

CHAPITRE 2

LES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC

Sommaire

1	Introduction	13
2	Les méthodes qualitatives	13
3	Les méthodes quantitatives	14
3.1	Méthodes de traitement du signal	14
3.2	Méthodes d'automatique (redondance analytique)	14
3.2.1	Méthodes de diagnostic à base d'observateurs	15
3.2.2	Méthodes des équations de parité	15
3.2.3	Méthodes d'identification paramétrique	15
4	Diagnostic quantitatif par les méthodes d'automatique	15
4.1	Principe du diagnostic	15
4.2	Le modèle utilisé pour le générateur de résidus	16
4.3	Génération des résidus	18
4.4	Détection et localisation des défauts	20
5	Synthèse du générateur de résidus	23

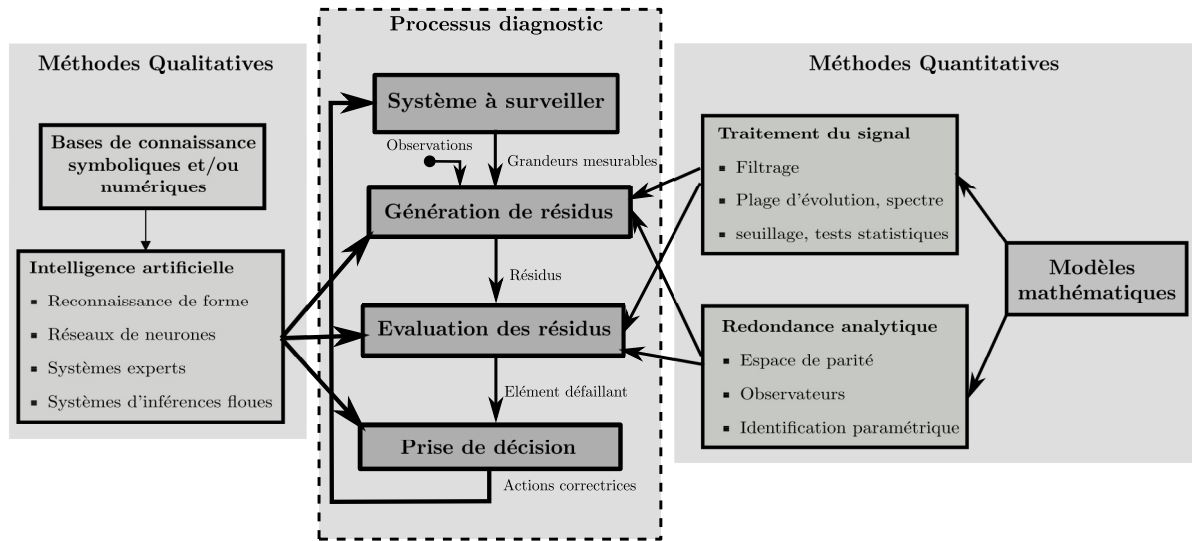


FIGURE 2.1 – Classification des méthodes de diagnostic

1 Introduction

Le diagnostic des systèmes est une tâche extrêmement complexe et de nombreuses solutions ont été proposées dans différents domaines tels que le contrôle de processus, l'intelligence artificielle, les statistiques ou l'électronique. Ces techniques ont également été appliquées à l'industrie, à l'aéronautique, aux composants électroniques et au traitement d'images, entre autres.

Dans la littérature, plusieurs classifications des techniques de diagnostic peuvent être trouvées. Selon [4], les méthodes de diagnostic des fautes sont divisées en deux groupes : les méthodes sans modèle et les méthodes basées sur un modèle. Une autre classification classique a divisé les méthodes de diagnostic en trois catégories : les méthodes basées sur un modèle, les méthodes basées sur la connaissance et les méthodes basées sur les données (ou sans modèle). Enfin, une classification plus récente divise ces techniques en deux principales classes : les modèles quantitatifs et les modèles qualitatifs.

La figure 2.1 résume les différentes classes de méthodes de diagnostic avec le processus de diagnostic adopté pour un système donné.

2 Les méthodes qualitatives

Dans cette méthode les connaissances utilisables reposent sur le savoir et l'expérience d'opérateur humain ayant une parfaite maîtrise de l'installation à surveiller (base de connaissances symbo-

liques) et/ou sur l'expérience d'une base de connaissances numériques correspondant aux divers modes de fonctionnement de l'installation.

