. Les résidus doivent alors être assez sensibles aux défauts pour leur détection, localisation et identification.

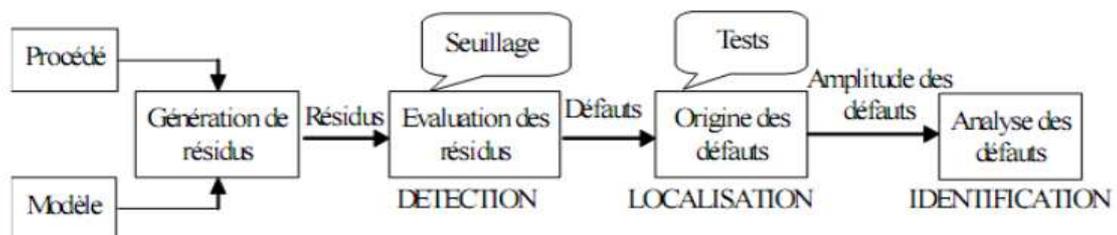


Figure1 : diagnostic à base de modèle

Parmi les méthodes à base de modèles, on peut distinguer les méthodes basées sur des modèles quantitatifs et les méthodes basées sur des modèles qualitatifs.

4.1.1. Les modèles quantitatifs

Sont utilisés pour **l'estimation de paramètres, d'état ou d'espace de parité** à travers des modèles mathématiques et/ou structurels pour représenter l'information disponible du fonctionnement d'un procédé. Un défaut provoque alors des changements dans certains paramètres physiques du procédé. Les modèles mathématiques comparent les différentes valeurs des variables avec des seuils de détection afin de générer un résidu qui sera fourni au diagnostic. A partir de toutes les signatures de défauts connues par apprentissage, il est possible d'isoler et d'identifier la panne avant de prendre une décision.

4.1.2. Les méthodes à base de modèles qualitatifs

Permettent de représenter le comportement du procédé avec à travers des modèles non plus mathématiques mais des modèles de type symbolique. Les modèles qualitatifs doivent représenter de manière qualitative des systèmes continus, discrets et/ou hybrides pour que le diagnostic soit capable de détecter les déviations du fonctionnement normal, localiser la défaillance et en déterminer la ou les causes. Pour les systèmes continus, les modèles qualitatifs sont fréquemment basés sur **des graphes causaux** et ou **des graphes causaux temporels**. Pour les systèmes à un événement discret, de nombreuses approches sont proposées utilisant des outils tels **que les automates, les équations logiques ou les RdP (réseaux de Pétri)** avec observation partielle ou totale du fonctionnement du procédé.

4.2. Les méthodes sans modèles

Pour certaines applications industrielles, la conception d'un modèle mathématique est difficile, voire impossible à obtenir, à cause des nombreuses reconfigurations intervenant dans le processus de production ou de la complexité des phénomènes mises en jeu. Dans ce cas, on a recours à des méthodes qui ne nécessitent aucune connaissance approfondie du procédé. Les méthodes sans modèles considèrent le système comme une **boîte noire** et elles n'ont besoin d'aucun modèle mathématique pour représenter le fonctionnement du procédé. Elles utilisent uniquement un ensemble de mesures et/ou de connaissances heuristiques sur le système. Au sens strict, ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Deux classes, dans ce type d'approches, peuvent se présenter:

- Les méthodes quantitatives ou appelés méthodes à base de connaissances.
- Les méthodes qualitatives ou méthodes basées sur le traitement de données.

4.2.1. Méthodes qualitatives

Les méthodes qualitatives consistent en l'exploitation d'une base de connaissance symbolique et nécessitent l'existence d'un large éventail de données historiques correspondant aux divers modes de fonctionnement de l'installation. Ces méthodes comprennent **les méthodes à base de reconnaissance des formes, ou de réseaux de neurones, Analyse qualitative des tendances, ACP, Analyse spectrale,....**

4.2.2. Méthodes quantitatives

Les méthodes quantitatives ou à base de connaissances sont mises en œuvre lorsque la majorité des mesures sont indisponibles et lorsque la construction du modèle s'avère difficile.

