



UFR Sciences et Techniques Mathématiques Informatique Automatique  
Ecole Doctorale IAE+M  
DFD Automatique et Production automatisée



CNRS ESA 7039

## THESE

présentée pour l'obtention du

### DOCTORAT DE L'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY 1

Spécialité Automatique

par

**Luis Gerardo VELA VALDES**

### ETUDE ET ELABORATION D'UNE APPROCHE FONCTIONNELLE POUR LA LOCALISATION DE DEFAUTS EN DIAGNOSTIC - APPLICATION A LA SIMULATION D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

Soutenue publiquement le 6 Juillet 1998 devant la commission d'examen :

*Président* : M. GABRIEL - Professeur à l'UHP, Nancy 1  
*Rapporteurs* : J. MERCKLE - Professeur à l'Université Haute Alsace  
D. NOYES - Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes  
*Examineurs* : F. ROUSSELOT - Maître de conférences, Université Strasbourg II  
D. SAUTER - Professeur à l'UHP, Nancy 1 - Directeur de Thèse  
D. THEILLIOL - Maître de conférences à l'UHP, Nancy 1

## ***REMERCIEMENTS***

Je tiens à remercier les membres de ce jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail et pour le temps qu'ils m'ont consacré.

Je voudrais également remercier au CONACYT - S.F.E.R.E et à la D.G.I.T. - CENIDET par la bourse accordée pour réaliser des études de Doctorat.

Sans distinction de temps et de lieu, mes pensées vont à toutes celles et ceux qui sont loin, et pourtant, ils ne peuvent pas s'en aller.

## ***AGRADECIMIENTOS***

Deseo agradecer a los miembros de este jurado por el honor que me conceden al revisar este trabajo y por el tiempo que me dedicaron.

También quisiera agradecer al CONACYT - S.F.E.R.E y a la D.G.I.T. - CENIDET por la beca otorgada para realizar estudios de Doctorado.

Sin distinción de tiempo y de lugar, este trabajo está dedicado a aquellos que se encuentran lejos, y por lo tanto, no se pueden ausentar.

# Table des matières

## **Introduction 9**

<b>I</b>	<b>Le Diagnostic</b>	<b>11</b>
I.1	Introduction .....	11
I.2	La maintenance, la surveillance et le diagnostic .....	11
I.2.1	Introduction .....	11
I.2.2	Définitions .....	13
I.2.3	Les méthodes de diagnostic .....	15
I.2.4	Conclusion .....	18
I.3	La représentation des systèmes .....	18
I.3.1	Introduction .....	18
I.3.2	Caractéristiques des résidus et des signatures .....	20
I.3.3	Conclusion .....	22
I.4	La spécification du système de diagnostic .....	22
I.4.1	Introduction .....	22
I.4.2	Le modèle .....	23
I.4.3	La tâche .....	24
I.4.4	Le défaut .....	26
I.4.5	Conclusion .....	28
I.5	La notion de fonction .....	29
I.5.1	Introduction .....	29
I.5.2	Les espaces d'abstraction .....	29
I.5.3	La fonction dans la localisation de défauts.....	32
I.5.4	Conclusion .....	36
I.6	Conclusion .....	36
<b>II</b>	<b>La Génération de Résidus.</b>	<b>39</b>
II.1	Introduction .....	39
II.2	Méthodes internes du diagnostic .....	39
II.2.1	Introduction .....	39
II.2.2	Le modèle parallèle .....	40
II.2.3	Les Filtres de Variables d'Etat (FVE) .....	43
II.2.4	L'espace de parité .....	45
II.2.5	Les observateurs .....	50
II.2.6	L'estimation paramétrique .....	52

II.2.7	Conclusion .....	55
II.3	Sensibilité des résidus .....	55
II.3.1	Introduction .....	55
II.3.2	Sensibilité aux défauts additifs et multiplicatifs .....	55
II.3.3	Exemple d'application .....	57
II.3.3.1	Défauts sur les capteurs .....	59
II.3.3.2	Défauts sur les paramètres.....	63
II.3.4	Conclusion .....	65
II.4	Conclusion .....	65