Suivant cette approche, on trouve toutes les méthodes liées à l'intelligence artificielle. Elle inclut les systèmes experts, les systèmes d'inférences floues, la reconnaissance de forme, les réseaux de neurones. Ces différentes approches sont alors utilisées pour construire un modèle de diagnostic qualitatif permettant de remonter des symptômes observés aux causes.

3 Les méthodes quantitatives

On peut distinguer deux types d'approches suivant que l'on considère des modèles mathématiques artificiels ou des modèles mathématiques du processus considérés. En effet, la première englobe les méthodes de traitement de signal et la deuxième englobe les méthodes d'automatique dites aussi les méthodes de redondance analytique.

3.1 Méthodes de traitement du signal

Cette approche repose sur les techniques de traitement du signal. La méthode la plus simple et la plus courante consiste à fixer un ou plusieurs seuils limitant la plage d'évolution du signal mono-dimensionnel considéré. Le traitement de signaux multi-dimensionnels pour la détection des sauts brusques est aussi possible comme il est étudié dans le livre de Basseville-Nikiforov.

3.2 Méthodes d'automatique (redondance analytique)

Elles sont aussi dites méthode de redondance analytique et mettent en jeu un ensemble de variables avec des relations statistiques et/ou dynamiques liant ces variables. En automatique, le concept clé est celui de modèle mathématique d'un processus physique. Ce modèle mathématique, censé représenter une réalité objective, est exploité afin d'élaborer des lois de commande permettant l'accroissement des performances dynamiques et statiques du système étudié. En effet, le modèle étant censé décrire le comportement dynamique du système à surveiller, tout écart entre le comportement prévu par le modèle et le comportement mesuré traduit l'apparition d'un défaut. Les méthodes proposées, dans ce contexte, peuvent être regroupées en trois catégories :

3.2.1 Méthodes de diagnostic à base d'observateurs

Les méthodes de diagnostic des défauts à base d'observateurs sont basées sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées (issues de l'observateur). Cette technique permet une génération flexible des résidus.

3.2.2 Méthodes des équations de parité

Dans cette approche, l'ensemble des valeurs que peuvent prendre les résidus compose un espace, dans lequel, le vecteur de parité est défini comme étant la valeur des résidus à un instant donné. Ce vecteur prend alors une direction dans le cas de l'apparition d'un défaut.

3.2.3 Méthodes d'identification paramétrique

La détection et la localisation des défauts peuvent être effectuées en utilisant des techniques d'identification, si la structure du modèle est connue. L'idée de base consiste à estimer les paramètres du système en temps réel et de les comparer aux paramètres non affectés par les défauts. On en distingue deux approches :

- Méthodes de l'erreur d'équation.
- Méthodes de l'erreur de sortie.

Dans la suite de ce chapitre et pour atteindre l'objectif de ce module, nous focalisons l'aperçu sur le diagnostic des systèmes en utilisant les méthodes quantitatives de la redondance analytique qui font appel à une représentation mathématique du systèmes à diagnostiquer.

4 Diagnostic quantitatif par les méthodes d'automatique

4.1 Principe du diagnostic

Ce type de diagnostic est largement présent dans la littérature et a été développé dès les années soixante-dix. Il est connu sous le nom plus général de redondance analytique, consiste à estimer, à l'aide d'un modèle mathématique du système, les grandeurs mesurées sur celui-ci. Si le modèle reflète bien le bon comportement du système, les défauts sont traduits par l'écart entre les grandeurs estimées et mesurées. Ils sont alors détectés par comparaison des résidus à des seuils

convenablement choisis.