Elles peuvent être utilisées pour identifier les causes des défaillances d'un procédé industriel. Il s'agit d'analyses fonctionnelles et structurelles qui se basent sur l'expérience et la connaissance de l'opérateur. Ces méthodes comprennent **les méthodes à base de systèmes experts, l'AMDEC, l'Arbre de causes a effets ou arbre de défaillances**

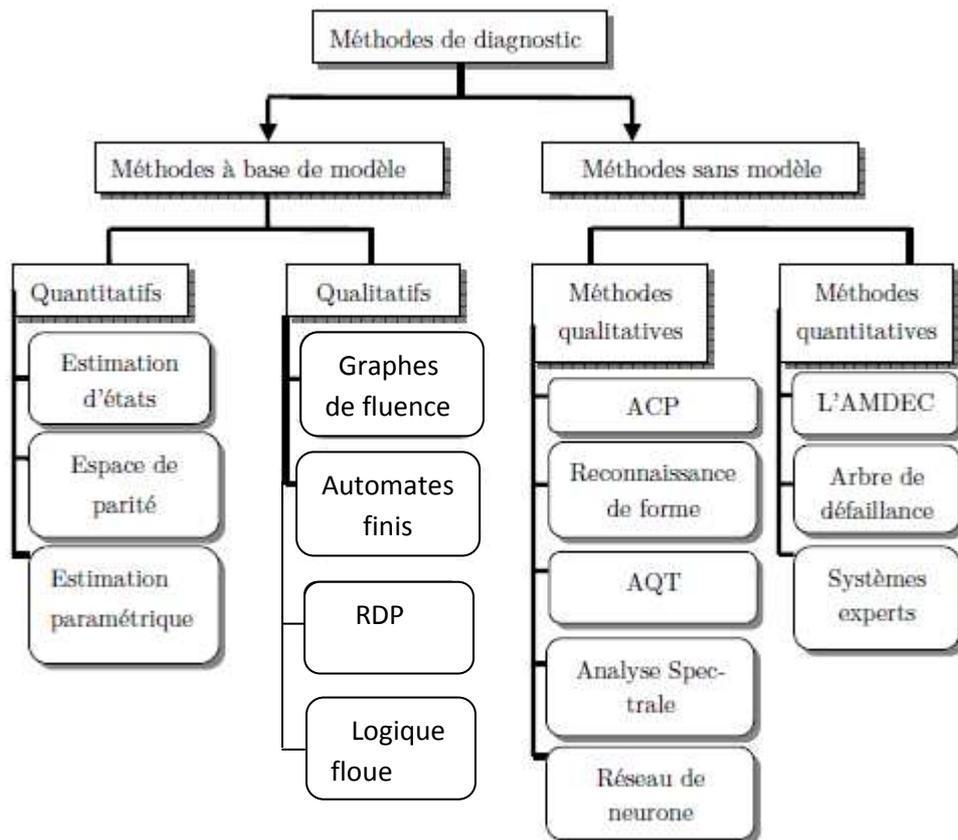


Figure 2 : Classification des méthodes de diagnostic

5. Le diagnostic de défauts à base de modèles

Comme leur nom l'indique ces méthodes sont basées sur l'utilisation de modèle, elles regroupent les techniques d'estimation d'état. L'utilisation de modèles peut être divisée en deux étapes principales :

5.1. La génération de résidus et la prise de décision

Lors de la première étape, les signaux d'entrée et de sortie du système sont utilisés pour générer un résidu, c'est-à-dire un signal mettant en évidence la présence d'un défaut. En général, en régime de fonctionnement normal, ce signal est statistiquement nul et s'écarte notablement de zéro en présence de défauts.

5.2. Evaluation de résidus

Durant la seconde étape, les résidus sont analysés pour décider s'il y a présence de défaut et sur quel composant du système il est intervenu (**opération souvent appelée localisation**) et dans certains cas, déterminer la nature du défaut et sa cause (**identification**). La décision peut

s'effectuer à l'aide d'un simple test de dépassement de seuil sur les valeurs instantanées des résidus.

