

Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté de Technologie
Département d'Electronique



Cours

Détection et Localisation des Défaits

Master 2
Automatique et Informatique Industrielle



TAHRAOUI SOUAAD Maître de Conférences A, HDR



Avant-propos

Ce document est un support de cours qui s'adresse aux étudiants de 2^{ème} année de la formation Master automatique et informatique industrielle. Ce cours permettra à l'étudiant d'acquérir les notions de base sur le diagnostic des systèmes dynamiques par les outils observateurs d'état (générateurs des résidus).

Dans le cadre de ce cours, nous nous intéressons principalement vu à la théorie du diagnostic à base modèle mathématique spécifiquement les observateurs linéaires pour les systèmes linéaires.

Semestre: S3

Unité d'enseignement: UED

Matière: Cours détection et localisation des défauts (DLD)

VHS: 22h30

Crédits: 1

Coefficient: 1

Objectifs de l'enseignement:

Acquérir des connaissances de base sur le diagnostic des systèmes dynamiques et les méthodes de diagnostic (détection et localisation des défauts). Connaître leurs contextes de fonctionnement, leurs technologies ainsi les domaines de leurs utilisations.

Connaissances préalables recommandées :

Les bases mathématiques

Des connaissances préalables en algèbre linéaire,

Systèmes asservis linéaires Multivariables.

Contenu de la matière:

CHAPITRE 1 :CHAPITRE 1: INTRODUCTION AU DIAGNOSTIC

Nous proposons dans ce chapitre de faire un état de l'art sur le diagnostic des défauts. L'intérêt se portera fondamentalement sur le problème de détection et d'isolation des défauts. Il est question dans un premier temps, de donner les différents concepts et notions rencontrés dans les littératures concernant le diagnostic des défauts, car un bon diagnostic nécessite une bonne compréhension de ces notions. Le principe de base de diagnostic sera alors présenté ainsi que les différentes méthodes proposées dans ce domaine.



CHAPITRE 2 : GENERATION DES RESIDUS A BASE D'OBSERVATEUR(observateur proportionnel)

On présente dans ce chapitre la méthode de génération de résidus à base observateur proportionnel.

CHAPITRE 3 : GENERATION DES RESIDUS A BASE D'OBSERVATEUR A ENTRES INCONNUES AVEC DECOUPLAGE PARFAIT

On présente dans ce chapitre la méthode de génération de résidus à base observateur à entrées inconnues avec découplage parfait.

Mode d'évaluation:

100% évaluation continue



SOMMAIRE

Chapitre 1 : CHAPITRE 1: INTRODUCTION AU DIAGNOSTIC

1.1.	Introduction	3
1.2.	Définitions générales	4
1.2.1.	Diagnostic.....	4
1.2.2.	Fonctionnement normal d'un système.....	4
1.2.3.	Défaut (<i>fault</i>)	4
1.2.4.	Défaillance.....	4
1.2.5.	Panne	5
1.2.6.	Dysfonctionnement	5
1.2.7.	Perturbation	5
1.2.8.	Sensibilité	5
1.2.9.	Résidu.....	5
1.2.10.	Détection de défauts	5
1.2.11.	Localisation de défauts	6
1.2.12.	Identification de défauts	6
1.2.13.	Signature.....	6
1.2.14.	Robustesse	6
1.2.15.	Surveillance	6
1.2.16.	Supervision.....	7
1.3.	Classification de défaut.....	7
1.3.1.	Emplacement	7
1.3.2.	Modélisation.....	8
1.3.3.	Caractéristiques temporelles.....	8
1.4.	Principe de la surveillance	9
1.5.	Surveillance utilisant les modèles.....	11
1.5.1.	Redondance physique (matérielle)	12
1.5.2.	Redondance analytique (équations différentielles et matrices de transfert)	13
1.6.	Détection et isolation des défauts (FDI).....	14



1.7.	Principe du diagnostic.....	15
1.7.1.	Architecture de diagnostic	16
1.9.	Génération de résidus à base modèles	19
1.9.1.	Obtention des tables de signatures	20
1.10.	Méthodes de diagnostic	20
1.11.	Méthodes de diagnostic à base de modèles.....	22
1.10.1.	Approches à base d'observateurs d'états	23
1.11.	Les avantages des méthodes de diagnostic à base de modèles.....	25
1.12.	Conclusion.....	26
CHAPITRE 2 : GENERATION DES RESIDUS A BASE D'OBSERVATEUR(observateur proportionnel)		27
2.1.	Introduction	28
2.2.	Définition du vecteur résidu	28
2.3.	Définition d'un observateur.....	28
2.4.	Le modèle utilisé pour la synthèse d'un générateur de résidus.....	29
2.5.	Générateur de résidus (observateur proportionnel) :	30
2.6.	Matrice de transfert :	31
2.7.	Analyse par table de signatures.....	32
2.8.	Exemple illustratif	34
3.1.	Introduction	37
3.2.	Description mathématique du système à surveiller.....	37
3.2.1.	Système en présence des défauts actionneurs:	37
3.2.3.	Systèmes en présence des défauts capteurs:.....	37
3.2.3.	Systèmes en présence des défauts de capteurs et des défauts actionneurs	38
3.3.	Découplage parfait des entrées inconnues.....	38
3.4.	Synthèse d'Observateur à entrées inconnues UIO avec découplage parfait.....	39
3.4.1.	Structure de l'observateur.....	39
3.5.	Conditions d'existence et procédures pour la mise en œuvre du découplage parfait....	41
3.6.	Algorithme de synthèse de l'observateur :	42
3.7.	Calcul théorique de résidu	42
Exercices.....		43
Corrections.....		47
Bibliographie		52



CHAPITRE 1: INTRODUCTION AU DIAGNOSTIC

1.1. Introduction

Le diagnostic, suscite depuis les années 1970 un intérêt croissant tant au niveau du monde industriel que de la recherche scientifique, dans l'objectif vis à développer des systèmes de diagnostic en vue d'assurer la maintenance intelligente ou prédictive des industriels, donc l'objectif est de développer des générateurs de résidus robuste (indicateurs de défauts) de l'installation qui sont utilisés pour détecter le dysfonctionnement et le localiser.

C'est une évidence de distinguer que la commande des systèmes devient de plus en plus complexe, cela est dû à la nature des systèmes, mais aussi à la volonté de contrôler tous les paramètres et toutes les perturbations affectant le système. Dans cette dynamique s'est développée la discipline de la sûreté de fonctionnement. Pour un grand nombre d'applications, il est nécessaire d'implanter un système de surveillance au niveau des organes de conduite (actionneur, capteur d'instrumentation) afin de détecter et isoler et identifier tout dysfonctionnement.

De manière générale, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom FDI (Fault Detection and isolation). Cette procédure nous permet d'avoir des informations sur l'apparition d'un défaut et sur sa provenance le plus rapidement possible. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications.

L'un des outils du diagnostic le plus précieux c'est les méthodes à base observateur, de sorte que cette approche de diagnostic à base modèle repose sur l'utilisation d'un modèle (physique, mathématique...) du système étudié. Une comparaison entre les sorties du modèle et les signaux mesurés, provenant du système réel, peut être effectuée à la détection et la localisation de défauts. Précisément nous allons utiliser les observateurs à entrée inconnue avec découplage parfait du système linéaire pour éviter les fausses alarmes.

Nous proposons dans ce chapitre de faire un état de l'art sur le diagnostic des défauts. L'intérêt se portera fondamentalement sur le problème de détection et d'isolation des défauts. Il est question dans un premier temps, de donner les différents concepts et notions rencontrés dans les littératures concernant le diagnostic des défauts, car un bon diagnostic nécessite une bonne compréhension de ces notions. Le principe de base de diagnostic sera alors présenté ainsi que les différentes méthodes proposées dans ce domaine.

D'autre part, nous nous intéressons sur la procédure générale de détection et d'isolation des défauts par les méthodes à base de modèle mathématique. Cette dernière passe par deux étapes essentielles : la génération et l'évaluation du vecteur résidu.

1.2. Définitions générales

Avant d'aller plus loin, il semble intéressant de rappeler les principales terminologies propres (une défaillance, une panne, un état de fonctionnement normal,...), termes utilisés en diagnostic des systèmes auxquels nous aurons souvent recours dans la suite.

1.2.1. Diagnostic

Un diagnostic est un état expliqué d'un système physique compatible avec les informations disponibles sur le comportement réel du système et avec le modèle de comportement de référence disponible. Habituellement, le diagnostic est exprimé par les états des composants ou les états des relations de description du comportement donc le diagnostic est la détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut (fonction qui suit la détection et inclut les fonctions de localisation et d'identification).

1.2.2. Fonctionnement normal d'un système

Un système est dit dans un état de fonctionnement normal lorsque les variables le caractérisant (variables d'état, variables de sortie, variables d'entrée, paramètres du système) demeurent au voisinage de leurs valeurs nominales. Le système est dit défaillant dans le cas contraire.

1.2.3. Défaut (*fault*)

On appelle un défaut une déviation non permise d'au moins une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système par rapport aux conditions normales de fonctionnement. Un défaut est l'écart entre la caractéristique observée et la caractéristique théorique. En l'absence de défaut cet écart est idéalement nul. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs et au niveau du processus. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut.

1.2.4. Défaillance

Une défaillance définit une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique, c'est-à-dire caractérise son incapacité à accomplir certaines fonctions qui lui sont assignées.

Les défauts incluent les défaillances mais la réciproque n'est pas vraie. Un système peut remplir sa fonction tout en présentant une anomalie de comportement. Par exemple, une machine électrotechnique peut produire un bruit anormal tout en entraînant correctement une charge, en supposant que telle soit sa fonction. Le bruit anormal est un défaut qui peut permettre de présager d'une défaillance à venir. La recherche de défauts est donc fondamentale en diagnostic.

1.2.5. Panne

La panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir la fonction nécessaire. Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation du dispositif à accomplir sa fonction, on déclarera le dispositif en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance.

Dans le cadre de maintenance préventive conditionnelle, il est clair que le diagnostic doit permettre de détecter et de localiser un défaut avant que celui-ci ne conduise à une défaillance ou à une panne qui entrainerait l'arrêt du système.

1.2.6. Dysfonctionnement

Exécution d'une fonction du système au cours de laquelle le service rendu n'est pas délivré ou est délivré de manière incomplète.

1.2.7. Perturbation

C'est un signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non souhaitable mais considérée comme normale.

1.2.8. Sensibilité

Représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter. Ces défauts sont généralement caractérisés par une certaine amplitude.

1.2.9. Résidu

Souvent, lorsque le modèle comportemental de référence est analytique, les signaux porteurs de signes ou de symptômes sont appelés résidus parce qu'ils résultent d'une comparaison entre un comportement réel et un comportement de référence. Alors le résidu est un indicateur de défaut basé sur la déviation entre les mesures et les calculs basés sur un modèle.

Un résidu ou un indicateur de défaut exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle. C'est sur la base de sa valeur que la décision de détection est prise ou pas. Un résidu nul implique un fonctionnement normal. En pratique, le résidu est conçu afin d'être nul en moyenne dans un cas de bon fonctionnement. Ses dispersions autour de zéro sont des "restes", des résidus liés aux bruits. En revanche dans un cas avec défaut, le résidu s'éloigne de sa valeur moyenne nulle et permet d'indiquer la présence d'un défaut.

1.2.10. Détection de défauts

La détection de défaut consiste à la détermination de la présence de défauts et de l'instant d'occurrence de ces défauts.

1.2.11. Localisation de défauts

Il s'agit de la détermination du type, de la localisation et de la date d'un défaut détecté. Consiste à remonter d'un ensemble de symptômes à un ensemble de composants défectueux.

1.2.12. Identification de défauts

L'identification est la détermination de la taille et du comportement temporel d'un défaut (fonction qui suit la localisation), il s'agit de déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut.

1.2.12. Signature

Est le vecteur booléen caractérisant la réaction d'un vecteur de résidus à une défaillance particulière.

1.2.13. Robustesse

Elle détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation (sensibilité du résidu aux défauts et insensibilité vis-à-vis des perturbations). Généralement, la robustesse est définie par rapport à toutes les entrées inconnues. En pratique, d'autres critères sont à prendre en considération. En phase d'industrialisation, les contraintes ergonomiques et économiques sont essentielles. La rapidité de détection peut être un facteur déterminant. De même, les coûts économiques vont conditionner la stratégie de diagnostic.

1.2.14. Surveillance

Ensemble de fonctions s'exécutant en temps réel ayant pour but de reconstituer l'état réel du procédé au sein de modèles utilisés par le système de conduite du procédé. Elle consiste en l'enregistrement de l'information ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication de comportements anormaux.

La surveillance de la majeure partie des procédés industriels se limite à des systèmes de traitement d'alarmes. Des valeurs limites sont définies sur des variables clés par des experts du procédé selon des critères de sécurité concernant les hommes, l'installation et son environnement.

Les mesures au-delà de ces valeurs limites déclenchent des alarmes. Un système de traitement d'alarmes est donc l'outil de base pour aider l'opérateur dans sa tâche de surveillance. Il reste cependant aux opérateurs à analyser la situation et à prendre une décision adaptée : actions correctives, conduite en mode dégradé, activation d'une procédure d'arrêt d'urgence. L'efficacité de l'opérateur est primordiale que ce soit du point de vue économie ou sécurité.

1.2.15. Supervision

Représente la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriés en vue de maintenir son opération face à des défaillances.

1.3. Classification de défaut

Les défauts qui affectent un système sont classés selon leur emplacement, leur modélisation, leurs caractéristiques temporelles (voir figure 1.1).

1.3.1. Emplacement

Les défauts apparaissent dans les différentes parties d'un système, ils sont classés selon leur emplacement en trois catégories.

- **Les 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 valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture. Un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer.

- **Les défauts actionneurs**

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale (défaillance) ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Un exemple de perte totale d'un actionneur est un actionneur qui est resté "collé" sur une position entraînant une incapacité à commander le système par le biais de cet actionneur. Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissant de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une certaine dégradation dans leur action sur le système. (perte de puissance d'un moteur, fuite dans un vérin, . . .).

- **Les défauts composants ou systèmes**

Ce type de défaut provient du système lui-même; bien souvent les défauts n'appartenant pas à un défaut capteur ou actionneur sont classés de manière arbitraire dans cette catégorie. Néanmoins, un défaut composant résulte de la casse ou de l'altération d'un composant du système réduisant les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit. (La CTN: résistance à Coefficient de Température Négatif, d'une chaufferie est cassée, un roulement est altéré, . . .).

•Défauts du système (ou de l'algorithme) de commande

Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur (selon l'algorithme implémenté) et sa mesure[Beard, 1971].