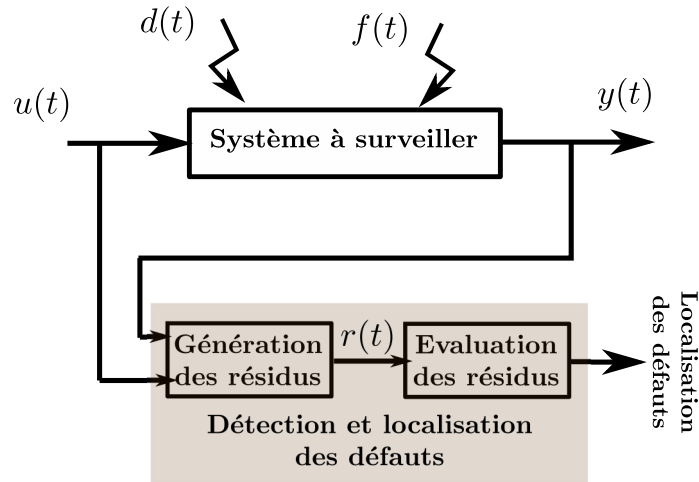


FIGURE 2.2 – Démarche du processus de diagnostic quantitatif d’un système

La figure 2.2 représente un processus de diagnostic quantitatif d’un système dynamique. En effet, un système réel de diagnostic peut être sensible aux entrées inconnues $d(t)$ et sensible aux défauts que l’on souhaite détecter $f(t)$. La première étape du diagnostic des systèmes est la génération des résidus (indicateurs) des défauts, qui consiste à agréger les informations sur les anomalies ou les dysfonctionnements du système à surveiller.

4.2 Le modèle utilisé pour le générateur de résidus

Le modèle général d’un système linéaire continu peut exprimer comme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

Dans lequel, $x(t)$ est le vecteur d’état de système, $u(t)$ le vecteur d’entrée ou de commande et $y(t)$ le vecteur de la sortie. La génération des résidus consiste à générer un ensemble des signaux connu sous le nom résidus $r(t)$. Ces signaux permettent d’indiquer l’apparition des défauts sur le processus. Le modèle ne prend pas en considération les incertitudes de modélisation et les perturbations. En effet, la robustesse d’un modèle consiste à une insensibilité de ceux-ci par rapport aux incertitudes et perturbations non mesurables. L’obtention de la robustesse consiste à prendre en compte les incertitudes et les perturbations sur le comportement du système nominal. Ces incertitudes et perturbations sont considérées comme des entrées inconnues. Pour cela, le modèle 2.1 devient :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D_x d(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

Où, $d(t)$ est le vecteur d'entrées inconnues qui renferme toutes les variables d'entrées non mesurables, D_x est une matrice connue et de rang plein colonne qui s'applique sur $d(t)$ pour la mise à jour du vecteur d'état $x(t)$.

Le terme $D_x d(t)$ est utilisé pour représenter aussi bien des perturbations additives que les diverses incertitudes de modélisation. Considérons en effet le système incertain suivant $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$ dont les matrices A et B dépendent de paramètres réels dont les valeurs numériques sont imparfaitement connues ou susceptibles d'évoluer au cours du temps, ce que l'on peut écrire :

$$A = A_0 + \sum_{i=1}^N \delta_i(t) A_i, B = B_0 + \sum_{i=1}^N \delta_i(t) B_i \text{ avec } |\delta_i(t)| < 1 \text{ pour } i = 1, \dots, N$$

où les A_i et B_i sont des matrices constantes connues et les $\delta_i(t)$ des pondérations temporelles inconnues mais bornées. Le terme $D_x d(t)$ s'écrit dans ce cas :

$$\mathcal{D}_x d(t) = \left(\sum_{i=1}^N \delta_i A_i \right) x(t) + \left(\sum_{i=1}^N \delta_i B_i \right) u(t) = [A_1 \cdots A_N \quad B_1 \cdots B_N] d(t) .$$

$$\text{avec } d(t) = [\delta_1(t)x(t) \cdots \delta_N(t)x(t) \quad \delta_1(t)u(t) \cdots \delta_N(t)u(t)]^T$$

Bien entendu, l'accroissement de la robustesse vis-à-vis des perturbations ne doit pas se faire au détriment de la sensibilité des résidus vis-à-vis des défauts que l'on souhaite détecter et localiser. Ceci ne peut être fait que si l'on dispose d'un modèle faisant apparaître l'effet des défauts $f(t)$ sur le comportement du système nominal. De façon analogue au cas des entrées inconnues, l'influence des défauts sur le comportement du système peut être modélisée comme une perturbation agissant de manière additive sur la dynamique de l'état et les sorties. On adopte alors le système 2.1, permettant la prise en compte des incertitudes et des défauts sur le comportement du système nominal :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_y f(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

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

4.3 Génération des résidus

En appliquant la transformation de Laplace sur le système 2.3, on obtient :

$$y(s) = C(SI - A)^{-1}(Bu(s) + \mathcal{F}_x f(s) + \mathcal{D}_x d(s)) + \mathcal{F}_y f(s) \quad (2.4)$$