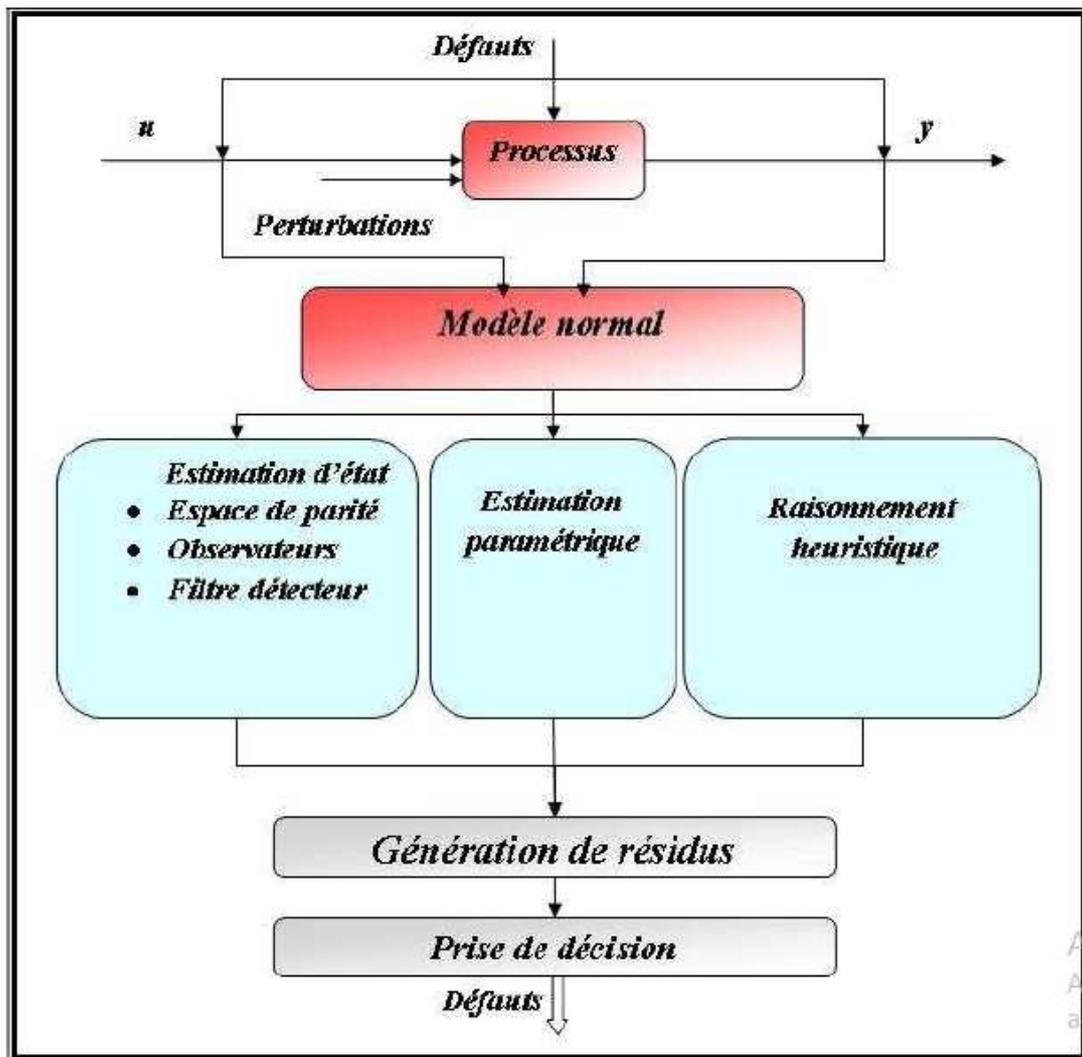


Figure 3 : Architecture générale de la détection de défauts à base de modèles.

Ces méthodes reposent sur l'estimation de l'état en utilisant des modèles mathématiques du système décrivant le comportement du système. Si l'écart entre ces modèles et les variables du système dépasse un certain seuil, une défaillance est alors détectée. A ce moment, un résidu sera généré et comparé avec toutes les signatures des défauts connus, afin d'isoler et d'identifier la défaillance. Parmi les différentes méthodes de détection et de diagnostic utilisant des modèles mathématiques, nous trouvons principalement l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique. On a distingué trois approches pour la génération de résidus :

- Les approches à base d'observateurs d'états.
- Les approches par les espaces de parité.
- Les approches par l'estimation de paramètres.

6. Rappel sur les observateurs d'état linéaires

6.1. Observabilité des systèmes linéaires

6.1.1. Définition de l'observabilité

Avant la conception d'un observateur pour un système dynamique il est nécessaire de savoir si on peut estimer ses états à partir des informations sur l'entrée et la sortie. L'observabilité d'un système exprime la possibilité de reconstruire les états du système à partir de la seule connaissance des sorties et des entrées pendant un intervalle de temps suffisamment long.

6.1.2. Le Critère d'observabilité

Considérons le système suivant :

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

Tels que $x(t) \in R^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in R^m$ est le vecteur de commande, $y(t) \in R^p$ est le vecteur de sortie système. A, B, C et D sont des matrices connues avec des dimensions appropriées.