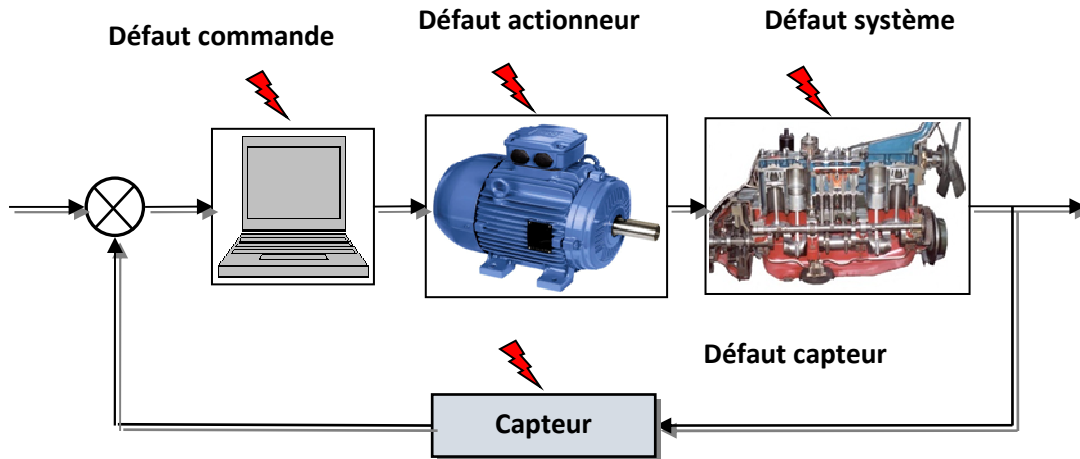


Figure1.1. Défauts d'un processus physique

1.3.2. Modélisation

En plus, suivant la manière dont les défauts sont modélisés, ils sont classés en additif et multiplicatif, comme représenté sur la figure 1.2

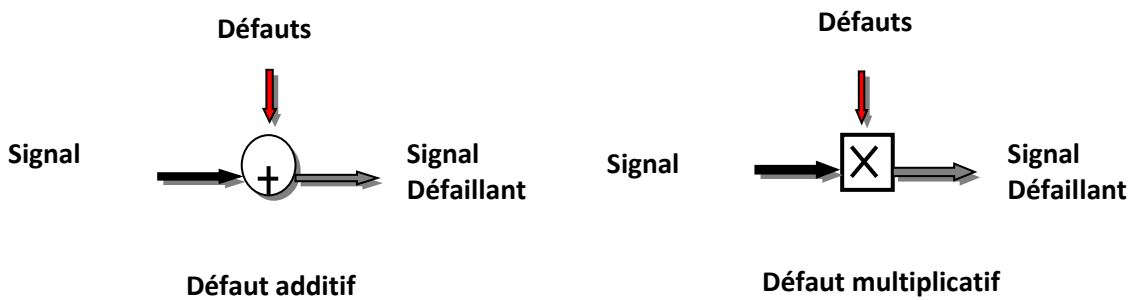


Figure.1.2. Les défauts selon leur représentation

1.3.3. Caractéristiques temporelles

Les défauts sont classés également selon leurs caractéristiques temporelles (voir la figure 1.3) comme brusque, progressif et intermittent. Les défauts brusques (biais) 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. Les défauts progressifs (dérives) 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) sont des défauts qui apparaissent et disparaissent à plusieurs reprises, par exemple à cause d'un câblage partiellement endommagé [Tahraoui 2015], [Tahraoui 2017].

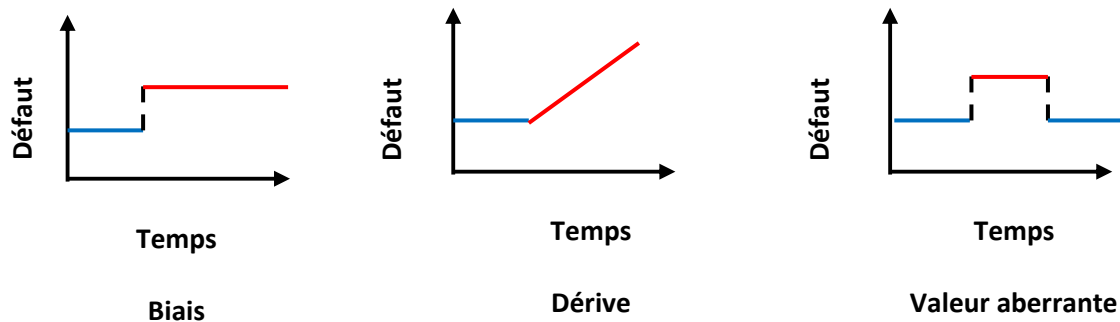


Figure.1.3. Répartition des défauts selon le comportement temporel

1.4. Principe de la surveillance

Un système de surveillance doit permettre de caractériser le mode de fonctionnement d'un système en enregistrant des informations, en reconnaissant et en indiquant les anomalies de comportement. Cette surveillance peut être réalisée en cours exploitation ou hors exploitation et chaque mode présente chacun un certain nombre d'avantages et d'inconvénients.

Système de surveillance doit réaliser les trois taches suivantes :

- La détection : qui consiste à prendre une décision binaire : soit le système fonctionne correctement, soit une panne s'est produite. Le cas échéant, la procédure doit déterminer l'instant d'occurrence du défaut ayant provoqué la panne.

La détection : La détection concerne la mise en évidence d'événements qui affectent l'évolution d'un système. De façon générale, un événement traduit un changement de situation sans préjugé du fait qu'il soit normal (dû à une action délibérée de la part d'un opérateur par exemple) ou anormal (dû à une défaillance par exemple). Détecter consiste alors à comparer le fonctionnement réel du système avec ce qu'il devrait être sous l'hypothèse du fonctionnement normal.

Un défaut est détecté en comparant une fonction d'évaluation des résidus à un seuil.

$$|r(t)| \leq T \rightarrow f(t) = 0$$

$$|r(t)| > T \rightarrow f(t) \neq 0$$

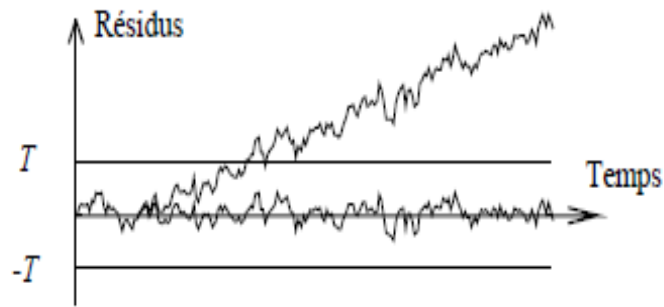


Figure 1.4. La localisation, qui consiste à déterminer le composant défectueux.

La localisation: Lorsqu'un défaut est détecté, il s'agit de le localiser. Cette localisation est réalisée à partir de la table des signatures ; définie par une matrice de transfert défauts-résidus.

Exemple :

$$\begin{pmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ r_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & 0 & G_{13} \\ 0 & G_{22} & 0 \\ 0 & G_{32} & G_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{pmatrix} \Rightarrow$$

	f_1	f_2	f_3
r_1	1	0	1
r_2	0	1	0
r_3	0	1	1

La tâche de localisation circonscrit la défaillance à un sous-ensemble du système surveillé. Elle consiste à analyser les événements de façon à pouvoir déterminer le ou les défauts d'instruments de mesures (défaut de type capteur), le ou les défauts d'actionneurs, le ou les composants défectueux du système.

- L'identification, qui consiste à déterminer le type de la panne en vue de déterminer le type de maintenance ou de correction (accommodation, reconfiguration) a réalisé sur l'installation. Cette étape nécessite souvent la connaissance d'un modèle de la panne.

Beaucoup de systèmes de surveillance n'implémentent que les deux premières tâches. L'identification d'une panne n'est réalisée que lorsqu'une action de reconfiguration de la commande ou des objectifs à atteindre est envisagée. Lorsqu'un algorithme de surveillance ne comporte que ces deux tâches, il est qualifié d'algorithme de **FDI** (Fault Detection and Isolation).

Pour répondre à la démarche de diagnostic, il existe de nombreuses approches dans la littérature.

1.5. Surveillance utilisant les modèles

L'utilisation des modèles pour la surveillance des systèmes date du début des années 70. La figure (1.5) illustre le concept général d'un système de diagnostic utilisant un modèle. Ces méthodes reposent sur l'étude de signaux appelés résidus.

Définition : Un résidu est un signal potentiellement indicateur de défauts. Il reflète la cohérence des données vis-à-vis du modèle comportemental du système.

Les méthodes de surveillance à base de modèle utilisent la redondance d'information présente sur un système. Deux types de redondance peuvent être distingués : la redondance matérielle et la redondance analytique.

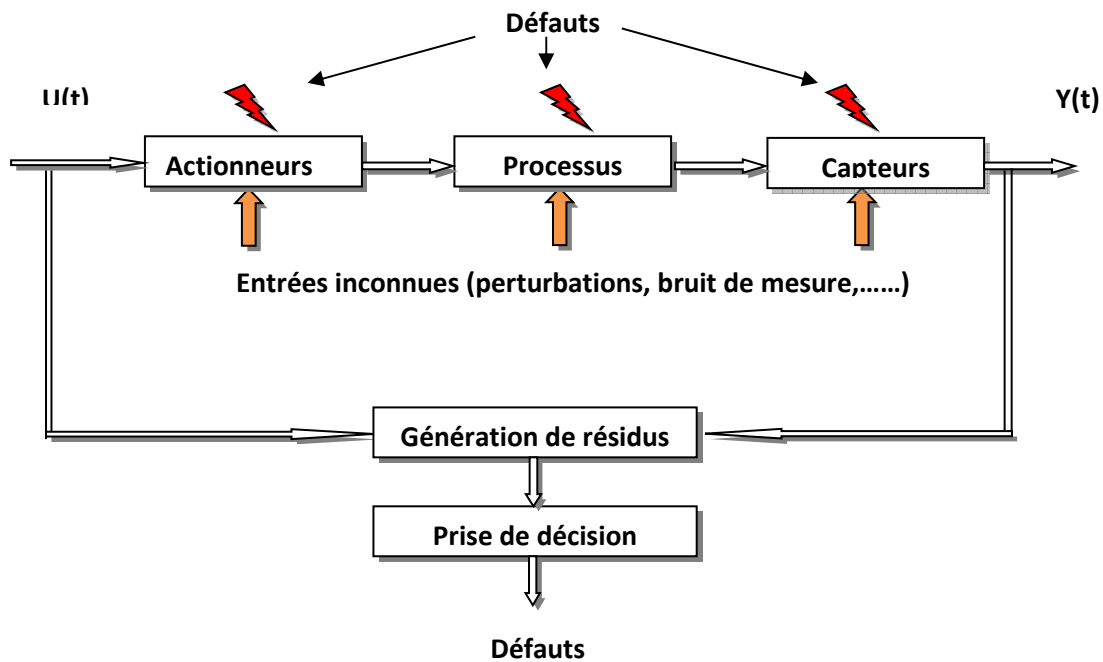


Figure.1.5. Principe de génération de résidu à base de modèles

• 1.5.1. Redondance physique (matérielle)

Le moyen le plus direct pour obtenir une information fiable sur une même variable est de disposer de plusieurs capteurs la mesurant simultanément. Une redondance à trois permettra notamment d'isoler un capteur défaillant. La redondance physique souffre d'un désavantage majeur : doubler ou tripler le nombre de capteurs revient à augmenter considérablement son coût et à affronter des problèmes d'encombrement liés à l'installation et à la maintenance de ces capteurs (figure 1.6).

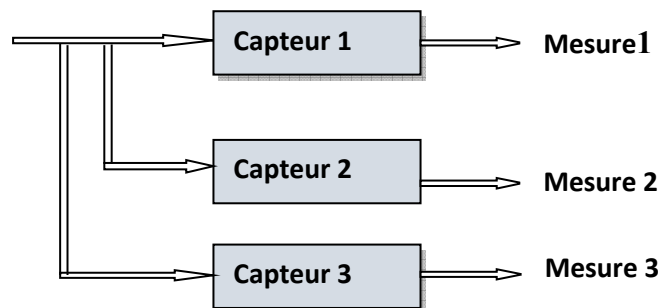


Figure. 1. 6. Redondance physique

L'ajout de capteurs supplémentaires permettra aussi d'avoir des informations additionnelles à mettre à profit dans le cadre de la redondance analytique [Courtine 2006].



Un ensemble de capteurs similaires surveillent simultanément une même pièce. Tant que les valeurs délivrées par ces capteurs restent égales entre elles, l'information est considérée comme fiable car il est très improbable que tous les capteurs fassent la même erreur de mesure au même instant. Si une de ces valeurs s'écarte significativement des autres, c'est qu'un problème est apparu, non pas sur la pièce surveillée mais sur le capteur qui délivre cette valeur aberrante. Cette technique est très fiable mais également très chère, car il faut prévoir plusieurs capteurs pour chacun des éléments à surveiller.

- **1.5.6. Redondance analytique (équations différentielles et matrices de transfert)**

Dans ce cas, un élément n'est surveillé que par un seul capteur, mais lorsque l'on détecte un problème sur le couple élément / capteur, on ne peut pas savoir lequel des deux est en cause. Néanmoins, pour un système comportant plusieurs éléments, des relations mathématiques existent entre les différentes informations relevées. L'analyse de la globalité de ces informations par des algorithmes spécifiques permet de préciser, lorsqu'un problème est détecté, si ce problème provient de la pièce en elle-même ou du capteur qui la surveille. Cette technique est légèrement moins fiable que la redondance matérielle. Néanmoins, elle est nettement plus avantageuse aussi bien au niveau coût qu'au niveau de l'espace occupé, car chaque élément à surveiller ne nécessite qu'un seul capteur.

Les informations fournies par redondance matérielle, redondance analytique, voire simultanément par ces deux biais, doivent être traitées puis analysées pour pouvoir caractériser l'endommagement d'une pièce. C'est cette fonction que remplit le système de supervision, (généralement un système informatique dédié), qui joue également le rôle d'interface en présentant les résultats de ce traitement sous une forme facilement compréhensible par un opérateur humain.

Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour la surveillance sont appelées méthodes à base de modèle. Le principe de la surveillance utilisant un modèle peut être séparé en deux étapes : la génération de résidus et la prise de décision

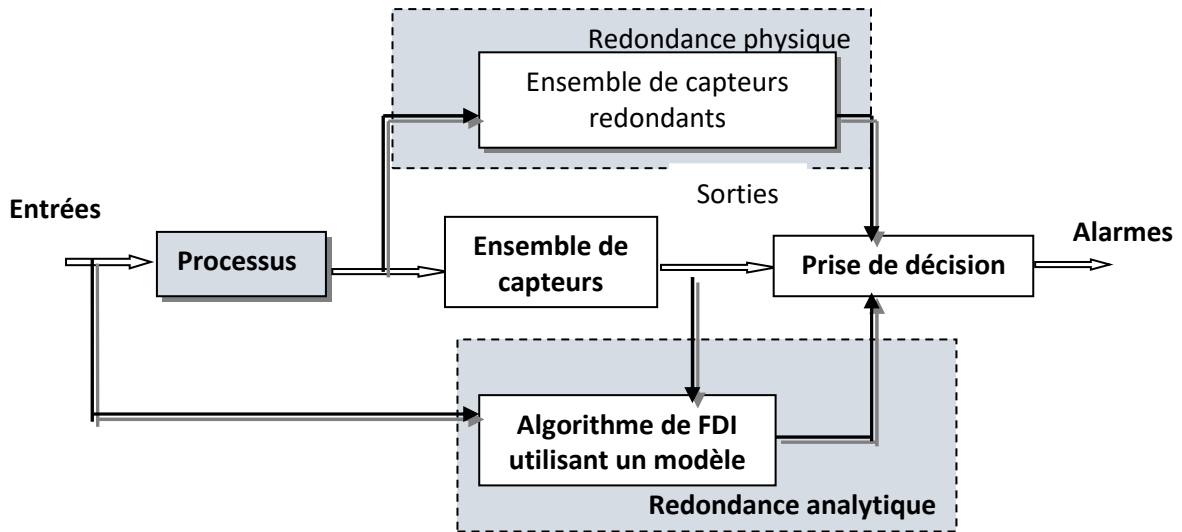


Figure.1.7. Architecture de redondance physique et analytique

Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à diagnostiquer. Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour le diagnostic sont appelées méthodes à base de modèle.