### **III La Notion de Fonction dans le Diagnostic 67**

III.1	Introduction .....	67
III.2	L'approche proposée : Ontologie, Fonction et Diagnostic .....	67
III.3	Le modèle ontologique .....	70
III.3.1	Introduction .....	70
III.3.2	Les classes de la connaissance .....	70
III.3.3	Le modèle ontologique de la connaissance .....	71
III.3.4	Conclusion .....	73
III.4	La fonction dans la localisation de défauts .....	73
III.4.1	Introduction .....	73
III.4.2	Le choix de la fonction .....	73
III.4.3	La fonction dans les méthodes internes du diagnostic .....	74
III.4.3.1	La fonction et l'espace de parité .....	75
III.4.3.2	La fonction et les observateurs .....	76
III.4.3.3	La fonction et l'estimation paramétrique .....	77
III.4.3.4	La fonction et le modèle parallèle .....	78
III.4.4	Conclusion .....	80
III.5	Le modèle ontologique de la détection et la localisation de défauts .....	80
III.5.1	Introduction .....	80
III.5.2	La fonction et la téléologie dans le modèle ontologique .....	80
III.5.3	Le modèle ontologique des méthodes internes du diagnostic .....	82
III.5.4	Conclusion .....	83
III.6	Conclusion .....	84

### **IV L'Evaluation et la Décision 85**

IV.1	Introduction .....	85
IV.2	L'évaluation et l'ontologie .....	85
IV.2.1	Introduction .....	85
IV.2.2	Tests d'hypothèses binaires .....	86
IV.2.3	Tests non statistiques de logique à seuil .....	88
IV.2.4	L'ontologie des résidus .....	89
IV.3	La décision et l'ontologie .....	91
IV.3.1	Introduction .....	91
IV.3.2	Ontologie du réseau de causalité .....	92
IV.4	Conclusion .....	94

<b>V</b>	<b>Application à la Simulation d'un Moteur à Courant Continu</b>	<b>95</b>
V.I	Introduction .....	95
V.2	Boucle ouverte .....	95
V.2.1	Introduction .....	95
V.2.2	Description du système simulé .....	96
V.2.3	Les conditions de la simulation .....	97
V.2.4	Génération de résidus .....	97
V.2.5	Evaluation de résidus .....	111
V.2.6	Décision .....	114
V.2.7	Conclusion .....	116
V.3	Boucle fermée .....	116
V.3.1	Introduction .....	116
V.3.2	Description du système simulé .....	116
V.3.3	Les conditions de la simulation .....	118
V.3.4	Génération de résidus .....	118
IV.3.4.1	L'espace de parité en continu .....	118
IV.3.4.2	L'estimation paramétrique en continu .....	120
V.3.5	Evaluation de résidus .....	121
V.3.6	Décision .....	122
V.3.7	Conclusion.....	123
V.4	Conclusion. ....	124
	<b>Conclusion</b>	<b>125</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>157</b>

# **Chapitre I**

## **Le Diagnostic**

### **I.1 Introduction.**

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver la cause des dysfonctionnements. Ce chapitre présente les définitions de base du diagnostic qui seront employées tout au long de ce mémoire et de justifier l'utilisation de la notion de fonction dans la localisation de défauts.

Le paragraphe I.2 est consacré aux définitions des résidus et des signatures ainsi qu'à la présentation des trois étapes du diagnostic : la génération, l'évaluation et la décision. Nous étudions les liens entre les méthodes de diagnostic, la connaissance et le raisonnement. Les méthodes internes et externes se focalisent dans la connaissance du système. Dans les méthodes externes, aucun modèle n'est disponible pour établir les relations de cause à effet. En revanche les méthodes internes se basent sur la connaissance des modèles analytiques. Le modèle parallèle, l'espace de parité, les observateurs et l'estimation des paramètres constituent les quatre principales méthodes internes du diagnostic.

Le paragraphe I.3 aborde la définition du cahier des charges dans le diagnostic. Ce cahier est défini par le modèle, la tâche et le défaut. Enfin, le paragraphe I.4 présente l'idée de base de notre travail de recherche: la notion de fonction dans la localisation de défauts. Nous présentons un exemple, extrait de la littérature, pour bien montrer les avantages de notre approche. Les définitions de concept et d'abstraction sont présentées afin d'introduire la notion de fonction dans le diagnostic.