Et la matrice d'observabilité O :

$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Si le rang de la matrice d'observabilité (2) est égale à n , le système (1) est dit observable où la paire (C, A) est observable.

$$\text{rang}(O) = n \quad (3)$$

6.2. Principe d'un observateur d'état

6.2.1. Définition d'un observateur

Un observateur est un système dynamique auxiliaire qui permet de reconstruire l'estimé $\hat{x}(t)$ du vecteur d'état réel $x(t)$ du procédé physique à partir des informations connues qui sont les entrées et les mesures de sorties. Cet état estimé sera utilisé à des fins de commande du système ou de détection et localisation des défauts.

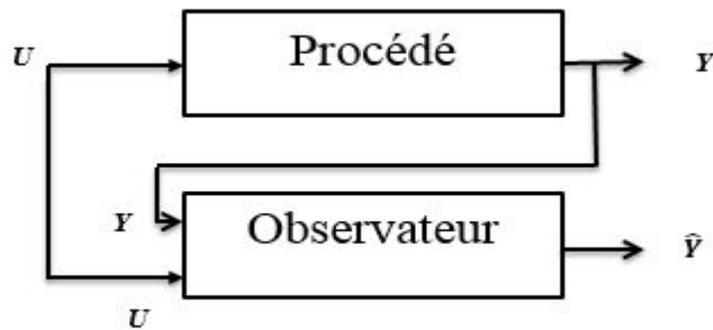


Figure 4 : Principe d'un observateur

Considérons le système à surveiller :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4)$$

Le rôle de l'observateur est d'estimer les états du système $x(t)$ à partir des grandeurs supposées connues l'entrée $u(t)$ et la sortie $y(t)$.

Et l'observateur :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (5)$$

Tel que : $\hat{x}(t)$ et $\hat{y}(t)$ sont respectivement les estimés de $x(t)$ et de $y(t)$ et la matrice L est le gain de l'observateur.

L'erreur d'estimation et l'erreur de sortie sont respectivement :

$$\begin{cases} ex = x(t) - \hat{x}(t) \\ ey = y(t) - \hat{y}(t) \end{cases} \quad (6)$$

L'objectif dans la conception d'un observateur est de déterminer le gain L qui assure la convergence de l'erreur d'estimation d'état vers zéro quand $t \rightarrow \infty$.

6.2.2. Classification des observateurs pour systèmes linéaires

6.2.2.1. Observateur de Luenberger

L'observateur de Luenberger est l'un des observateurs connus dans les commandes par retour d'état. Il permet de reconstruire l'état du système observable lorsque tout ou une partie du vecteur d'état ne peut être mesurée, comme il peut estimer les paramètres variables ou

inconnus d'un système. Une représentation de l'observateur de Luenberger peut s'exprimer par la figure 5.