Redondance matérielle	Redondance analytique
<ul style="list-style-type: none"> • Très fiable • Très couteuse • Occupe beaucoup de place 	<ul style="list-style-type: none"> • Moins fiable • Moins couteuse • Moins de place occupée

1.6. Détection et isolation des défauts (FDI)

L'intérêt porté à la détection et l'isolation de défauts (FDI) pour les systèmes s'est développé considérablement ces dernières années. En effet la conception d'un système FDI est une étape importante vers l'obtention de systèmes de commande insensibles aux défaillances. Ces développements ont non seulement concerné la formalisation théorique des problèmes rencontrés et leur résolution mais également la mise en œuvre pratique sur des processus réels.

En se basant sur les méthodes de FDI à base modèles. Ces méthodes s'appuient sur la comparaison du comportement observé et du comportement prédit par un modèle du système. Ils sont généralement

constitués de deux étapes : génération de résidus et évaluation des résidus grâce à un système de décision (figure 1.7).

Le rôle de ce système de décision est de déterminer si le résidu est significatif pour décider de l'existence d'un défaut.

1.7. Principe du diagnostic

Le diagnostic détermine comment une faute affecte les sorties du processus. Dans l'approche **FDI** décrite auparavant, la détection d'erreur et le diagnostic de faute(s) regroupent trois étapes :

- 1- détecter l'existence d'une erreur,
- 2- localiser la faute,
- 3- caractériser l'amplitude de la faute (identifier)

L'étape de détection et de localisation sont toujours mis en œuvre en surveillance. La localisation est introduite lorsqu'aucune décision d'action sur la commande n'est pas requise. La localisation et l'identification constituent le diagnostic de fautes. La combinaison des trois fonctions présentées est définie par la stratégie de surveillance ou de supervision mis en œuvre. L'algorithme de diagnostic doit être : insensible aux perturbations, rejeter les bruits, robuste par rapport aux erreurs de modélisation, et sensible par rapport aux défauts (figure 1.8).

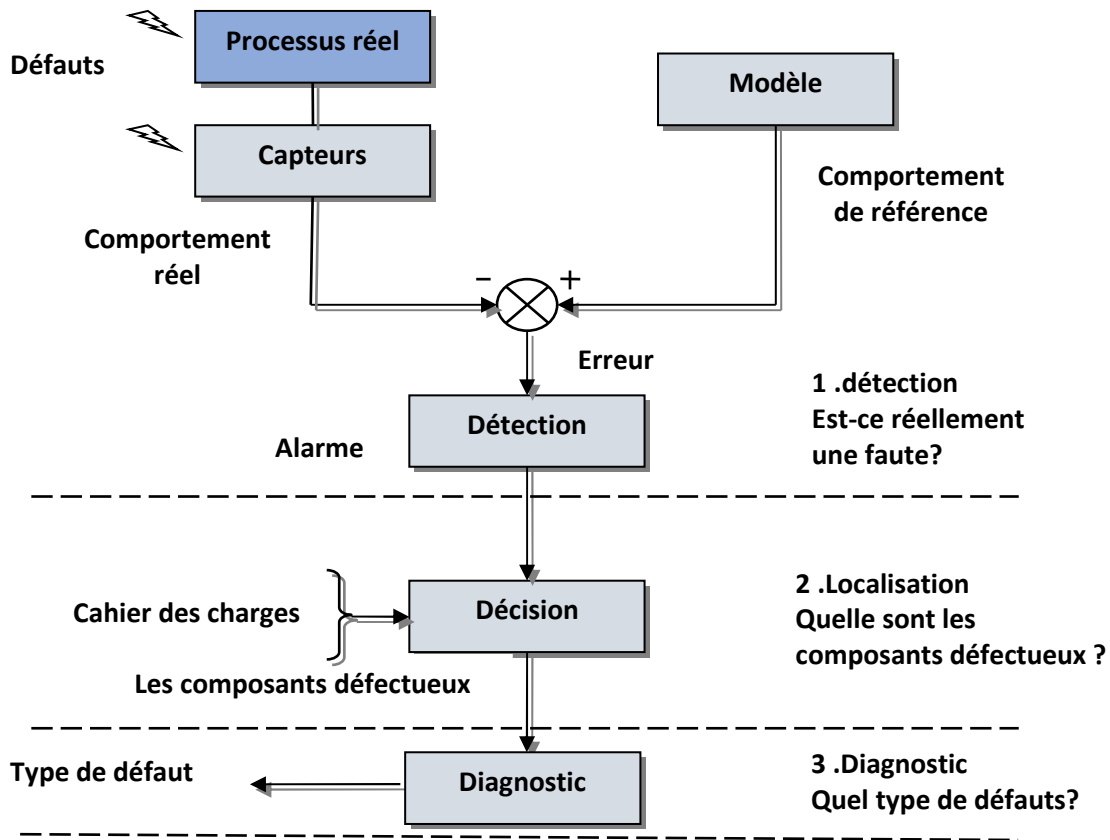


Figure1.8. Principe du diagnostic

1.7.1. Architecture de diagnostic

Le diagnostic de défauts s'effectue habituellement en combinant un générateur de résidus avec une stratégie d'analyse afin de fournir un ensemble de décisions booléennes sur la présence de défauts, comme illustré dans les figures (1.9), (1.10), et (1.11).

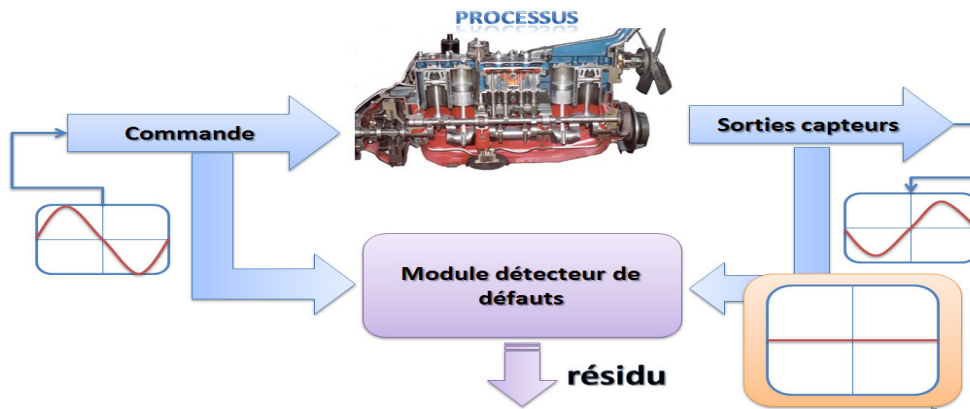


Figure 1.9. Système en bon fonctionnement

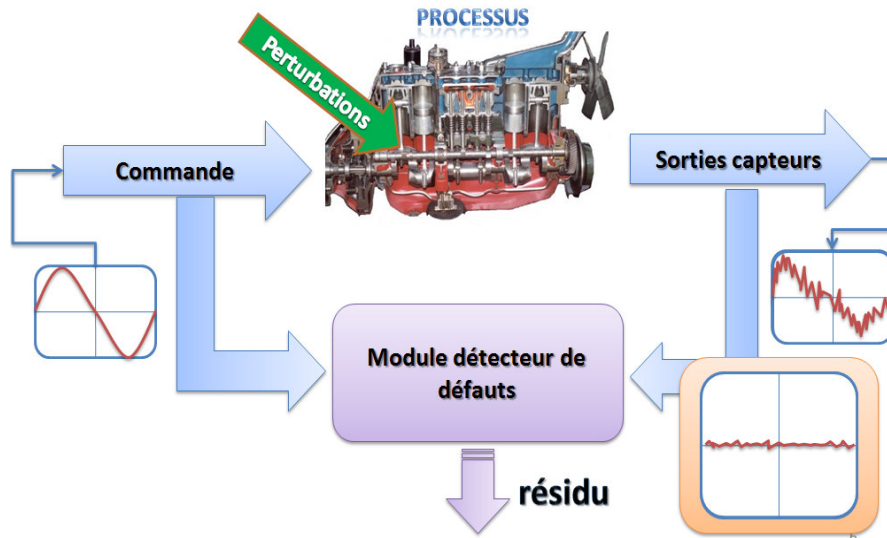


Figure 1.10 . Système en bon fonctionnement en présence de perturbation

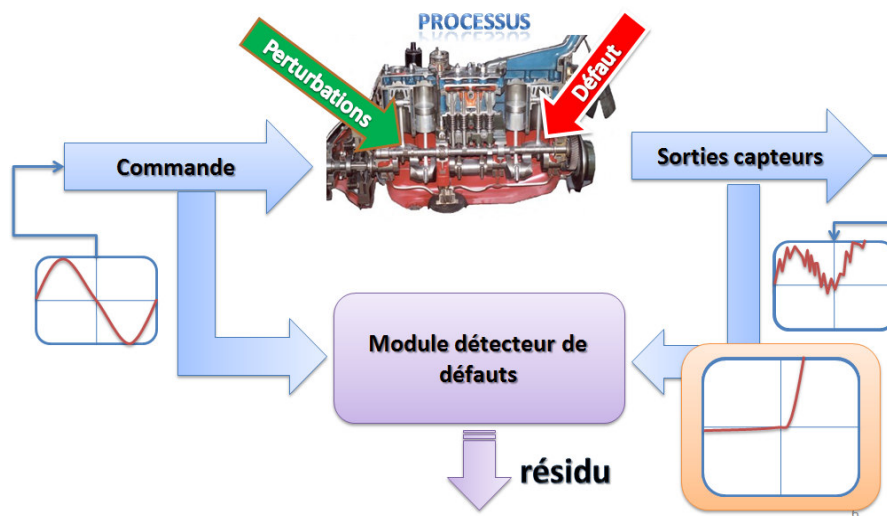


Figure1.11. Système en mauvais fonctionnement

L'étape de génération des résidus utilise un modèle du système, dans lequel sont injectées les entrées de commande envoyées aux actionneurs et les mesures des sorties provenant des capteurs, pour prédire son comportement attendu et le comparer à la réalité. L'objectif est de fournir un ensemble d'indicateurs quantitatifs de la présence de défauts, les résidus.

La valeur moyenne des résidus doit être proche de zéro en fonctionnement normal, et s'en écarter lorsque qu'apparaissent les défauts auxquels ceux-ci ont été rendus sensibles.

Chaque résidu peut être sensible à un seul défaut, à tous les défauts, ou à un nombre intermédiaire. Ainsi, l'étape finale du processus est une logique de décision qui transforme les fonctions de décision obtenues précédemment en une estimée de la localisation des défauts.

1.8. Performance d'une procédure de diagnostic

Comment s'assurer que le système de diagnostic développé soit le plus performant possible ? Pour répondre à une telle question, il convient tout d'abord de définir en vertu de quels critères le système peut être évalué. D'une manière générale, nous pouvons regrouper les différents critères de performance du système de détection de la manière suivante :

- Détectabilité,
- Isolabilité,
- Sensibilité,
- Robustesse,
- Coût économique,
- Temps de développement.

La notion de **détectabilité** est l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir déceler la présence d'une défaillance sur le procédé. Elle est fortement liée à la notion d'indicateurs de défauts (résidus) : le générateur de résidus doit, d'une certaine manière, être sensible à la défaillance que l'on souhaite détecter.

L'isolabilité est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut. Une alarme engendre bien souvent de nouvelles alarmes et il devient dès lors difficile de retrouver l'organe défaillant. La propriété d'isolabilité est liée à la structure des résidus et à la procédure de détection elle-même.

La sensibilité caractérise l'aptitude du système à détecter des défauts d'une certaine amplitude. Elle dépend non seulement de la structure des résidus mais aussi du rapport de l'amplitude du bruit de mesure avec celle du défaut.

La robustesse détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation (sensibilité du résidu aux défauts et insensibilité vis-à-vis des perturbations). Généralement, la robustesse est définie par rapport à toutes les entrées inconnues.

En pratique, d'autres critères sont à prendre en considération. En phase d'industrialisation, les contraintes ergonomiques et économiques sont essentielles. La rapidité de détection peut être un facteur déterminant. De même, les **coûts économiques** vont conditionner la stratégie de diagnostic : le

Le système nécessite-t-il des composants trop chers pour sa conception, le temps de développement est-il trop important ? Autant de points à vérifier afin de satisfaire le cahier des charges.

1.9. Génération de résidus à base modèles

La première étape d'un système de surveillance à base de modèle consiste à générer des indicateurs de défauts. Ils contiennent des informations sur les anomalies ou dysfonctionnements du système à surveiller. Le principe est de mesurer l'écart entre les mesures des signaux du procédé, et la valeur théorique fournie par le modèle dans des conditions de fonctionnement nominal. La génération de résidus est un problème crucial pour les systèmes de diagnostic. En effet, c'est de la structure des résidus engendré que dépendra la robustesse de la localisation.

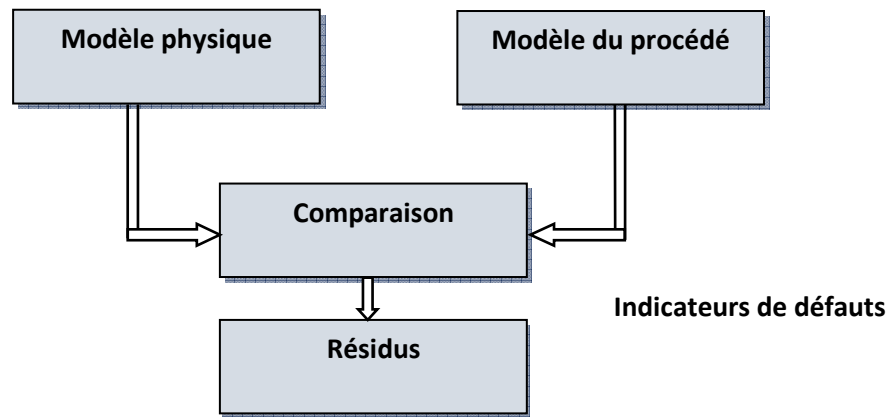


Figure 1.12. Génération de résidus

De façon générale, on forme tout d'abord des résidus de "base" qui dépendent a priori de tous les défauts. Notons ces résidus :

$$r_i = F(f_1, f_2, \dots, f_p) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-1)$$

où f_i est un défaut ou une perturbation indésirable. Il y a plus de résidus que de défauts à détecter ($n \geq p$). Puis on forme, par agrégation, des résidus "secondaires" de façon à faire disparaître l'influence du défaut f_i dans le nouveau résidu. On aboutit ainsi à deux types de résidus :

- Des résidus structurés. En réponse à un défaut particulier, seul un ensemble spécifique de résidus sera affecté. Par exemple, un défaut f_i agira sur tous les résidus sauf sur le $i^{\text{ème}}$. Parmi les résidus structurés, on distingue les résidus dédiés et les résidus généralisés.