### **I.2 La maintenance, la surveillance et le diagnostic.**

#### **I.2.1 Introduction.**

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la fiabilité, la disponibilité et la sûreté des systèmes industriels [Ise93]. D'après Zwingelstein [Zwi95] les définitions de ces caractéristiques sont :

- la fiabilité : c'est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation;
- la disponibilité : c'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite;
- la sûreté : c'est l'aptitude d'un système à respecter l'utilisateur et son environnement.

La responsabilité de garantir la disponibilité des systèmes repose sur la maintenance. D'après la norme AFNOR (Association Française de NORmalisation), la maintenance est définie ainsi :

«Toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management».

Pour accomplir ces fonctions, la maintenance nécessite de connaître l'état de fonctionnement des systèmes. La surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance. Dans la commande automatique des systèmes, la surveillance sert, d'une part, à signaler les anomalies de fonctionnement et, d'autre part, à prendre en compte les actions destinées à maintenir l'opération des systèmes. La surveillance est composée de trois tâches, la tâche du moniteur, la tâche de protection et la tâche de diagnostic, comme le montre la Figure I.1.



Figure I.1 : La Surveillance.

D'après Isermann [Ise97a], les trois tâches de la surveillance sont définies de la façon suivante :

1. moniteur : les variables mesurées sont comparées à des valeurs de référence et le résultat est affiché et lu par l'opérateur;
2. protection automatique : dans le cas d'une anomalie dangereuse, la tâche du moniteur est de déclencher automatiquement des actions préventives. Ces actions ont pour objectif de garantir la sûreté de l'opérateur et du système;

3. diagnostic : des indicateurs d'anomalies dans le fonctionnement du système sont calculés à l'aide des variables mesurées. Le diagnostic a pour objectif de trouver la cause de l'anomalie.

Nous ne traiterons dans la suite que de la tâche de diagnostic. Dans ce but, il est indispensable d'introduire les définitions de base liées aux indicateurs d'anomalies et de présenter les méthodes de base utilisées en diagnostic.

## I.2.2 Définitions.

Les systèmes industriels sont souvent soumis à des anomalies ou des changements inattendus, qui entraînent un mauvais fonctionnement. Par rapport aux performances du système, trois types d'anomalies sont à considérer [Ise97a] :

- *erreur* : tout écart entre la valeur mesurée ou calculée, et la valeur réelle;
- *défaut* : l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonction(s) requise(s) avec des performances définies dans les spécifications techniques;
- *défaillance* : l'incapacité d'un dispositif à accomplir une fonction requise.

Le *diagnostic* consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. Les informations issues de capteurs du système sont utilisées pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus. Si le système fonctionne correctement et en l'absence de bruit ou d'erreurs de modélisation, la valeur du résidu est égale à zéro [GA92]. Cette valeur reflète l'effet des défauts dans le système [IB96], [CLCS94]. La Figure I.2 illustre le principe de base employé pour la *génération de résidus*.

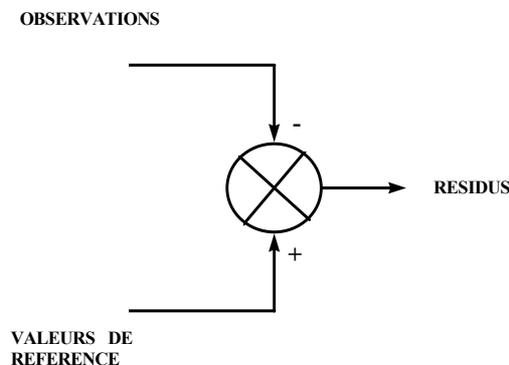


Figure I.2 : Génération de Résidus.

Le *résidu* représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus. La redondance est un moyen de valider cette information. D'après Brunel et al. [BLJRV90] deux grandes classes de redondance existent :

- la *redondance matérielle* : les observations et la référence sont issues de plusieurs capteurs qui mesurent la même variable [CW84]. Les avantages de la redondance matérielle sont la fiabilité et la simplicité de la mise en oeuvre. En revanche, le coût et l'encombrement élevés, ainsi qu'un champ d'application limité aux capteurs, sont les principaux inconvénients;

- la *redondance analytique* : les observations et les valeurs de référence sont issues de plusieurs capteurs qui mesurent des variables différentes. Cette redondance utilise un modèle mathématique du système [GA92]. La redondance analytique permet, d'une part, le diagnostic de défauts de type capteur, actionneur et système et, d'autre part, de remplacer la redondance matérielle par une redondance informationnelle.

La valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes [Ise94]. Cette étape de quantification, illustrée par la Figure I.3, est appelée *évaluation de résidus*. Le problème d'évaluation consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut. L'étape d'évaluation a pour objectif de décider s'il y a ou non un défaut dans le système. Un *symptôme* correspond à un résidu qui a été évalué ou quantifié.

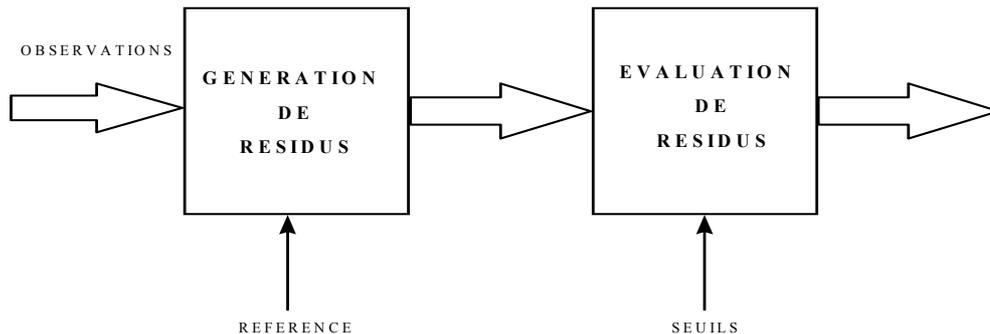


Figure I.3 : Evaluation de Résidus.

Les défauts peuvent provenir d'un capteur, d'un actionneur ou du système. Un seul résidu suffit pour connaître l'existence d'un défaut dans le système. En revanche, plusieurs résidus sont nécessaires afin de trouver la cause du défaut [GK93]. Une *signature* est un vecteur de symptômes [GA92], [CLCS94], (cf. § I.3.2). Par rapport au degré de connaissance que l'on dispose des défauts, il y a deux types de signatures :

- *signature de référence* : elle est obtenue pendant une étape d'apprentissage afin de connaître les effets des défauts dans les éléments du vecteur de symptômes. Dans le cas d'un fonctionnement normal, la signature de référence est le vecteur nul;
- *signature de cohérence* : elle est obtenue après l'étape d'apprentissage afin de connaître l'état de fonctionnement du système (normal ou en défaut).

Les signatures de référence, de bon et de mauvais fonctionnement, sont rassemblées dans un tableau de signatures (cf. § I.3.2) ou *matrice de diagnostic* [Kos95], [KSS94]. Cette matrice est obtenue pendant l'étape d'apprentissage, en utilisant la connaissance heuristique et la connaissance analytique du comportement du système (cf. § I.4.2).

La *décision* constitue la dernière étape de la tâche de diagnostic (Figure I.4). Il s'agit de comparer la signature de cohérence avec la matrice de diagnostic. L'étape de décision va nous permettre de différencier les défauts, c'est-à-dire de trouver la cause de l'anomalie dans le système. Dans ce paragraphe nous avons présenté les définitions de base du diagnostic. Le paragraphe suivant est consacré aux méthodes de diagnostic.