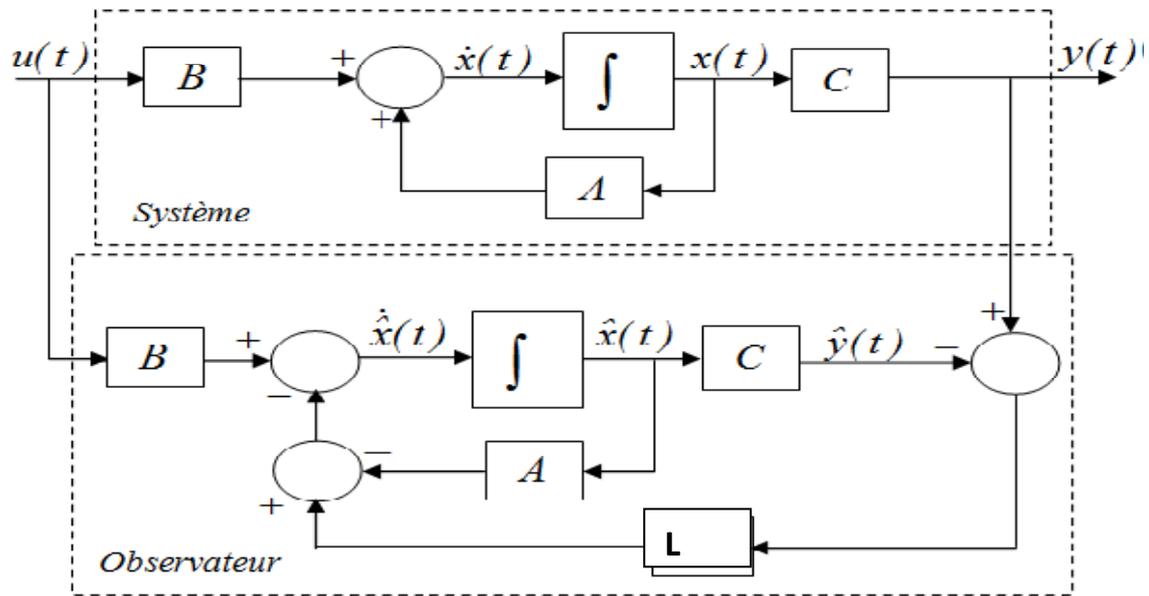


Figure 5 :Structure générale observateur de Luenberger

Comme on est dans le domaine déterministe alors les bruits sont nuls donc notre système sera sous cette forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (7)$$

Et l'observateur :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (8)$$

L'erreur d'estimation est $e_x = x(t) - \hat{x}(t)$ (9)

La dynamique de l'erreur est : $\dot{e}_x = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t)$ (10)

$$\dot{e}_x = Ax(t) + Bu(t) - (A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t))) \quad (11)$$

Comme on a : $y(t) = Cx(t)$ et $\hat{y}(t) = C\hat{x}(t)$

On aura :

$$\dot{e}_x = (A - LC) e_x \quad (12)$$

La construction d'un observateur de Luenberger revient donc à déterminer la matrice du gain L telle que les valeurs propres de $A - LC$ soient strictement négatives, c'est-à-dire stable.

Généralement on choisit la dynamique de l'observateur en moins 03 fois plus rapide que celle du système.

6.2.2.2. Observateur à entrées inconnues

Les processus physiques sont souvent soumis à des perturbations, ces perturbations ont des effets néfastes sur le comportement normal du processus, elles sont appelées entrées inconnues lorsqu'elles affectent l'entrée du système et leur présence peut rendre difficile l'estimation de l'état du système. Le principe de construction d'un observateur à entrées inconnues consiste à rendre l'erreur d'estimation indépendante des perturbations non mesurables.

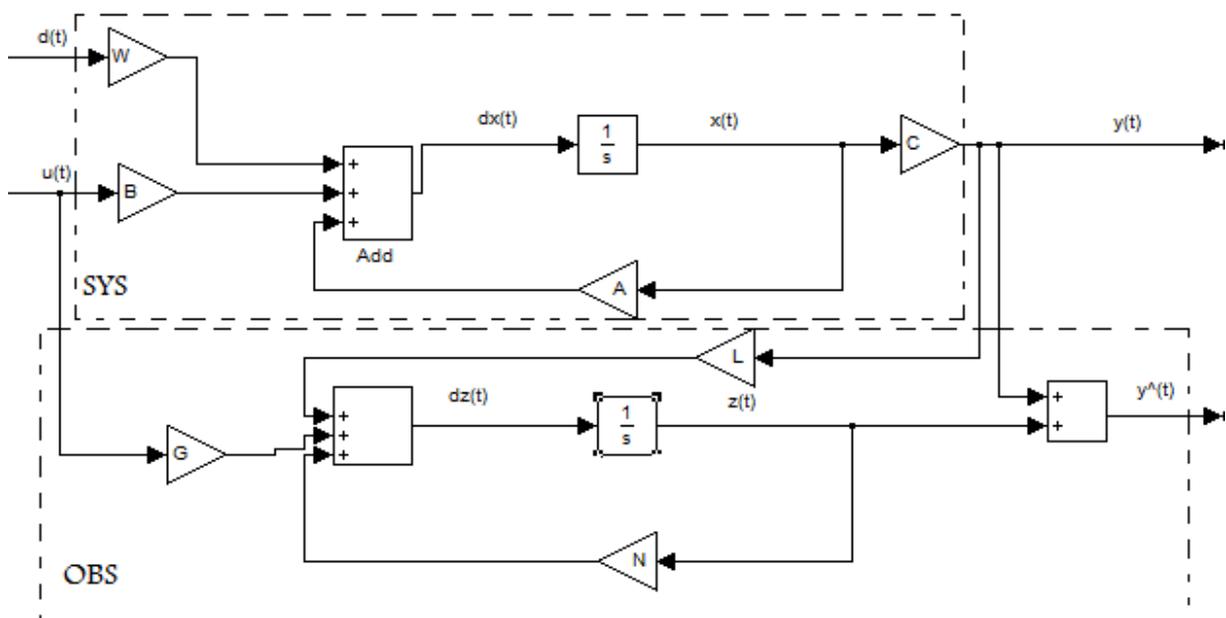


Figure 6: Schéma fonctionnel de l'observateur à entrée inconnue

Considérons le système linéaire suivant:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + W d(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (13)$$

Où $x(t)$ est le vecteur d'état de dimension n , $u(t)$ est l'entrée de commande, $d(t)$ est la perturbation considérée comme entrée inconnue, $y(t)$ est la sortie.