-les résidus généralisés : le résidu r_i dépend de tous les défauts sauf le $i^{\text{ème}}$ (Table 1.1).

-les résidus dédiés : le résidu r_i est sensible à l'unique défaut f_i (Table 1.2).



• **Des résidus de directions privilégiées.** En présence d'un type particulier de défaut, une seule direction du vecteur résidu sera alors affectée (et non pas un plan comme pour les résidus structurés).

1.9.1. Obtention des tables de signatures

Pour aboutir aux tables de signatures précédentes, il y a plusieurs manières de procéder. L'objectif, quelle que soit la table de signature considérée, est de construire un certain nombre de résidus, chacun réagissant (signature élémentaire égale à 1) à un sous ensemble particulier de défauts (détection) et étant découplé (signature élémentaire égale à 0) des autres défauts, ainsi que des incertitudes de modélisation (robustesse).

Résidus	Défauts		
	f_1	f_2	f_3
r_1	0	1	1
r_2	1	0	1
r_3	1	1	0

Table 1.1. Résidus généralisés

Résidus	Défauts		
	f_1	f_2	f_3
r_1	1	0	0
r_2	0	1	0
r_3	0	0	1

Table 1.2. Résidus dédiés

1.10. Méthodes de diagnostic

On distingue les méthodes dites à base de modèle analytique et les méthodes sans modèles (dites à base de signal ou sans modèle a priori). Les méthodes sans modèles, ne disposant pas de modèles opératoires. Les performances des méthodes à base de modèles dépendent fortement du modèle utilisé. Une fois ce dernier généré, les indicateurs de défaillances peuvent être déduits à partir du modèle mathématique en mode défaillant et normal.

Sans modèles	À base de modèles	
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Méthode de seuillage:</u> La comparaison entre le signal fourni et la valeur limite révèle la présence d'une anomalie. 	<p><u>Quantitatifs</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Méthode d'espace de parité:</u> Relation algébrique liant 	<p><u>Qualitatifs</u></p> <p>Etude du système à</p>



<ul style="list-style-type: none"> • <u>Méthodes statistiques:</u> L'étude de l'évolution de la moyenne ou de la variance du signal favorise la détection d'une anomalie. • <u>La reconnaissance des formes:</u> Se déroule en 3 phases: <ol style="list-style-type: none"> 1. Phase d'analyse; 2. Phase de choix d'une méthode de décision; 3. Phase d'exploitation. • <u>Systemes experts:</u> Sont à base de règles établissant des associations empiriques effets/causes. 	<p>l'entrée et la sortie en éliminant les autres variables.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Estimation paramétrique:</u> Mesure l'influence des défauts sur les paramètres et non pas sur les variables du système. • <u>Méthode à base d'observateur:</u> Détecter un défaut en comparant la sortie et celle mesurée 	<p>travers des modèles symboliques. Bond Graphs par exemple</p>
--	---	---

On s'intéresse aux méthodes de diagnostic fondées sur l'utilisation d'un modèle analytique (équations d'état et matrices de transfert) décrivant le comportement dynamique du système surveillé.

1.11. Méthodes de diagnostic à base de modèles

En général les méthodes de détection et diagnostic sont classifiées de la façon suivante :

- les méthodes à base de modèles quantitatifs telles que la redondance analytique, l'espace de parité, l'estimation d'état ou l'utilisation de filtre.
- les méthodes à base de modèles qualitatifs telles que les méthodes causales : digraphes ou arbre de défaillance qui sont des méthodes par modélisation fonctionnelle.

Les méthodes de diagnostic des défauts utilisées dans le milieu industriel sont très variées. Leur principe général repose sur une comparaison entre les données observées au cours du fonctionnement du système et les connaissances acquises sur son comportement normal et ses comportements de défaillance. Selon le type du modèle (qualitatif et/ou quantitatif), on peut distinguer deux branches de méthodes : les méthodes quantitatives issues de la communauté FDI (Fault Detection and Identification) et les méthodes qualitatives issues des communautés SED. Dans la suite, nous proposons une classification des approches à base de modèles.

Ces méthodes reposent sur une comparaison du comportement du système avec le comportement du modèle quantitatif (mathématique) établi .

On peut distinguer les méthodes quantitatives issues de la communauté FDI (Fault Detection and Isolation). Cette approche fait intervenir les techniques de génération de résidus, de détection et de localisation. Cette approche est schématisée sur la figure 1.13 .

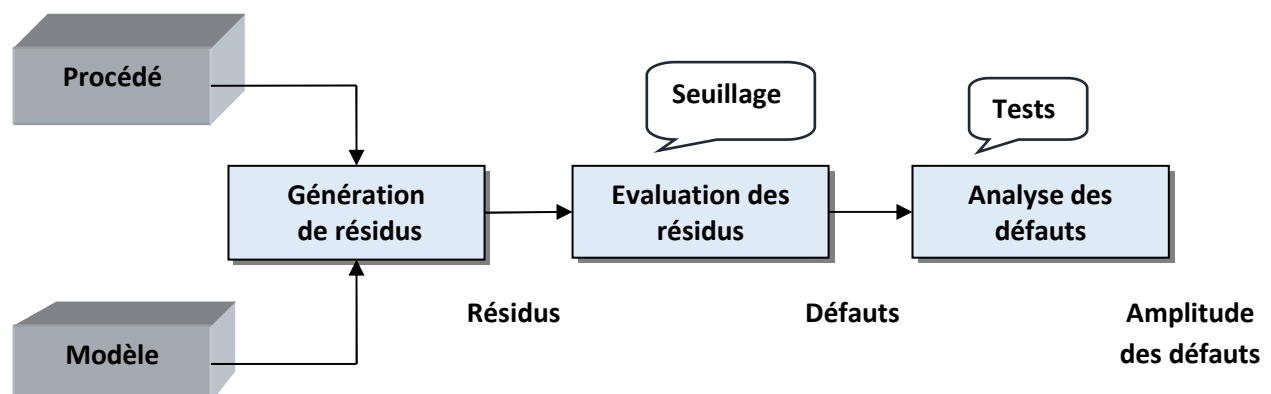


Figure1.13. La démarche FDI

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 connues, 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.

Franka distingue trois approches pour la génération de résidus:

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

Dans notre cas nous sommes intéressés aux méthodes à base observateur.

1.10.1. Approches à base d'observateurs d'états

Cette partie propose une stratégie de diagnostic à base d'observateur qui est le plus couramment utilisé. Dans la recherche d'observateurs linéaires, en temps continu ou discret, à entrées inconnues a suscité ces dernières années une abondante littérature, en raison d'applications potentielles dans divers domaines, comme le diagnostic. On rappelle ci-dessous quelques-uns des articles les plus marquants.

Des observateurs dédiés au diagnostic ont été étudiés dans la littérature (observateurs à entrées inconnues). Ils ont démontré leur intérêt pour une détection et une localisation de défaut au niveau macroscopique dès lors que les défauts et perturbations peuvent être représentés. On étudie ce que ces observateurs permettent d'obtenir dans le cas de défauts actionneurs ou capteurs dans des systèmes hydrauliques.

L'idée originale de diagnostic par observateurs provient probablement de R.V.Beard [**Beard 1971**]. Cette méthode se base sur la reconstruction de la sortie du processus à l'aide d'observateurs, de la comparer avec la sortie mesurée, puis à utiliser l'écart entre ces deux fonctions comme résidu.

L'idée principale des méthodes de génération du vecteur de résidus r à base d'observateurs est d'estimer une partie ou l'ensemble des mesures du système surveillé à partir des grandeurs mesurables. r est alors généré en formant la différence (éventuellement filtrée) entre les sorties estimées et les sorties réelles.

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (1-14)$$



L'observateur revient finalement à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie. Ce principe est illustré sur la figure(1.13).

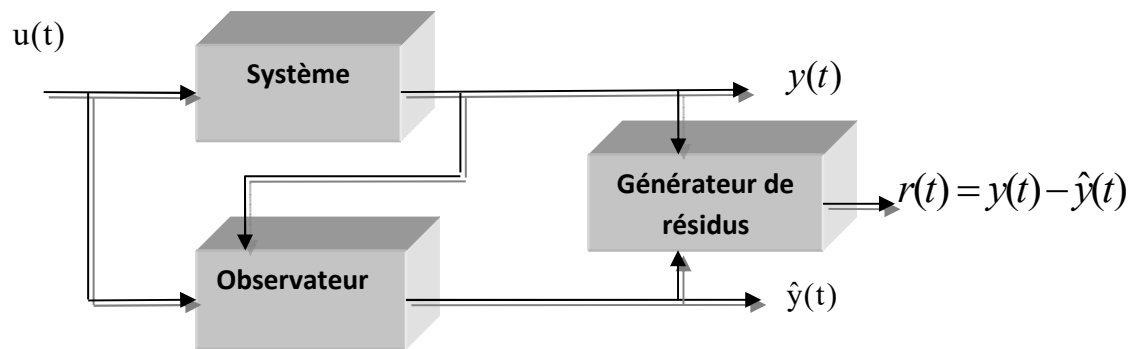


Figure1 .13. Schéma fonctionnel d'un générateur de résidus à base observateur

Par la suite, une stratégie de localisation à base un banc d'observateurs est présenté.

1.11. Les avantages des méthodes de diagnostic à base de modèles

Les approches à base de modèles s'appuient sur des modèles comportementaux explicites du système soumis au diagnostic. Un grand avantage de ces approches par rapport aux approches relationnelles et de traitement de données, réside sur le fait que seule l'information du comportement normal du procédé est prise en compte par l'intermédiaire d'un modèle de référence. La précision du modèle, liée aux besoins de la surveillance et aux critères de performance du diagnostic, définit le choix de l'utilisation de modèles quantitatifs.

Avantages

- Applicable aux systèmes linaires et non linéaires
- Méthodes très répandues
- Calcul simple
- Possibilité de découpler les réponses des entrées inconnues
- Méthode plus robuste aux bruits de mesures
- La connaissance sur le système est découplée de la connaissance de diagnostic
- Il s'agit de connaissance de conception plutôt que d'exploitation
- Les fautes et les symptômes ne doivent pas être anticipés
- Le coût de développement et de maintenance est faible
- Les modèles fournissent un support adéquat pour l'explication (structure du système explicitement représentée).

Inconvénients

- Nécessité d'avoir un modèle précis et complet
- Mal adaptée au processus complexe
- Erreur de diagnostic due aux perturbations
- Pas de garantie de détection si le type de défaut n'a pas été modélisé
- Adaptabilité difficile aux changements de processus et manque de méthode générale dû au caractère
- local du modèle (appliqué au système étudié).

1.12. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter le principe et de rappeler des notions autour du diagnostic et de la surveillance, pour ouvrir une piste vers le diagnostic à base de modèle, et de fixer le contexte dans lequel nous nous sommes placés afin d'élaborer notre système de détection et de localisation de défauts basé sur les observateurs. Nous avons commencé par préciser certains nombres de notions fondamentales ainsi que les principes d'un système de diagnostic à base de modèles analytiques, les méthodes usuelles de diagnostic et les méthodes de diagnostic à base de modèle. Notre approche de diagnostic repose sur l'utilisation des observateurs. La réalisation d'un système de surveillance à base de modèle est une opération coûteuse nécessitant plusieurs étapes complexes. L'outil capteur logiciel (observateur), par ses propriétés est bien adapté pour la conception de tels systèmes. Enfin cet outil, a permis la mise en place d'un outil logiciel pour l'automatisation des procédures diminuant le coût de la conception des systèmes de surveillance. Les avantages et les inconvénients ont été bien illustrés à la fin du chapitre.



CHAPITRE 2 : GENERATION DES RESIDUS A BASE D'OBSERVATEUR (Observateur proportionnel)

2.1. Introduction

Le problème de l'estimation d'état d'un système est d'une importance pratique considérable, que ce soit pour la mise en œuvre d'une loi de commande ou pour l'élaboration d'une stratégie de diagnostic. La reconstruction de la sortie du procédé à partir des observations issus des capteurs puis comparer cette estimation à la valeur réelle de cette sortie. Le principe de base de la génération de résidus à l'aide d'observateurs est de réaliser une estimation des sorties du système à partir des grandeurs accessibles à la mesure (les entrées et les sorties du système).

2.2. Définition du vecteur résidu

Le vecteur résidu est alors construit comme l'écart entre la sortie estimée et la sortie mesurée, c'est à dire à l'aide de l'erreur d'estimation sur la sortie.

2.3. Définition d'un observateur

Un observateur d'état, appelé aussi reconstituteur d'état ou estimateur est un système dynamique ayant comme entrées, les entrées et les sorties du processus réel, et dont la sortie est une estimation de l'état du système si l'on souhaite faire de la commande, ou le vecteur des résidus si l'on souhaite faire du diagnostic [Husson et al. 2007], [Ragot et Maquin, 2000].

Le principe général d'un observateur est présenté à la figure ci-dessous.

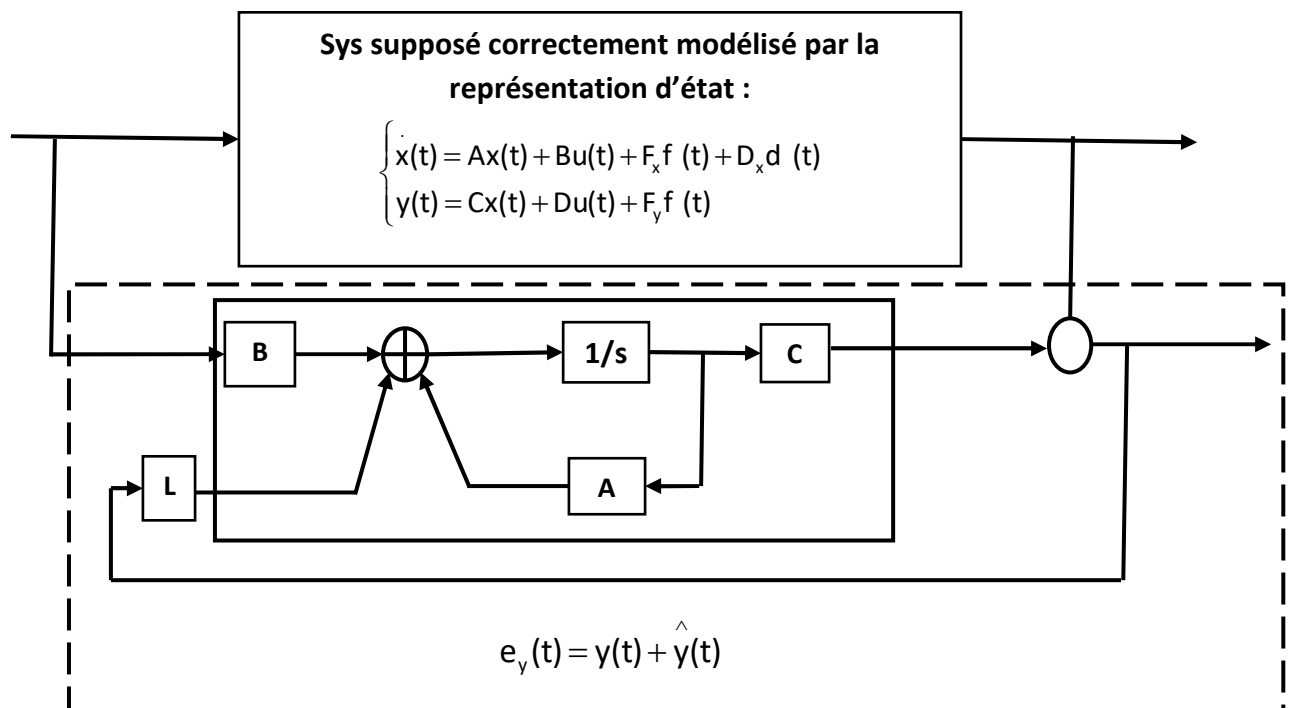


Figure 2.1. Principe de la génération de résidus à l'aide d'observateur

2.4. Le modèle utilisé pour la synthèse d'un générateur de résidus

Le modèle d'état d'un système dynamique linéaire continu s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \\ x(t) \in \mathbb{R}^N, u(t) \in \mathbb{R}^m, y(t) \in \mathbb{R}^p \end{cases} \quad (2-1)$$

X: représente le vecteur d'état, u: le vecteur de commande, y :le vecteur de sortie, D sera supposée nulle.