En introduisant trois fonctions de transferts séparées, à savoir de commande $G_u(s)$, de défauts $G_f(s)$ et des perturbations ou entrées inconnues $G_d(s)$, l'équation 2.4 peut être réduite sous la forme suivante :

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_f(s)f(s) + G_d(s)d(s) \quad (2.5)$$

avec :

$$G_u(s) = C(SI - A)^{-1}B \quad (2.6)$$

$$G_f(s) = C(SI - A)^{-1}\mathcal{F}_x + \mathcal{F}_y \quad (2.7)$$

$$G_d(s) = C(SI - A)^{-1}\mathcal{D}_x \quad (2.8)$$

En adoptant la structure de la figure 2.3 pour la génération de $r(t)$ à partir des grandeurs mesurées du procédé considéré, c'est à dire à partir de ses signaux d'entrée $u(t)$ et signaux de sortie $y(t)$, la synthèse du générateur de résidus devient foncièrement équivalente à la synthèse de deux matrices stables $H_u(s)$ et $H_y(s)$ vérifiant la propriété temporelle suivante.

Propriété 1.

$$\text{Si } f(t) = 0 \Rightarrow r(t) = 0 \text{ Sinon } r(t) \neq 0$$

Dans ces conditions, l'expression générale du générateur de résidus prend la forme suivante :

$$r(s) = H_u(s)u(s) + H_y(s)[G_u(s)u(s) + G_f(s)f(s) + G_d(s)d(s)] \quad (2.9)$$

Pour que la propriété 1 soit vérifiée, $H_u(s)$ et $H_y(s)$ doivent satisfaire l'ensemble des équations

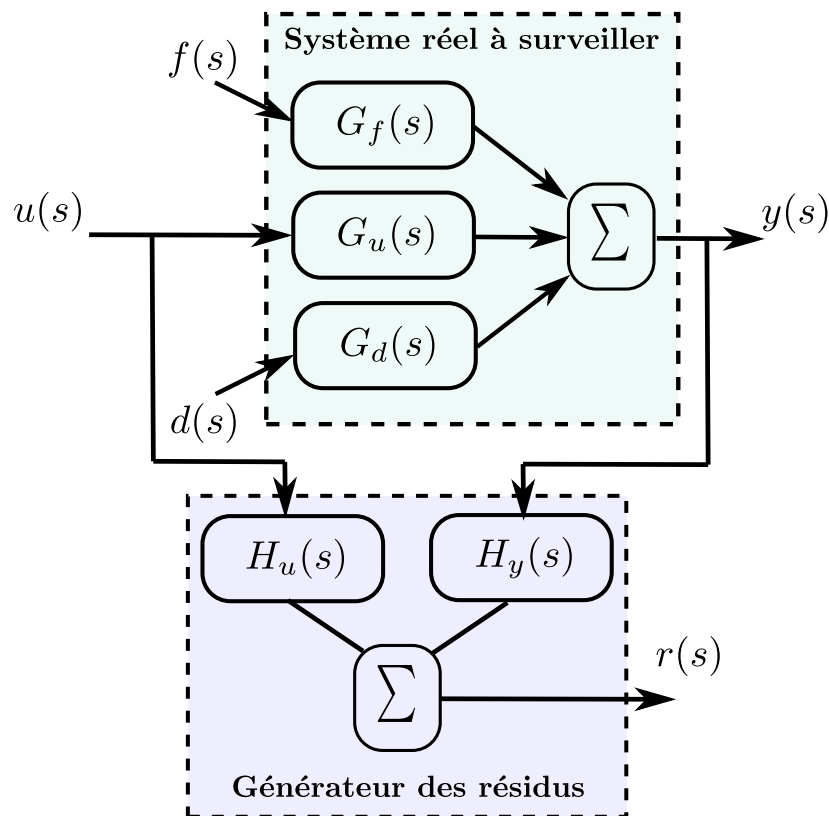


FIGURE 2.3 – Structure générale d'un générateur de résidus

suivantes :

$$H_u(s) + H_y(s)G_u(s) = 0 \quad (2.10)$$

$$H_y(s)G_f(s) \neq 0 \quad (2.11)$$

$$H_y(s)G_d(s) = 0 \quad (2.12)$$

Le produit matricielle $H_y(s)G_f(s)$ est la matrice de transfert entre le vecteur des défauts et le vecteur des résidus. A partir de cette matrice, on peut déduire **la table des signatures des défauts**. Cette table est utilisée pour la localisation des défauts.