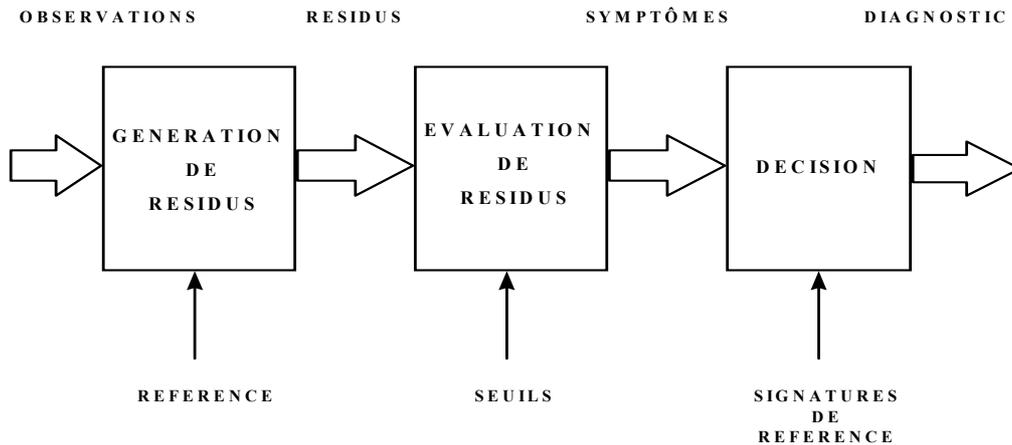


Figure I.4 : Décision.

### I.2.3 Les méthodes de diagnostic.

La connaissance est une activité intellectuelle visant à acquérir une compétence à propos d'un sujet donné. Le raisonnement est une suite de propositions déduites les unes des autres. La capacité humaine à raisonner dépend des types de connaissances utilisées et de leur classification [CGTT93], [JAB93]. La connaissance et le raisonnement sont deux éléments clés dans la solution d'un problème. D'après Puppe [Pup93], le diagnostic est une méthode de solution de problèmes qui repose sur la classification. Le diagnostic est, au niveau conceptuel, une distribution systématique des symptômes en diverses catégories de défauts.

Une méthode est une démarche organisée et rationnelle de l'esprit pour arriver à un certain résultat. Par rapport à la connaissance et au raisonnement, deux grandes classes de méthodes de diagnostic existent [Zwi95], [LA97], [Lei93], [IB97], [Ise97a] :

- les méthodes externes et internes : ces méthodes reposent sur la connaissance du modèle. Les méthodes externes utilisent la connaissance issue de l'expertise humaine, tandis que les méthodes internes dépendent de la connaissance obtenue à partir de modèles mathématiques;
- les méthodes inductives et déductives : le type de raisonnement (avant, arrière ou mixte) utilisé dans la résolution du problème constitue la principale caractéristique de ces méthodes.

Ces quatre catégories de méthodes de diagnostic seront décrites dans les paragraphes suivants.

#### *Les méthodes externes.*

Le principe de causalité établit que "chaque effet (symptôme) a une cause (défaut); les mêmes causes dans les mêmes conditions auront les mêmes effets" [ML94]. Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage. Cette méthode, illustrée par la Figure I.5, emploie un module de reconnaissance.

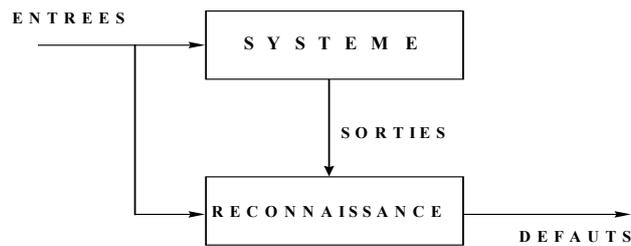


Figure I.5 : Méthode Externe de Diagnostic.

Ce module utilise les observations issues du système, des entrées et des sorties, afin de trouver les relations de cause à effet [Lei92]. Dans ces méthodes de diagnostic le facteur déterminant est l’algorithme de classification. D’après Leonhardt [LA97] et Isermann et al. [IB97] cinq types d’algorithmes de classification existent :

- algorithmes de classification statistique;
- algorithmes de classification géométrique;
- algorithmes de classification polynomiale;
- algorithmes de classification par réseaux de neurones;
- algorithmes de classification floue.

**Les méthodes internes.**

La connaissance du modèle permet de décrire les relations de cause à effet. Ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques. Les modèles doivent être obligatoirement validés expérimentalement avant toute utilisation industrielle [Zwi95]. Ces méthodes, comme indiqué à la Figure I.6, utilisent un modèle pour reproduire le comportement (prédictions) du système. Les écarts sont obtenus par la comparaison des sorties et des prédictions. Finalement le générateur de candidats utilise les écarts afin de trouver les relations de cause (défaut) à effet (symptôme).