La génération des résidus est difficile quand le modèle mathématique du système est imparfait, ce qui est toujours le cas en pratique.

En effet le modèle (2-1) ne prend en compte, ni les incertitudes de modélisation, ni les différents perturbations. Cela nécessite une certaine robustesse du générateur de résidus par rapport à ces différentes incertitudes.

1. Une hypothèse très courante est de considérer des incertitudes comme des entrées perturbatrices (entrées inconnues) agissant de manière additive sur la dynamique de l'état et les sorties.
2. On dispose d'un modèle faisant apparaître l'effet des défauts $f(t)$ sur le comportement du système nominal.
3. L'influence des défauts sur le comportement du système peut être modélisée comme une perturbation agissant de manière additive.

➤ Le système supposé correctement modélisé en compte des incertitudes et des défauts comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_y f(t) \\ x(t) \in \mathbb{R}^N, u(t) \in \mathbb{R}^m, y(t) \in \mathbb{R}^p, d(t) \in \mathbb{R}^p, f(t) \in \mathbb{R}^{nf} \end{cases} \quad (2-2)$$

Où $d(t)$ est le vecteur de perturbations (vecteur des entrées inconnues)

D_x : la matrice d'application des entrées inconnues sur l'état supposé connu et de rang plein colonne.

F_x, F_y : sont les matrices d'action des défauts $f(t)$ à détecter.

Où F_x : défaut actionneur.

F_y : défaut capteur.

2.5. Générateur de résidus (observateur proportionnel) :

Le reconstruteur d'état, utilisé en tant que générateur de résidus $r_y(t)$, est alors le suivant :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)), \hat{x}(0) = \hat{x}_0 \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \\ r_y(t) = e_y(t) = y - \hat{y}(t) \end{cases} \quad (2-3)$$

La matrice L (gain de l'observateur) est calculée de façon que l'estimation tend vers l'état $x(t)$ du système quand t tend vers l'infini, \forall les états initiaux $x(0)$ et $\hat{x}(0)$.

➤ La dynamique de l'erreur d'estimation :

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

$$\text{avec } \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t)$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t))$$

$$\dot{e}_x(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) - A\hat{x}(t) - Bu(t) - Ly(t) + L\hat{y}(t)$$

OR

$$y(t) = cx(t) + F_y f(t)$$

$$\hat{y}(t) = c\hat{x}(t)$$

D'où finalement :

$$\dot{e}_x(t) = (A - LC)e_x(t) + (F_x - LF_y)f(t) + D_x d(t)$$

En l'absence de défaut ($f(t)=0$) et en négligeant l'effet des entrées inconnues ($d(t)=0$) l'erreur d'estimation devient :

On veut que $\lim_{t \rightarrow \infty} e_x(t) = 0$, ceci est le cas en calculant L tq la matrice (A-LC) soit une matrice Hurwitz.

Remarque :

Les valeurs propres de l'observateur sont généralement choisies plus grandes, en module que les pôles du système de façon à imposer une dynamique d'observation plus rapide que celle du système.

- La question qui se pose alors est de savoir à quelle condition la manière L va permettre de modifier arbitrairement les n valeurs propres (A-LC)

Théorème :

Si la paire (A, C) est observable, on peut choisir une matrice de gain L pour placer arbitrairement les n valeurs propres de (A-LC) en conséquence, l'état d'un système observable, tq le système (2-1) peut être estimé à l'aide de l'observateur.

Rappel :

Les valeurs propres de A-LC sont les racines du polynôme caractéristique $[(\lambda I - A) - LC]$ de l'observateur, c'est-à-dire les racines de $\det[SI - (\lambda I - A) - LC]$.

Définition :

Une matrice A est appelée matrice de Hurwitz si toutes les valeurs propres de A ont une partie réelle strictement négative.

$R[\lambda_i] < 0$, exemple : $A = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}$

2.6. Matrice de transfert :

Intéressons-nous maintenant à la matrice de transfert reliant les diverses entrées à l'erreur d'estimation d'état.

La transformée de Laplace de l'expression $\dot{e}_x(t)$

$\dot{e}_x(t) = (A - LC)e_x(t) + (F_x - LF_y)f(t) + D_x d(t)$ S'écrit (les conditions étant nulles par définition) :

$se_x(s) = (A - LC)e_x(s) + (F_x - LF_y)f(s) + D_x d(s)$

D'où l'expression de l'erreur d'estimation d'état :

$e_x(s) = [SI - (A - LC)]^{-1} (F_x - LF_y)f(s) + [SI - (A - LC)]^{-1} D_x d(s)$ (2-4)

Notons que cette erreur est sensible aux défauts f(s) et pourrait donc être utilisée pour générer un vecteur indicateur de défauts toutefois, l'état étant inconnu, cet écart ne peut être exploité directement.

Considérons alors l'erreur d'estimation en sortie $e_y(s)$, elle s'écrit :

$$\begin{aligned}
 e_y(s) &= y(s) - \hat{y}(s) \\
 &= Cx(s) + F_y f(s) - C\hat{x}(s) \\
 &= C(x(s) - \hat{x}(s)) + F_y f(s) \\
 e_y(s) &= C e_x(s) + F_y f(s)
 \end{aligned}$$

En reportant dans $e_y(s)$ l'expression de $e_x(s)$ donnée par la relation (2-4) on obtient :

$$\begin{cases}
 e_y(s) = G_f(s)f(s) + G_d(s)d(s) \\
 G_f(s) = C[SI - (A - LC)]^{-1} (Fx - LF_y) + F_y \\
 G_d(s) = C[SI - (A - LC)]^{-1} D_x
 \end{cases} \quad (2-5)$$

G_f , G_d : les matrices de transfert reliant les résidus respectivement aux défauts et aux entrées inconnues.

On peut constater que cette erreur d'estimation est sensible aux défauts $f(s)$, mais également aux entrées inconnues $d(s)$, il est dès lors possible d'exploiter cet écart pour engendrer un ensemble de signaux sensibles aux défauts, appelés vecteur des résidus.

Soit $Q(s)$ une matrice de transfert stable et propre et générant un vecteur résidu tel que :

$$r(s) = Q(s)e_y(s) \text{ soit aussi : } r(s) = Q(s)G_f(s)f(s) + Q(s)G_d(s)d(s). \quad (2-6)$$

Dans ces conditions, si l'on peut trouver une matrice de paramétrisation $Q(s)$ telle que les deux relations suivantes soient vérifiées :

$$Q(s)G_f(s) \neq 0, Q(s)G_d(s) = 0 \quad (2-7)$$

On obtiendra un vecteur des résidus $r(s)$ insensible aux perturbations $d(s)$ et sensible aux défauts $f(s)$. Dans le cas où l'influence des perturbations est négligeable sur l'évolution des résidus, la matrice $Q(s)$ peut être entièrement utilisée pour faciliter la localisation des défauts, on parle alors de structuration des résidus.

2.7. Analyse par table de signatures

Autrement dit la signature théorique d'un défaut peut être envisagée comme les résultats de détection lorsque tous les tests sensibles au défaut réagissent. Les tests de cohérence, en utilisant des techniques de détection pour les systèmes dynamiques (par exemple observateur à entrées inconnues).



En effet la plupart du temps, les valeurs des résidus sont à chaque instant, comparées à des seuils qui sont calculé théoriquement ou empiriquement. Les tests peuvent être réalisés en parallèle et chaque décision issue de ces tests conduit à une valeur booléenne (0 : la valeur du résidu est en dessous du seuil ; 1 : la valeur du résidu a dépassé le seuil fixé). L'ensemble de ces valeurs booléennes forme un vecteur binaire appelé *Signature de défaut*. Cette comparaison conduit alors à une conclusion sur l'état du système : fonctionnement normal, défaillance identifiée ou finalement défaillance non identifiée.

Ensuite, une table de signatures théoriques générées par l'ensemble des signaux r_{ij} définis par :

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le residu est sensible au défaut } f_i \\ 0 & \text{si le residu est insensible au défaut } f_i \end{cases}$$

La localisation qui suit la détection peut être effectuée à l'aide de la table de signature. Les colonnes de cette table (table 3-2, 3-3, 3-4) sont représentatives des différents défauts et les lignes des différents résidus. Les ensembles des diagnostics dans l'approche FDI sont donnés en termes de défauts présents dans la table de signature. La génération des ensembles de diagnostic est basée sur une interprétation des colonnes de la table de signature et consiste à comparer la signature des observations avec celle des défauts.

Pour que tous les défauts puissent être détectés, aucune colonne de la matrice des signatures théoriques de défauts ne doit être nulle, et pour que tous les défauts puissent être localisés, toutes les signatures théoriques doivent être distinctes sans l'hypothèse d'exonération. Ils existent trois types de matrices de signatures.

- Non localisante (une colonne est nulle ou au moins deux colonnes sont identiques).
- Faiblement localisante (les colonnes sont non nulles et distinctes deux à deux).
- Fortement localisante (en plus d'être faiblement localisante, aucune colonne ne peut être obtenue à partir d'une autre en remplaçant un '1' par un '0').

	f_1	f_2	f_3
r_1	1	1	1
r_2	1	1	1
r_3	1	0	0

Table.2.2 .Table de

	f_1	f_2	f_3
r_1	1	1	1
r_2	1	0	1
r_3	1	1	0

Table.2.3. Table de signature faiblement

	f_1	f_2	f_3
r_1	1	1	0
r_2	1	0	1
r_3	0	1	1

Table.2.4.Table de signature

signature non localisante

localisante

fortement localisante

Une table non localisante ne permet pas de distinguer certains défauts entre eux. Une table faiblement localisante permet de localiser les défauts uniques sous hypothèse d'exonération. Une table fortement localisante garantie que les différentes sensibilités des résidus par rapport aux défauts ne conduisent pas à un diagnostic erroné [Tahraoui 2017].

2.8. Exemple illustratif

Soit le système d'écrit par la représentation d'état suivante [Toscano 2011]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_1 \\ \dot{\mathbf{X}}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} -10 & -1 \\ 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{U} \quad .. \\ \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{c1} \\ \mathbf{f}_{c2} \end{bmatrix}$$

On suppose que le système soumis à deux défauts capteurs $\mathbf{f}_{c1}, \mathbf{f}_{c2}$.

Afin de simplifier la synthèse de l'observateur proportionnel donnée par la structure (3), choisissons une matrice L diagonale d'éléments l_1, l_2 . En effet, le système étant de degré deux, deux paramètres de réglage sont suffisants pour réaliser le placement de pôles de reconstruteur ou le générateur de résidus.

Le polynôme caractéristique s'écrit alors :

$$\mathbf{p}_{obs}(s) = \det[\mathbf{S}\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})] \\ \begin{vmatrix} s + 10 + l_1 & 1 \\ -2 & s + 1 + l_2 \end{vmatrix} = s^2 + (11 + l_1 + l_2)s + 12 + l_1 + 10l_2 + l_1l_2$$

Ajustons les paramètres l_1 et l_2 de manière à obtenir le polynôme suivant $(s + 20)^2 = s^2 + 40s + 400$, on obtient ainsi les deux solutions suivantes

$$l_1 = 10 \pm \sqrt{2} \quad \text{et} \quad l_2 = 19 \mp \sqrt{2}, \quad \text{en adoptant} \quad l_1 = 10 + \sqrt{2} \quad \text{et} \quad l_2 = 19 - \sqrt{2}$$

L'observateur s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20 - \sqrt{2} & -1 \\ 2 & -20 + \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 & 10 + \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 19 - \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20 - \sqrt{2} & -1 \\ 2 & -20 + \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}$$

La matrice de transfert entre le vecteur des défauts et l'erreur e_y s'écrit

$$e_y(s) = \frac{1}{s^2 + 40s + 400} \begin{bmatrix} s^2 + (30 - \sqrt{2})s + 202 - 10\sqrt{2} & 19 - \sqrt{2} \\ 20 - 2\sqrt{2} & s^2 + (21 + \sqrt{2})s + 22 + \sqrt{2} \end{bmatrix} f(s)$$

La table de signature associée à cette matrice s'écrit donc :

	f ₁	f ₂
r ₁	1	1
r ₂	1	1

Table des signatures associée à $G_f(s)$

Où e_{y1} et e_{y2} sont les composantes du vecteur e_y . les erreurs e_{y1} et e_{y2} sont sensibles aux défauts f_1, f_2 mais la structure obtenue n'est pas localisante (signature identique pour f_1 et f_2).



CHAPITRE3: GENERATION DES RESIDUS A BASE D'OBSERVATEUR A ENTREES INCONNUES AVEC DECOUPLAGE PARFAIT

3.1. Introduction

On présente dans ce chapitre la méthode de génération de résidus à base observateur à entrées inconnues avec découplage parfait.

Le but de génération de résidu en présence d'entrées inconnues est la théorie d'observateur à entrées inconnues UIO avec découplage parfait. Cette théorie qui consiste à rendre l'erreur d'estimation indépendance des perturbations non mesurables[Toscano 2011].

3.2. Description mathématique du système à surveiller

Cette section décrit la description mathématique à base d'espace d'état du système à surveiller en utilisant un générateur de résidu.

- **3.2.1. Système en présence des défauts actionneurs:**

Un modèle mathématique du système contrôlé, permettant la prise en compte des incertitudes et avec additifs défauts d'actionneur est décrit par le modèle d'espace d'état suivant:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) = Cx(t) + D(t) \end{cases} \quad (3-1)$$

où $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^r$ et $y \in \mathbb{R}^m$ ainsi que A, B, C, D sont définis comme étant identiques à dans (3-1).

$f \in \mathbb{R}^l$ représente un vecteur de défauts d'actionnement variant dans le temps. Les colonnes de la matrice $F_x \in \mathbb{R}^{n \times l}$ désignent la distribution des défauts actionneurs indépendants.