Le bon choix des matrices H_u et H_y pour satisfaire la propriété 1 mène à une construction fiable de générateurs de résidus.

4.4 Détection et localisation des défauts

La détection des défauts permet de définir si le système est en état de bon fonctionnement ou non. Pour plus de clarification, on considère un système avec trois défauts f_1, f_2, f_3 , et on cherche à construire un générateur des résidus de trois vecteurs r_1, r_2, r_3 . Dans ce cas, la fonction de transfert de vecteur des résidus peut s'exprimer par :

$$r(s) = \begin{bmatrix} r_1(s) \\ r_2(s) \\ r_3(s) \end{bmatrix} = H_y(s)G_f(s) \begin{bmatrix} f_1(s) \\ f_2(s) \\ f_3(s) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

avec une matrice de transfert entre les résidus et les défauts est définie par :

$$H_y(s)G_f(s) = \begin{bmatrix} 0 & G_{12}(s) & 0 \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & 0 \\ G_{31}(s) & 0 & G_{33}(s) \end{bmatrix}$$

et dans laquelle $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$, $G_{22}(s)$, $G_{31}(s)$ et $G_{33}(s)$ sont des fonctions de transfert stables. Selon 2.13 si l'un des défauts est non nul le vecteur de résidus devient non nul. L'existence d'un défaut est donc vérifiée par le test de non-nullité des résidus. En pratique, les mesures dans les systèmes réels présentent habituellement des incertitudes (des taches de bruits), en conséquence les résidus sont toujours considérés non nulles malgré l'absence des défauts. Prenant en considération ces bruits, la relation 2.13 devient :

$$r(s) = H_y(s)G_f(s) \begin{bmatrix} f_1(s) \\ f_2(s) \\ f_3(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{r1}(s) \\ e_{r2}(s) \\ e_{r3}(s) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

La relation 2.14 présente un vecteur des résidus toujours non nul malgré la non-existence des défauts. La détection d'un défaut peut être envisagée en comparant le vecteur des résidus dans le domaine temporel à un seuil de détection T . La valeur de ce dernier doit forcément tenir compte de la présence des bruits $e_{r1}(t)$, $e_{r2}(t)$ et $e_{r3}(t)$. Dans ce cas on a alors :

$$T \succ |e_{ri}(t)|_{i=1,\dots,3}$$

Donc, la détection des défauts est effectuée selon la relation suivante :

$$\begin{cases} |r(t)| \leq T & f = 0 \\ |r(t)| > T & f \neq 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Dans ce cas, en prenant un exemple d'existence d'un défaut au niveau du résidu r_3 , l'évolution des résidus et la détection des défaut s'effectue de la façon présentée dans la figure 2.4.

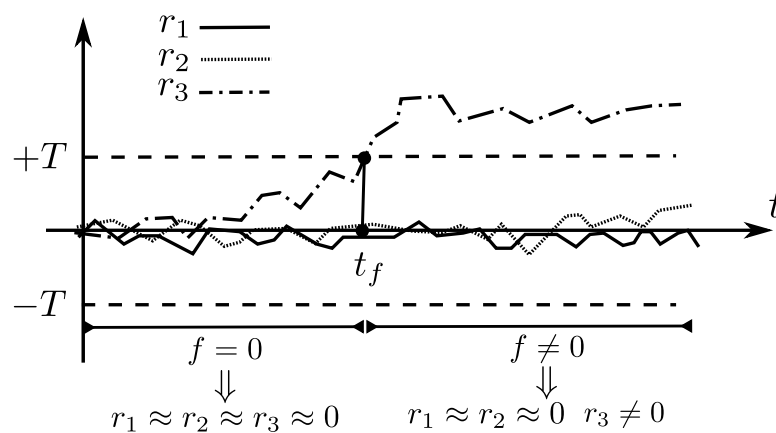


FIGURE 2.4 – Procédure de détection d'un défaut

La comparaison des résidus à un seuil donne des valeurs de type booléen avec :

$$\begin{cases} re_i = 1 & \text{si } |r_i(t)| > T \\ re_i = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

En prenant l'exemple de la figure 2.4, la signature du défaut détecté est exprimé par :

$$r_{i,t>t_f} = [0 \ 0 \ 1]^T$$

Cette signature permet de la localisation du défaut, c'est-à-dire l'identification de son origine. La localisation des défauts est simplifiée avec l'utilisation de la table des signatures qui découle directement de la fonction de transfert $H_y(s)G_f(s)$.