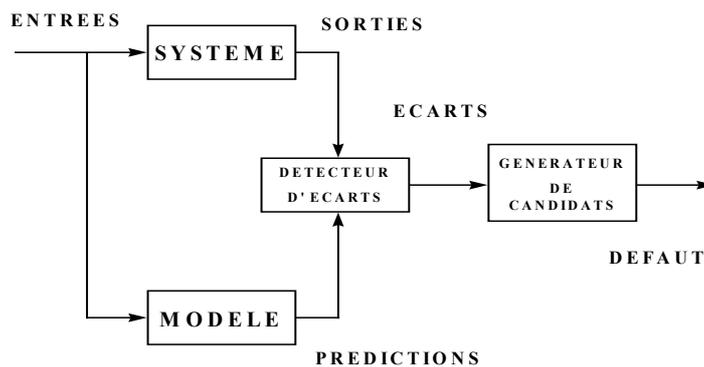


Figure I.6 : Méthodes Internes de Diagnostic.

Les méthodes internes de diagnostic se distinguent selon le modèle utilisé :

- *modèle de simulation* [JB86], [VMC97], [LG92] : c’est une description de la structure physique et du comportement du système (cf. § II.2.2). Ce modèle de diagnostic est issu du domaine de l’Intelligence Artificielle, cependant il utilise des concepts de base de la

Commande Automatique et de l'Identification tels que le modèle de référence et le modèle parallèle [Lei92], [Lei93];

- *équations de parité* : d'après Patton et al. [PC91a], une relation ou équation qui génère un résidu est appelée relation ou équation de parité. Les équations de parité primaires peuvent être obtenues à partir des équations qui décrivent la structure et le comportement du système. Des équations de parité additionnelles peuvent être obtenues par l'intermédiaire de transformations afin d'améliorer la tâche de diagnostic (cf. § II.2.4);
- *observateurs* : un module capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé estimateur d'état ou observateur d'état [Che84]. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état [Fra90]. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic (cf. § II.2.5);
- *estimation paramétrique* : l'estimation paramétrique est la détermination des valeurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système. Il s'agit de déterminer les valeurs numériques des coefficients des équations qui décrivent, au niveau de la structure, le modèle du système [Ise84]. Une condition d'excitation persistante (EP) est nécessaire afin d'assurer la convergence des paramètres liés aux constantes de temps du système (cf. § II.2.6).

La distinction entre ces méthodes internes de diagnostic est moins nette qu'il n'y paraît au premier abord. D'une part, les informations employées reposent toujours sur la connaissance des quatre grandeurs suivantes : les entrées, les sorties, la structure et le comportement temporel. D'autre part, il existe une équivalence entre l'espace de parité, les observateurs et l'estimation des paramètres :

- espace de parité - observateurs [Ger91], [MM94];
- espace de parité - estimation de paramètres [DCS94a], [DCS94b], [Ger97a], [GCFL94], [GD97];
- observateurs - estimation de paramètres [AF96], [Mag95], [AF97].

Le modèle est une représentation partielle et subjective décrivant seulement une partie de la connaissance. Cette connaissance sera choisie et interprétée par rapport au cahier des charges de la tâche de diagnostic (cf. § I.4). Par conséquent, le diagnostic constitue une interprétation subjective des défauts (causes) par rapport aux symptômes (effets) que chaque modèle est capable de manifester.

### ***Les méthodes inductives.***

Ces méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant, présentée à la Figure I.7. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets dans le système. L'induction est un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons possibles afin de trouver le défaut [Uli93a], [Uli93b].

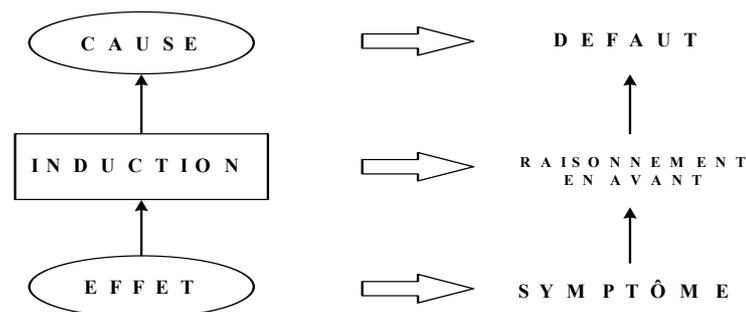


Figure I.7 : Méthodes Inductive de Diagnostic.