- **3.2.2. Systèmes en présence des défauts capteurs:**

Un modèle mathématique du système contrôlé, permettant la prise en compte des incertitudes et avec additifs défauts capteurs est décrit par le modèle d'espace d'état suivant:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D_x d(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_y f(t) \end{cases} \quad (3-2)$$

où $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^r$ et $y \in \mathbb{R}^m$ ainsi que A, B, C, D sont définis comme étant identiques à dans (3-1).

$f \in \mathbb{R}^l$ représente un vecteur de défauts d'actionnement variant dans le temps. Les colonnes de la matrice $F_y \in \mathbb{R}^{m \times l}$ désigne la distribution des défauts capteur indépendant .

• **3.2.3. Systèmes en présence des défauts de capteurs et des défauts actionneurs**

Le système défectueux (3.3) et (3.4) peut être intégré dans une expression pour un système avec les deux défauts actionneurs et capteurs additifs. Toutefois, cela ne veut pas dire que les défauts actionneurs et des capteurs se produisent simultanément. L'expression intégrée est donné par:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_y f(t) \end{cases} \quad (3-3)$$

Une représentation d'entrée-sortie de matrice de transfert pour le système (3-5) est décrite comme:

$$y(s) = G_u(s) U(s) + G_f(s) f(s) + G_d(s) d(s) \quad (3-4)$$

Notons

G_u est une matrice de transfert multivariable ne dépendant que de s . Elle peut être écrite sous forme d'une factorisation première à gauche

G_f est une matrice de transfert de défauts multivariable connue.

G_d la matrice de transfert de perturbations connue.

Ou :

$$\begin{cases} G_u(s) = C(sI - A)^{-1}B \\ G_f(s) = C(sI - A)^{-1}F_x + F_y \\ G_d(s) = C(sI - A)^{-1}D_x \end{cases} \quad (3-5)$$

Le problème est alors de construire un dispositif appelé générateur de résidus (observateur), permettant d'élaborer, à partir des grandeurs d'entrées et de sorties mesuré sur le système, un vecteur d'indicateur de défauts ou vecteur des résidus , notés $r(t) \in \mathbb{R}^q$ tel que :

$$\begin{cases} r(t) \neq 0 \text{ si } f(t) \neq 0 \\ r(t) = 0 \text{ si } f(t) = 0 \end{cases} \quad (3-6)$$

3.3. Découplage parfait des entrées inconnues

Le découplage parfait consiste à annuler l'influence dans les résidus des incertitudes de modélisation, du moins en théorie. Un résidu obtenu à l'aide du découplage parfait est tel que la signature de ce résidu est équivalente à la matrice de transfert du résidu vis-à-vis des défauts et des incertitudes structurées, dans la mesure où à une signature élémentaire nulle correspond un transfert nul, et à une signature élémentaire non nulle, un transfert non nul.



Ou $d(t)$ est le vecteur des perturbations généralement dénommé le vecteur des entrées inconnues et $f(t)$ est le vecteur des défauts.

Exemple

	f_1	f_2	f_3	d
r	0	1	1	0

Table 3.1. Table de signature

$$\text{Transfert résidu : } [r(s)] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{s}{s+1} & \frac{1}{s+1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ d(s) \end{bmatrix}$$

On nommera structures robustes à découplage parfait, les structures pour lesquelles tous les résidus du schéma de FDI sont réalisés avec la technique du découplage parfait. En d'autres termes, aux 1 de la table des signatures correspondent des éléments de la matrice de transfert non nuls, et aux 0, des transferts nuls.

3.4. Synthèse d'Observateur à entrées inconnues UIO avec découplage parfait

Soit le système à surveiller, supposé correctement décrit par la représentation d'état suivant:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_y f(t) \end{cases} \quad (3-7)$$

Dans le cas où le vecteur des entrées inconnues agit sur le vecteur de sortie, il est possible avec une transformation linéaire, qui nous ramène à la structure d'observateur ci- dessus.

3.4.1. Structure de l'observateur

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Mz(t) + Nu(t) + Py(t) \\ \hat{x} = z(t) - L_y y(t) \end{cases} \quad (3-8)$$

Ou M, N, P, L_y sont des matrices inconnues de dimensions appropriées.

Le schéma de principe d'observateur d'entrées inconnues est illustré à la figure 3-1

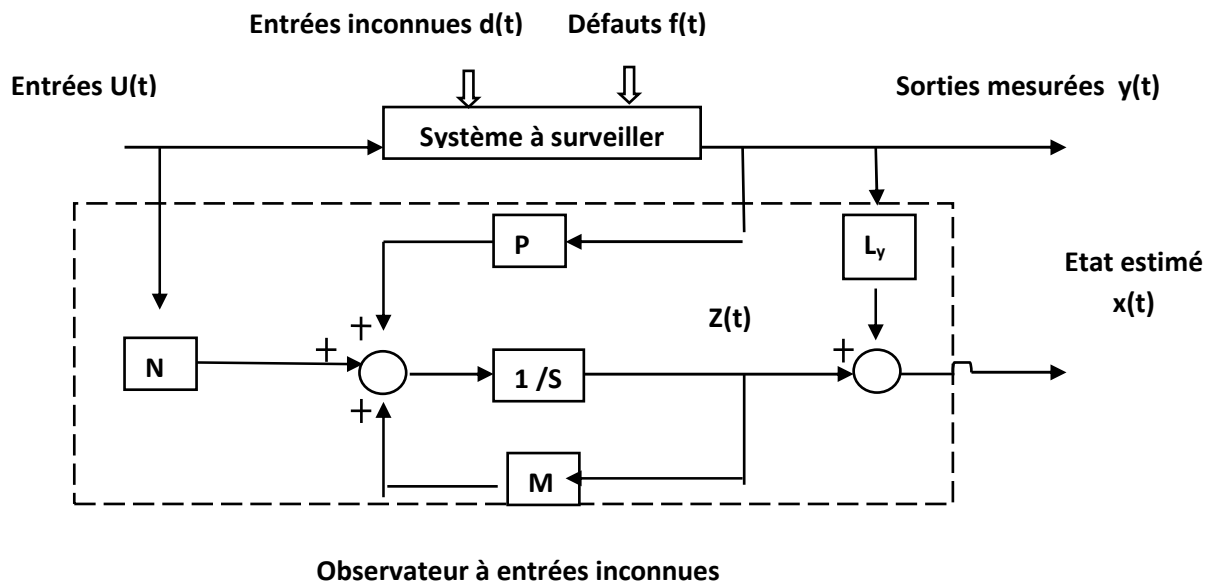


Figure 3.1. Schéma Bloc d'observateur à entrées inconnues avec découplage parfait

Ces matrices vont être déterminées de façon que l'estimé $\hat{x}(t)$ converge asymptotiquement vers l'état réel $x(t)$ du système, malgré l'influence des perturbations.

L'erreur de reconstitution d'état s'écrit

$$e_x(t) = \hat{x}(t) - x(t)$$

$$e_x(t) = z(t) - l_y y(t) - \hat{x}(t)$$

$$= z(t) - (I + L_y C)x(t) - L_y F_y f(t)$$

On posant $E = I + L_y C$ il vient:

$$e_x = z(t) - E x(t) - L_y F_y f(t) \dots \dots \dots (3-9)$$

Soit aussi :

$$z(t) = e_x(t) + E x(t) + l_y F_y f(t)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation d'état s'écrit alors:

$$\dot{e}_x(t) = \dot{z}(t) - E \dot{x}(t) - L_y F_y \dot{f}(t)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_x(t) = & M e_x(t) + (ME + PC - EA)x(t) + (N - EB)u(t) + (ML_y F_y + P F_y - E F_x)f(t) - \\ & L_y F_y \dot{f}(t) - E D_x d(t) \end{aligned} \quad (3-10)$$

3.5. Conditions d'existence et procédures pour la mise en œuvre du découplage parfait

Si les conditions suivantes sont remplies:

M est matrice hurwitz (stable)

$$ME + PC = EA$$

$$N = EB \quad (3-11)$$

$$ED_x = 0$$

$$ML_y F_y + P F_y + E F_x \neq 0$$

$$L_y F_y \neq 0$$

Remarque: l'erreur d'estimation devient indépendante de l'état de l'entrée de commande et des entrées inconnues donc elle est sensible aux défauts.

$$\dot{e}_x(t) = M e_x(t) + (ML_y F_y + P F_y - E F_x)f(t) - L_y F_y \dot{f}(t) \quad (3-12)$$

La solution de l'ensemble des équations (3-15) consiste en premier lieu à assurer la condition de découplage des entrées inconnues c'est-à-dire à satisfaire:

$$ED_x = 0 \text{ or } E = I + L_y C$$

$$(I + L_y C) D_x = 0 \rightarrow (L_y C) D_x = -D_x$$

Il s'agit donc de déterminer la matrice L_y telle que la relation ci-dessus soit satisfaite. Si l'inverse généralisée de CD_x , notée $(CD_x)^+$ existe L_y peut être calculée à l'aide de la relation suivante :

$$L_y = -D_x (CD_x)^+ \text{ avec } (CD_x)^+ = [(CD_x)^T (CD_x)]^{-1} (CD_x)^T$$

La matrice L_y n'existe que si la matrice $(CD_x)^T (CD_x)$ est inversible. Cette matrice étant de dimension $(nd \times nd)$, cette matrice n'est inversible que si le rang de $(CD_x) = nd$, ou nd représente le nombre d'entrées inconnues.

Remarque :

Le découplage n'est possible que si le rang de la matrice (CD_x) égale aux nombres des entrées à découpler.

3.6. Algorithme de synthèse de l'observateur :

L'algorithme de synthèse de l'observateur peut être résumé comme suit :

- a) $\text{rang}(CD_x) = nd$ puis calculer $L_y = -D_x[(CD_x)^T(CD_x)]^{-1}(CD_x)^T$
- b) A partir de L_y calculer $E = I + L_y C$
- c) A partir de E calculer $N = EB$
- d) Imposer M soit une matrice Hurwitz, on peut à cet effet choisir pour M une matrice diagonale faisant apparaitre les valeurs propres désirés pour l'observateur.
- e) Calculer la matrice P telle que $PC = EA - ME$

3.7. Calcul théorique de résidu

Calculons après la matrice de transferts reliant les défauts à l'erreur d'estimation en sortie.

Posons :

$$F = ML_y F_y + PF_y - EF_x$$

$$F' = -l_y F_y$$

La transformée de Laplace de l'expression (3-16) s'écrit alors :

$$s e_x(s) = M e_x(s) + F f(s) + \hat{F} s f(s) \rightarrow e_x(s) = (sI - M)^{-1} (F + \hat{F}) f(s) \quad (3-13)$$

L'erreur d'estimation en sortie s'écrit :

$$e_y(s) = \hat{y}(s) - y(s) = C \hat{x}(s) - x(s) - F_y f(s) = C e_x(s) - F_y f(s)$$

En remplaçant $e_x(s)$ par son expression (3-17), on obtient:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_y(s) = [C(sI - M)^{-1}(F + s\hat{F}) - F_y] f(s) \\ F = ML_y F_y + PF_y - EF_x \\ \hat{F} = -l_y F_y \end{array} \right.$$

Soit $Q(s)$ une matrice de transfert stable et propre et générant un vecteur de résidus $r(s)$ tel que :

$$\text{Le vecteur de résidu est : } r(s) = Q(s) e_y(s) = Q(s) G_f(s) f(s)$$

La fonction de transfert de défaut est :

$$G_f(s) = C(sI - M)^{-1}(F + sF') - F_y$$

$Q(s)$ Permet de structurer les résidus afin de faciliter la localisation des défauts.

Exercices

Exercice 01 :

Soit un système décrit par la représentation d'état suivante:

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} -10 & -1 \\ 2 & -1 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \end{pmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} d(t)$$

Le système étant du second degré, deux paramètres de réglage suffisent pour réaliser le placement de pôles de l'observateur ; on choisit alors un pôle double à -20.

Calculer et structurer les résidus pour une bonne localisation des défauts capteurs présents aux sorties.

Exercice 02 :

Le modèle linéaire associé à la position verticale d'un pendule inversé s'écrit :

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 36 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} -0.42 \\ 0 \\ 0.14 \end{pmatrix}$$

$$y = \begin{pmatrix} x_m \\ \theta_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 2.8 & 0 & 0 \end{pmatrix} x$$

Où x_m et θ_m représentent respectivement la mesure de la position linéaire et la mesure de l'angle du pendule. La loi de commande pour la stabilisation à la verticale du pendule et l'asservissement de la position du vérin sont obtenus grâce à la loi de commande u . On ne considère que le problème de détection et de la localisation des défauts capteurs

1. Donner le modèle du système faisant apparaître les défauts intervenant au niveau des capteurs.
2. La synthèse de l'observateur utilisé donne le résultat suivant :

$$L = \begin{pmatrix} l_1 & l_2 \\ l_3 & l_4 \\ l_5 & l_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{36}{2.8} \\ 0 & \frac{360}{100.8} \\ 18 & 0 \end{pmatrix} \text{ gain de l'observateur}$$

Les résidus sont générés à partir des écarts entre les grandeurs mesurées et estimées. Calculer la matrice de transfert reliant les défauts capteurs aux résidus.

Les défauts sont-ils localisables ?

Exercice 03 :

On reste sur le modèle linéaire associé à la position verticale d'un pendule inversé ; on souhaite à présent, en plus des défauts capteurs, détecter un défaut d'actionneur.

1. Donner le modèle du système faisant apparaître les défauts à détecter.
2. Réaliser la synthèse d'un générateur de résidus permettant la détection et localisation des défauts.
3. On considère maintenant, en plus des défauts précédents, un défaut de modèle se traduisant par une variation de paramètre a . Donner le modèle du système faisant apparaître l'ensemble des défauts à détecter. En utilisant le même observateur, calculer la nouvelle matrice de transfert reliant les défauts capteurs aux résidus.

Les défauts sont-ils localisables ?

Exercice4 :

Soit un système décrit par la représentation d'état suivante :

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} -3 & -5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x(t)$$

Le système étant du second degré, deux paramètres de réglage suffisent pour réaliser le placement de pôles de l'observateur.

Calculer et structurer les résidus pour une bonne localisation des défauts actionneurs présents aux entrées.

1. Donnez le modèle d'état du système (écriture matricielle) faisant apparaître deux défauts actionneurs.
2. Donnez la matrice de transfert des défauts, on utilisant un observateur à gain L

avec

$$L = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}$$

3. Déduire la table de signatures, que vous pouvez remarquer

Exercice5 :

Soit un système décrit par la représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + Bu + D_x d + F_x f \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + F_y f \end{cases}$$

Avec :

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 100 & -10 & -1 \\ 0 & 2 & -1 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} F_a(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} d(t)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} F_c(t)$$

Il est affecté de défauts actionneurs, capteurs et d'une perturbation. Calculer et structurer les résidus pour une bonne localisation.

On a 2 défauts capteurs et un défaut actionneur et une présence d'une seule perturbation.