Et l'observateur à entrées inconnues s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Nx(t) + Gu(t) + Ly(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) + Hy(t) \\ \hat{y}(t) = C \hat{x}(t) \end{cases} \quad (14)$$

Où $\hat{x}(t)$ est l'estimation du vecteur d'état $x(t)$.

Conditions d'existence : L'observateur à entrées inconnues existe si et seulement si les deux conditions suivantes sont vérifiées

1. Condition de découplage : $\text{rang}(CW) = \text{rang}(W) = p$
2. Condition de détectabilité : \geq

$$\text{rang} \begin{pmatrix} \lambda I - A & -W \\ C & 0 \end{pmatrix} = n + p \quad \forall \Re(\lambda) \geq 0$$

où p est la dimension de d et n celle de l'état.

N , G , L et H sont des matrices à déterminer pour que l'erreur d'estimation converge vers zéro.

La dynamique de l'erreur d'estimation :

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad (15)$$

$$\dot{e}(t) = Ne(t) + (PA - NP - LC)x(t) + (PB + G)u(t) + PWd(t) \quad (16)$$

$$\text{Où :} \quad P = I - HC \quad (17)$$

Pour construire l'observateur (14) il faut que les conditions suivantes soient satisfaites :

N : matrice de Hurwitz

$$PA - NP - LC = 0 \quad (18)$$

$$PB - G = 0 \quad (19)$$

$$PW = 0 \quad (20)$$

Alors, si les conditions (18), (19) et (20) sont satisfaites on aura :

$$\dot{e}(t) = Ne(t) \quad (21)$$

Calcul des matrices de l'observateur :

$$\text{Si : } \quad \text{Rang}(CW) = \text{Rang}(W) \quad (22)$$

Alors W possède une pseudo inverse

Donc :

$$(CW)^+ = [(CW)^T (CW)]^{-1}(CW) \quad (23)$$

Alors :

$$H = -W(CW)^+ \quad (24)$$

Calcul de $P = I - HC$, pour déterminer G à partir de (19).

tel que : $G = PB$

De (17) et (18)

$$N = PA - (L + NH)C \quad (25)$$

On pose $\tilde{A}=PA$ et $\tilde{L}=L+NH$

Alors

$$N = \tilde{A} - \tilde{L}C \quad (26)$$

Si le couple (\tilde{A}, C) est observable alors on passe à la détermination de \tilde{L} qui se fait avec la technique de placement de pôles tel que les valeurs propres de $\tilde{A} - \tilde{L}C$ soient égales à des valeurs propres choisies stables.

Puis on déduit N et L .

Exemple :

on a :

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} U(t) + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} d(t)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x(t)$$

Calcul de H :

- On calcule CW :

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

$$\text{Rang}(W) = \text{rang}(CW) = 1$$

Puisque la condition est vérifiée alors on calcul la pseudo inverse.

$$(CW)^+ = [(CW)^T (CW)]^{-1} (CW)^T$$

$$(CW)^+ = [-1 \quad 0]$$

On a :

$$H = W((CW)^+) = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [-1 \quad 0] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Calcul de P :

$$P = I - HC$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

Calcul de G :

$$G = PB$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Calcul de N et L :

Vérification de la Condition d'observabilité du couple (\tilde{A}, C)

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

On calcule la matrice d'observabilité O , tel que :

$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix}$$

Donc :

$$O = \begin{pmatrix} C \\ C\tilde{A} \\ C\tilde{A}^2 \end{pmatrix}$$

Donc :

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Le *rang* (O) = 3.

$$n = 3$$

Alors le couple (\tilde{A}, C) est observable.

On choisit les pôles désirés $[-4 ; -5 ; -6]$

On trouve $\tilde{L} = [-4 \ 0 ; -1 \ -30 ; 0 \ 0]$

Donc $N = [-4 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 30 ; 0 \ -1 \ -4]$

Et $L = [0 \ 0 ; -1 \ -30 ; 0 \ 0]$.