### **Les méthodes déductives.**

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes, Figure I.8. A partir d'une connaissance a priori du défaut, la méthode déductive doit trouver quels sont les effets dans le système. Une vérification des "effets trouvés" par rapport aux "effets possibles" permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut [Ise93].

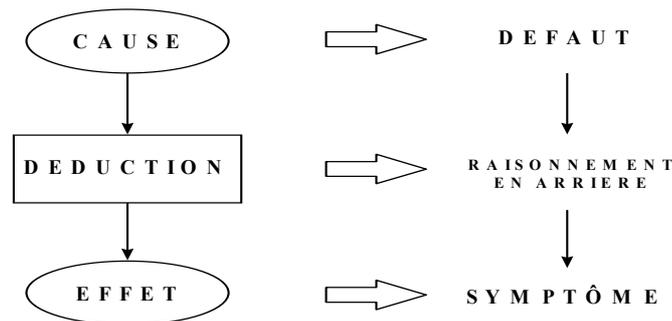


Figure I.8 : Méthodes Déductive de Diagnostic.

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnements (avant et arrière). Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant-arrière [Ise94]. La connaissance "a priori" de la cause (défaut) implique la connaissance de certains effets (symptômes). Cependant, ce fait ne signifie pas qu'une recherche en arrière précède toujours une recherche en avant; tel est le cas des systèmes experts gouvernés par les buts (défauts) [Pom88].

## **I.2.4 Conclusion.**

Les modèles (connaissance) de bon et de mauvais fonctionnement ainsi que leur interprétation (raisonnement) jouent un rôle capital dans la tâche de diagnostic. La connaissance et le raisonnement permettent de choisir le modèle le plus adapté à révéler les effets (symptômes) du défaut dans le système. Bien que l'Intelligence Artificielle et la Commande Automatique aient des schémas et des définitions différentes (cf. § Figures I.4 et I.6), leur principe reste le même, c'est-à-dire la comparaison des observations et des valeurs de référence afin de générer des indicateurs de défauts ou de résidus (cf. § Figure I.2).

Il est à noter que dans la redondance analytique, les valeurs de référence sont obtenues à partir d'un modèle. Dans la suite de ce chapitre, nous ne parlerons que des méthodes internes de diagnostic, c'est-à-dire les méthodes qui utilisent un modèle du système. Dans ce but, le sujet de la représentation des modèles sera abordé dans le paragraphe suivant. Nous parlerons notamment des systèmes continus décrits par des équations différentielles.

## I.3 La représentation des systèmes.

### I.3.1 Introduction.

Les méthodes de diagnostic basées sur la redondance analytique reposent sur la connaissance du modèle du système. Dans le cadre de l'étude des systèmes continus, linéaires et invariants, les systèmes se représentent par un ensemble d'équations de type :

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t)$$

(I.1)

$$Y(t) = CX(t)$$

(I.2)

où :

$X(t)$  est le vecteur des états, de dimension n.1;

$\dot{X}(t)$  est la dérivée du vecteur d'état;

$U(t)$  est le vecteur des entrées, de dimension p.1;

$Y(t)$  est le vecteur des sorties mesurées, de dimension q.1;

$A, B, C$  sont des matrices réelles et constantes de dimensions n.n, n.p et q.n

avec :

n, p, q des nombres entiers.

Dans cette représentation du modèle et par rapport aux variables du système, les défauts sont classés en deux catégories : défauts additifs et multiplicatifs [Ise93].

- *défauts additifs* : ces défauts représentent les dysfonctionnements sur les capteurs et les actionneurs. Les variables du modèle sont affectées par l'addition des changements  $\Delta X(t)$  dans le vecteur des états;

$$\dot{X}(t) = A[X(t) + \Delta X(t)] + BU(t)$$

(I.3)

$$Y(t) = C[X(t) + \Delta X(t)]$$

(I.4)

où :

$\Delta X(t)$  est un changement dans la valeur des états.