Exemple

$$r(s) = H_y(s)G_f(s)f(s) = \begin{bmatrix} 0 & G_{12}(s) & 0 \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & 0 \\ G_{31}(s) & 0 & G_{33}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(s) \\ f_2(s) \\ f_3(s) \end{bmatrix}$$

Pour ce cas, la table des signatures devient :

	f_1	f_2	f_3
re_1	0	1	0
re_2	1	1	0
re_3	1	0	1

TABLE 2.1 – Table des signatures

D’après le tableau 2.1, le vecteur $re_{i,t>f} = [1 \ 1 \ 0]^T$ est associée au défaut f_2 .

D’une manière générale, la signature d’un défaut correspond à l’une des colonnes de la table des signatures. C’est ainsi que l’identification de la signature à l’une des colonnes de la table permet de localiser le défaut (figure 2.5).

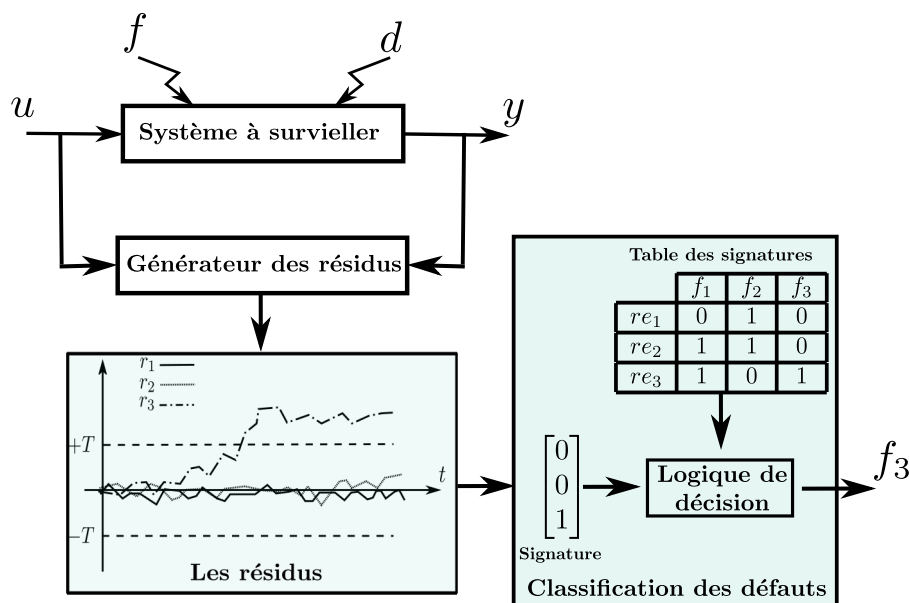


FIGURE 2.5 – Procédure de diagnostic d’un système (détection et localisation d’un défaut)

La figure 2.5 résume les différentes étapes du diagnostic. Le générateur de résidus permet de construire des signaux sensibles aux différents défauts à détecter. La comparaison de ces signaux

à des seuils de détection fournie une signature qui, comparée à la table des signatures permet la localisation des défauts. Notons que la localisation des défauts nécessite la mise en œuvre d'une logique de décision capable d'interpréter correctement la signature issue de la comparaison des résidus à des seuils. Cet ensemble peut être plus au moins élaboré et peut être vu, d'une façon générale, comme un dispositif de classification. En effet, la signature peut s'interpréter comme une forme qu'il s'agit de reconnaître parmi l'ensemble des différentes formes possibles représentées ici par la table des signatures.

5 Synthèse du générateur de résidus

De nombreuses méthodes ont été élaborées durant ces trente dernières années permettant la génération de résidus à l'aide de la redondance analytique. Ces différentes méthodes reposent finalement soit sur une estimation d'état du système (approches 1 et 2) soit sur une estimation des paramètres (approche 3) :

1. Approche à base d'observateurs.
2. Approche par espace de parité.
3. Approche par identification paramétrique.