1- Donnez l'algorithme de synthèse de l'observateur à entrées inconnues avec découplage parfait de façon à donner la structure complète de cet observateur

On impose que M soit une matrice de Hurwitz(matrice stable). En choisissant N diagonale, et les valeurs propres comme suite.

$$\lambda_1 = -5; \lambda_2 = -6; \lambda_3 = -7$$

Donc M est:



$$M = \begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 0 \\ 0 & 0 & -7 \end{bmatrix}$$

- 2- Donnez la matrice de transfert des défauts.
- 3- Déduire la table de signatures, que vous pouvez remarquer
- 4 Les défauts $f(t)$ intervient sur à instants $t=1s$.
 - 4.1. Dans un fichier .m donner le programme qui permet la Synthèse d'observateur a entrée inconnue par découplage parfait.
 - 4.2. Dans un fichier Simulink :Etablir le schéma permettant d'obtenir le modèle mathématique du système avec la présence des deux défauts capteurs et actionneur et la présence des perturbations ?
 - 4.3 Etablir le schéma permettant d'obtenir le modèle mathématique de l'observateur ou le générateur de résidus?

Corrections

Exercice 01 :

L'équation caractéristique s'écrit :

$$EC = (p + 20)^2 = \det(pI - (A - KC)) = \begin{pmatrix} p + 10 + k_1 & 1 \\ -2 & p + 1 + k_2 \end{pmatrix}$$

On choisit alors :

$$k_1 = 10 + \sqrt{2}$$

$$k_2 = 19 - \sqrt{2}$$

L'observateur s'écrit :

$$\hat{\dot{x}} = \begin{pmatrix} -20 - \sqrt{2} & -1 \\ 2 & -20 - \sqrt{2} \end{pmatrix} \hat{x} + \begin{pmatrix} 10 & 10 + \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 19 - \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$$

$$\hat{y} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{x}$$

La matrice de transfert entre le vecteur des résidus et l'erreur e_y s'écrit alors :

$$e_y(s) = G_f(s)f(s) \quad d = 0$$

$$\begin{cases} e_y(s) = G_f f(s) + G_d d(s) \\ G_f(s) = C(sI - (A - LC))^{-1} (F_x - LF_y) + F_y \\ G_d(s) = C(sI - (A - LC))^{-1} D_x \end{cases}$$

La matrice de transfert entre le vecteur des défauts et l'erreur e_y s'écrit alors :

$$e_y(s) = \frac{1}{s^2 + 40s + 400} \begin{pmatrix} s^2 + (30 - \sqrt{2})s + 202 - 10\sqrt{2} & -19 + \sqrt{2} \\ 20 - 2\sqrt{2} & s^2 + (21 + \sqrt{2})s + 22 + \sqrt{2} \end{pmatrix} f(s)$$

La table de signature associée à cette matrice s'écrit :



	f_1	f_2
e_{y1}	1	1
e_{y2}	1	1

Les erreurs sont sensibles aux défauts mais la structure obtenue n'est pas localisante (signature identique des défauts).

On cherche alors une matrice $Q(s)$ telle que $Q(s)G_f(s)$ soit diagonale. Dans cet exercice $G_f(s)$ est inversible et son inverse est stable et propre, on peut prendre :

$$Q(s) = G_f^{-1}(s)$$

$$r(s) = Q(s)e_y(s) = G_f^{-1}G_f(s)f(s) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{c1} \\ f_{c2} \end{pmatrix}$$

La table de signature associée à cette matrice s'écrit :

	f_1	f_2
r_{y1}	1	0
r_{y2}	0	1

Exercice 02 :

1. Le modèle linéaire incluant les défauts capteurs s'écrit :

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

Avec :

$$f_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ et } f(t) = \begin{pmatrix} f_x \\ f_\theta \end{pmatrix}$$

2. Il s'agit de réaliser la synthèse de l'observateur suivant :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases}$$

$$L = \begin{pmatrix} l_1 & l_2 \\ l_3 & l_4 \\ l_5 & l_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{36}{2.8} \\ 0 & \frac{360}{100.8} \\ 18 & 0 \end{pmatrix}$$

Où **L** est la matrice de réglage de l'observateur permettant d'assurer, en absence de défaut, la convergence à zéro de l'erreur d'estimation. Le

2-La matrice de transfert reliant les défauts capteurs aux résidus s'écrit :

$$G_f(s) = -C[S I - (A - LC)]^{-1} L F_y + F_y$$

On obtient :

$$G_f(s) = \begin{pmatrix} \frac{s}{s+18} & 0 \\ 0 & \frac{s^2 + 36}{s^2 + 36s + 324} \end{pmatrix}$$

Chaque résidu n'est affecté que par un défaut. Les défauts sont donc détectés et localisés (table de signatures fortement localisante et structuré)

Exercice 03 :

1. Le modèle linéaire incluant les défauts capteurs et actionneurs s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_y f(t) \end{cases}$$

Avec :

$$F_x = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -b \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}; F_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } f(t) = \begin{pmatrix} f_x \\ f_\theta \\ f_u \end{pmatrix}$$

2. L'observateur utilisé a pour gain :

$$L = \begin{pmatrix} l_1 & l_2 \\ l_3 & l_4 \\ l_5 & l_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{36}{2.8} \\ 0 & \frac{360}{100.8} \\ 18 & 0 \end{pmatrix}$$

La matrice reliant les défauts aux résidus :

$$G_d(p) = C[pI - (A - LC)]^{-1}(D_a - LD_c) + D_a$$

S'écrit :

$$G_d(p) = \begin{pmatrix} \frac{p}{p+18} & 0 & \frac{1}{p+18} \\ 0 & \frac{p^2 - 36}{p^2 + 36 + 324} & \frac{-8.4p}{p^2 + 36 + 324} \end{pmatrix}$$

Les signatures sont distinctes les défauts sont localisables.

3. Le modèle du système faisant apparaitre l'ensemble des défauts :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_y f(t) \end{cases}$$

Avec :

$$F_x = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}; F_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

et .

$$f(t) = \begin{pmatrix} f_x \\ f_g \\ f_u \\ f_a \end{pmatrix}$$

La matrice reliant les défauts aux résidus :

$$G_d(p) = \begin{pmatrix} \frac{s}{s+18} & 0 & \frac{1}{s+18} & 0 \\ 0 & \frac{s^2 - 36}{s^2 + 36s + 324} & \frac{-8.4s}{s^2 + 36s + 324} & \frac{2.8s}{s^2 + 36s + 324} \end{pmatrix}$$



Exercice 04

Le modèle du système :

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} -3 & -5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x(t)$$

Avec $Fx = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

L'observateur s'écrit :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t))$$

$$\hat{y} = C\hat{x}$$

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

Avec $L = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}$

Donc le modèle d'observateur s'écrit :

$$\dot{\hat{x}}(t) = \begin{pmatrix} -3 & -5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{x}(t) + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix} (y(t) - \hat{y}(t))$$

$$\hat{y} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{x}$$

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

$$G_f(p) = C(pI - (A - LC))^{-1} (F_x - LF_y) + F_y$$

$$r(p) = \begin{pmatrix} \frac{s-3}{s^2-s-6} & \frac{-5}{s^2-s-6} \\ 0 & \frac{s+2}{s^2-s-6} \end{pmatrix} f(p)$$

La table de signature associée à cette matrice s'écrit :

	f_1	f_2
r1	1	1
r2	0	1

Table de signature faiblement localisante

Faiblement localisante (les colonnes sont non nulles et distinctes deux à deux).

Exercice 05

Algorithme :

1. Le rang de (CD_x) étant égal au nombre d'entrées inconnues(1) à découpler,

$$(CD_x) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$(rang CD_x) = 1$ égal au nombre d'entrées inconnues.

Il est possible de construire un générateur de résidus sensible aux défauts et insensible à la perturbation.

$$L_y = -D_x (CD_x)^+ = -D_x \left[(CD_x)^T (CD_x) \right]^{-1} (CD_x)^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$2- E = I + L_y C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$3- N = EB = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

En choisissant :

$$4- M = \text{diag}(-5 \quad -6 \quad -7)$$

Calculons le gain de l'observateur :

$$PC = EA - ME \rightarrow P = \begin{pmatrix} 5 & -1 & 0 \\ 100 & -4 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Le reconstituteur s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Mz(t) + Nu(t) + Py(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) - L_y y(t) \end{cases}$$

D'où :



$$\begin{cases} \dot{z}(t) = \begin{pmatrix} -5 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 0 \\ 0 & 0 & -7 \end{pmatrix} z(t) + \begin{pmatrix} 1 & 5 & -1 & 0 \\ 0 & 100 & -4 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \\ \hat{x}(t) = z(t) - L_y y(t) \end{cases}$$

On calcul à présent la matrice de transfert :

$$F = (ML_y + P)F_y - EF_x = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 0 & -4 & -1 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix}$$

$$F' = -L_y F_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2. Matrice de transfert s'écrit :

$$G_f(p) = C(pI - M)^{-1}(F + F') - F_y$$

Le vecteur résidu s'écrit alors :

$$r(s) = G_f(s)F(s) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{s+5} & -\frac{1}{s+5} & 0 \\ 0 & -\frac{s+10}{s+6} & -\frac{1}{s+6} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}$$

La dernière ligne n'est d'aucune utilité, elle résulte du découplage de la perturbation, restent les défauts, on prend alors : question quels défauts ? r3 est passé ou ?

3. La table de signature théorique :

On obtient :

$$r(s) = \begin{pmatrix} r_1(s) \\ r_2(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{p+5} & -\frac{1}{p+5} & 0 \\ 0 & -\frac{p+10}{p+6} & -\frac{1}{p+6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}$$



	F_1	F_2	F_3
R_1	1	1	0
R_2	0	1	1

La table de signature des défauts faiblement localisante :

Faiblement localisante (les colonnes sont non nulles et distinctes deux à deux)

4. Le but est de générer des résidus à base d'observateur à entrées inconnues d'un système à surveiller, et déduire la table de signature pour la localisation des défauts en vérifiant les résultats théorique en simulation.

1. le programme qui permet la Synthèse d'observateur a entrée inconnue par découplage parfait.

```
clc, clear all
A=[0 -1 0;
    100 -10 -1;
    0 2 -1];
```

```
B=[1 0 0]';
Fx=[1 0 0;
    0 0 0;
    0 0 0];
Dx=[0 0 1]';
C=[1 0 0;
    0 1 0;
    0 0 1];
Fy=[0 0 0;
    0 1 0;
    0 0 1];
```

```
range(C*Dx); %rang(C*Dx)=1 condition de découplage vérifiée
Ly=-Dx*([C*Dx]'*[C*Dx])*(C*Dx)'
E=eye(3,3)+Ly*C
N=E*B
M=[-5 0 0;
    0 -6 0;
    0 0 -7]
P=inv(C)*(E*A-M*E)
```

2-le générateur de résidus a la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = \begin{pmatrix} -5 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 0 \\ 0 & 0 & -7 \end{pmatrix} z(t) + \begin{pmatrix} 1 & 5 & -1 & 0 \\ 0 & 100 & -4 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \\ \hat{x}(t) = z(t) - L_y y(t) \end{cases}$$

1. Quelle est le nombre des résidus à générer et pour quoi?

Le nombre des résidus à générer est trois car on a trois défauts

Deux défauts capteurs et un défaut actionneur

2. Dans un fichier Simulink faites le schéma bloc du système à surveiller avec l'implémentation de l'observateur.

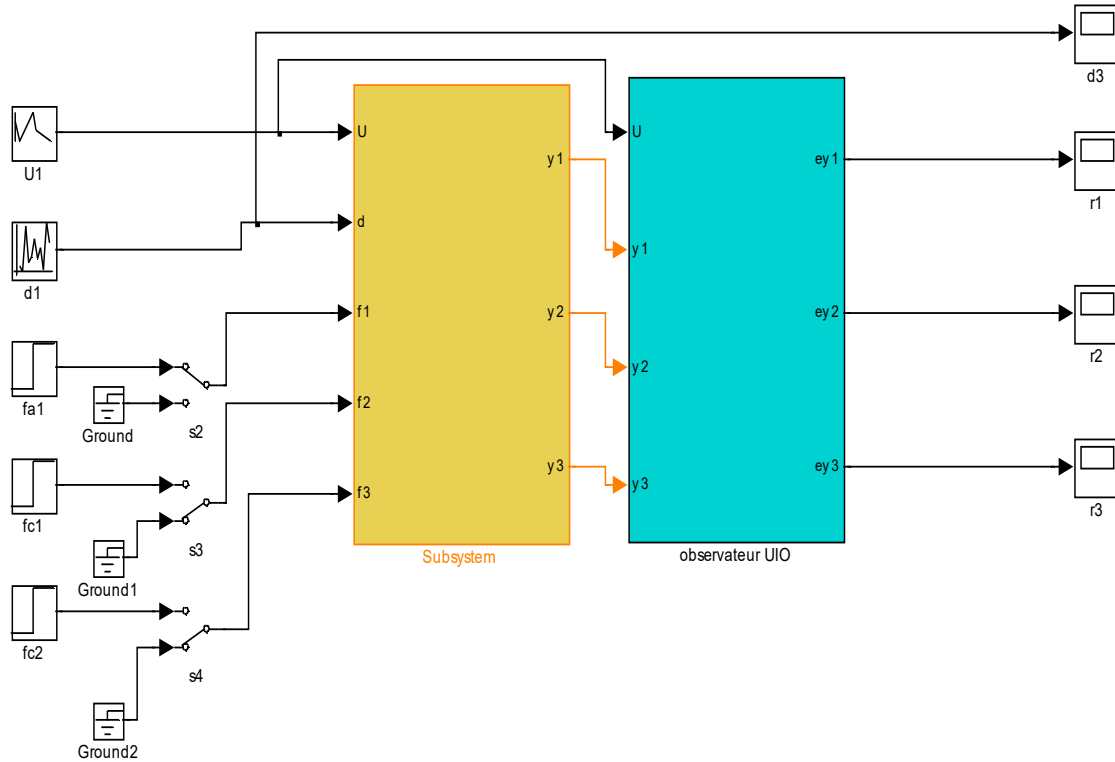


Figure.1.Schéma block du système a surveiller et l'observateur

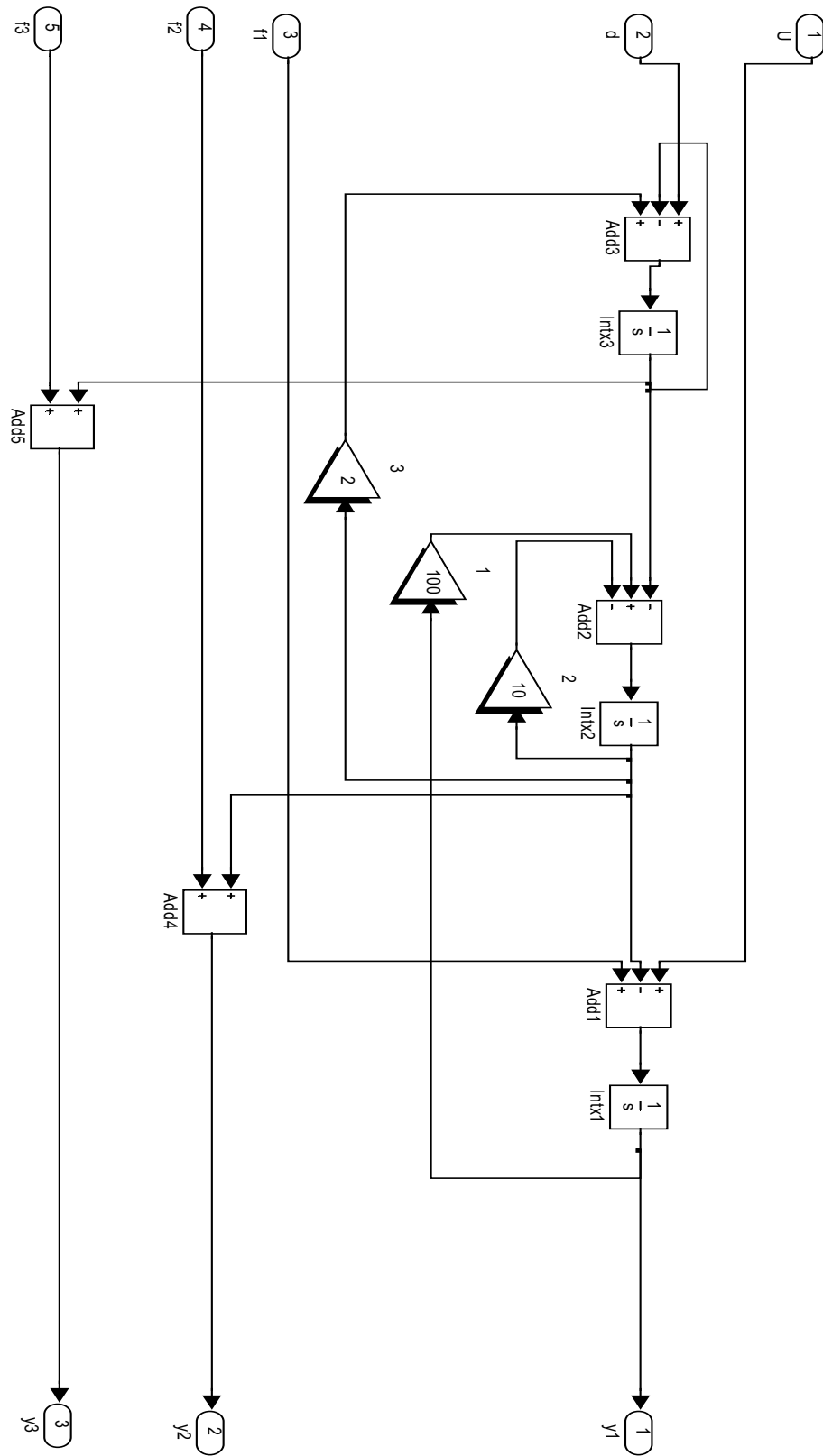


Figure.2.Schéma block du système à surveiller

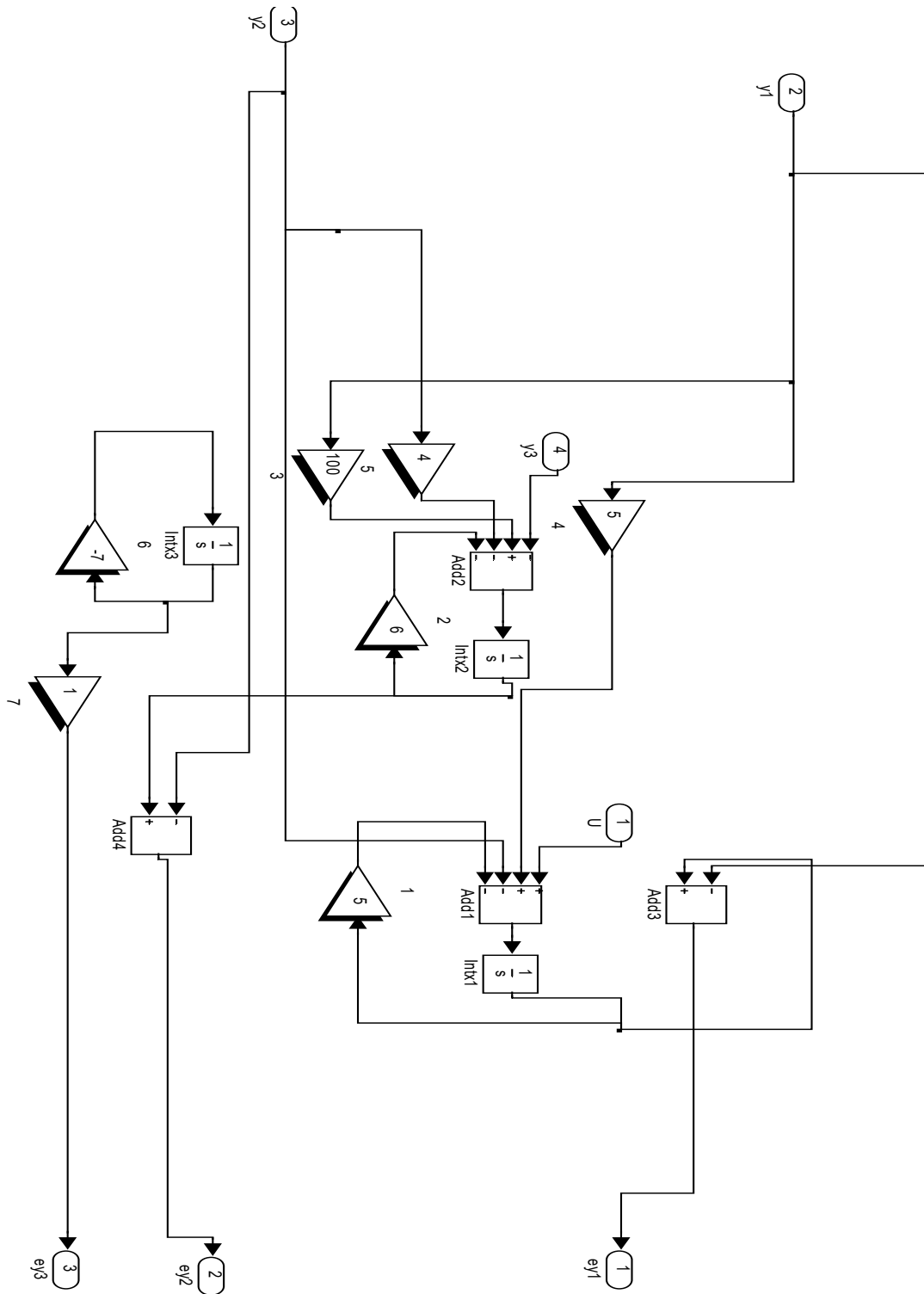


Figure.3.Schéma block de l'observateur

Interprétation des résultats obtenus pour chaque résidu

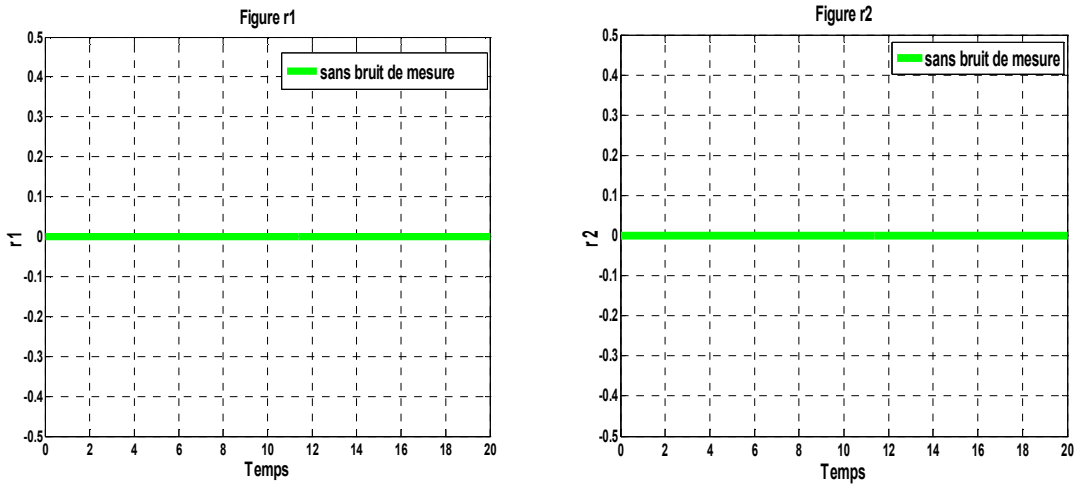


Figure 4: r_1 et r_2 avec perturbations et sans défaut :

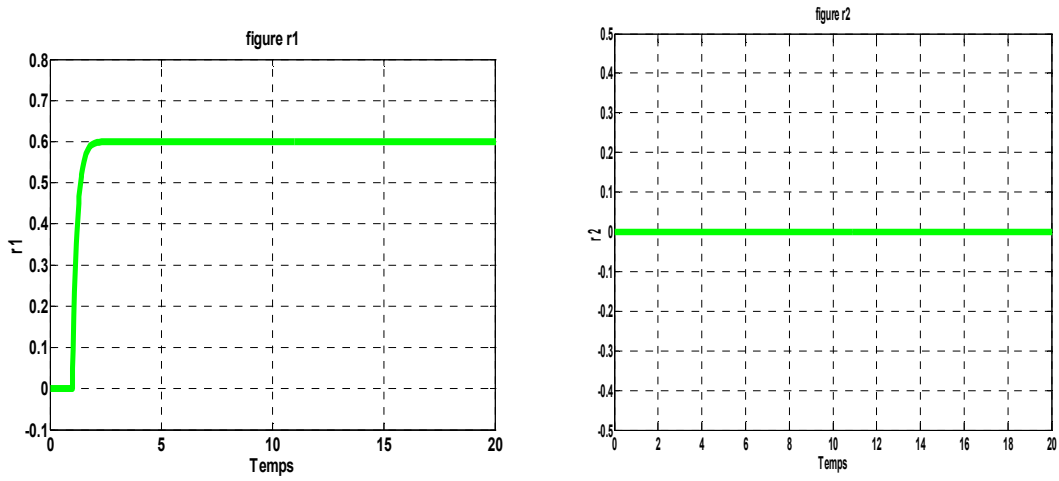


Figure .5. r_1 et r_2 avec perturbations et avec défaut f_{ac1} :

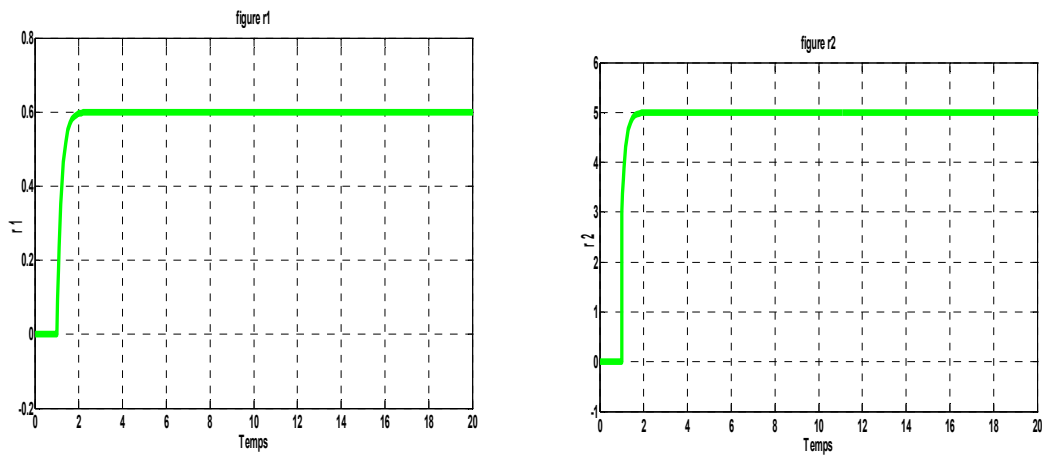


Figure .6. r_1 et r_2 avec perturbations et avec défaut f_{ac2} :

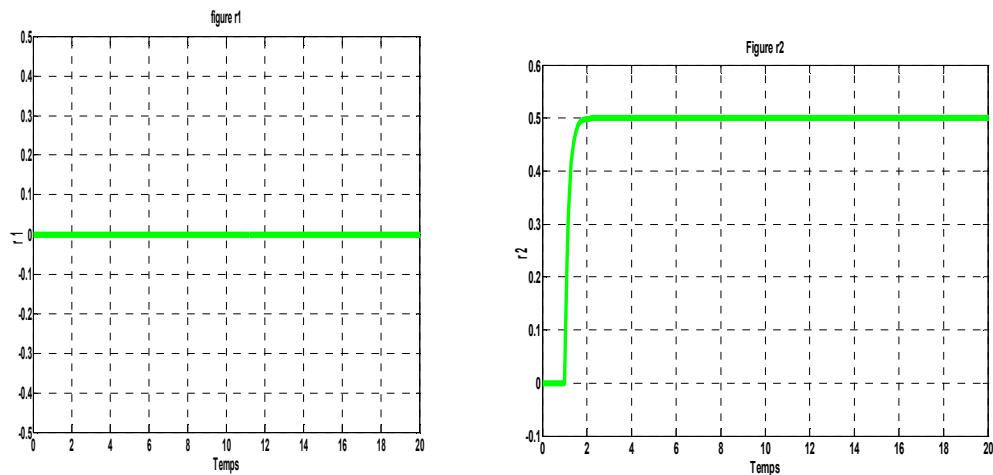


Figure.7. r_1 et r_2 avec perturbations et avec défaut f_{cap} :

En l'absence de défaut, les résidus sont statiquement nuls voir la figure (4) qui montre que les résidus sont parfaitement découplés des perturbations $d(t)$. En simulant successivement l'apparition d'un défaut, On remarque selon les résidus dans les figures (5), (6), (7) on a une table des signatures ci-dessous.

Les trois résidus sont sensibles aux défauts et nulle en fonctionnement normal

3. la table des signatures pratique pour les trois défauts est :

	f1	f2	f3
r1	0	1	1
r2	1	1	0
r3	0	0	0

Remarque Table de signatures faiblement localisante

Bibliographie

[**Beard, 1971**], R.V. Beard. «Failure Accommodation in Linear Systems Through Self Reorganization», PhD dissertation, MIT, Dep, Aero, Astro Cambridge, Février 1971.

[**Courtine 2006**], S. Courtine,«Détection et localisation de défauts dans les entraînements électriques», thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.

[**Husson et al. 2007**],R. Husson, C Lung, J. F. Aubry, J. Daafouz, D. Wolf, «Automatique (Du cahier des charges à la réalisation de systèmes)», Livre Dunod Edition, 2007.

[**Ragot et Maquin, 2000**],J. Ragot, D. Maquin, «Diagnostic des systèmes linéaires», Collection Pédagogique d'Automatique. Hermès Science Publications, Paris, 2000.

[**Tahraoui 2015**] **S.Tahraoui** «Diagnostic Des Systemes Dynamiques A Base D'observateurs A Entrees Inconnue»these de doctorat automatique,Decembre 2015

[**Toscano 2011**],Toscano, «Commande et diagnostic des systèmes dynamiques (Modélisation, Analyse, Commande par PID et par retour d'état, Diagnostic)» , Livre Ellipses Edition, 2011.

[**Tahraoui 2017**] S.Tahraoui«Diagnostic des systèmes dynamiques, Livre Edition européenne universitaire 2017

[**Beard, 1971**], R.V. Beard. «Failure Accommodation in Linear Systems Through Self Reorganization», PhD dissertation, MIT, Dep, Aero, Astro Cambridge, Février 1971.

[**Courtine 2006**], S. Courtine,«Détection et localisation de défauts dans les entraînements électriques», thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.