- *défauts multiplicatifs* : ces défauts représentent les dysfonctionnements sur les paramètres. Les défauts produisent un changement des coefficients des matrices  $A, B$  ou  $C$  sous la forme suivante :

$$\dot{X}(t) = [A + \Delta A]X(t) + [B + \Delta B]U(t)$$

(I.5)

$$Y(t) = [C + \Delta C]X(t)$$

(I.6)

où :

$\Delta A$  représente un changement des coefficients de la matrice  $A$

$\Delta B$  représente un changement des coefficients de la matrice  $B$

$\Delta C$  représente un changement des coefficients de la matrice  $C$

les variables du modèle sont donc affectées par la multiplication des changements  $\Delta A$ ,  $\Delta B$  ou  $\Delta C$ .

Les équations I.1 à I.6 peuvent décrire le même système, cependant les représentations sont différentes. En effet, d'une part les équations I.1 et I.2 représentent le bon fonctionnement du système, tandis que les équations I.3 à I.6 décrivent les modèles de mauvais fonctionnement. D'autre part, les équations I.1 à I.6 représentent le système sous une forme de variables d'état. Ces équations ont pour objectif de signaler l'apparition des défauts qui se traduisent par un changement dans la valeur des états. Cependant dans certains cas, les dysfonctionnements n'ont aucune influence sur la valeur des états. Tel est le cas des défauts liés aux constantes de temps des systèmes qui travaillent soit en régime établi, soit sans la condition d'excitation persistante [HP94], [Ise94], [HI96], [Höf95], [Ise93]. Il est donc nécessaire de trouver d'autres moyens, en plus des états, afin de connaître les effets des défauts dans le système. A cet effet, le modèle du système est décrit par des équations différentielles de type :

$$Y(t) + a_i Y^{(i)}(t) + \dots + a_n Y^{(n)}(t) = b_0 U(t) + b_j U^{(j)}(t) + \dots + b_m U^{(m)}(t) \quad (\text{I.7})$$

où :

$i=1, \dots, n$ ;

$j=1, \dots, m$ ;

représentent l'ordre des dérivées.

Connaissant l'entrée  $U(t)$  et la sortie  $Y(t)$ , l'estimation de paramètres a pour objectif de trouver la valeur des coefficients  $a_i$  et  $b_j$  [Spr92]. L'équation I.7 se représente sous la forme d'un modèle de régression [AW89] :

$$Y(t) = \varphi^T(t) \theta \quad (\text{I.8})$$

$$\varphi^T(t) = [-Y^{(i)}(t) \dots -Y^{(n)}(t) \quad U(t) \quad U^{(j)}(t) \dots U^{(m)}(t)] \quad (\text{I.9})$$

$$\theta^T = [a_i \dots a_n \quad b_0 \quad b_j \dots b_m] \quad (\text{I.10})$$

où :

$\varphi(t)$  est le vecteur des variables de régression ou régresseur;

$\theta$  est le vecteur des paramètres.

Il est à noter que les équation I.7 et I.8 peuvent être obtenues à partir de la représentation d'état. Cependant, la description sous la forme d'un modèle de régression est la plus adaptée pour connaître la valeur des coefficients  $a_i$  et  $b_j$ . Il faut signaler que les modèles continus permettent de garder le sens physique des coefficients des équations [Ise84], [Gar95], [Coi92], [ILM92], [UR87]. Cette caractéristique des modèles continus sera employée afin de faciliter l'interprétation dans la tâche de diagnostic. Nous ne parlerons par la suite que des modèles continus qui décrivent des systèmes linéaires et invariants. Les représentations du système sous la forme des équations d'état ou des modèles de régression seront utilisées afin de générer des résidus (cf. § II.2). La connaissance du comportement des résidus ainsi que de la signature sont deux éléments d'importance capitale dans la

tâche de diagnostic. Les paragraphes suivants seront consacrés à l'étude des caractéristiques des résidus et des signatures.

### I.3.2 Caractéristiques des résidus et des signatures.

La tâche de diagnostic est composée de deux sous tâches [Ger91] : La détection et la localisation de défauts. La *détection* des défauts est une caractéristique liée directement aux résidus. En fonction de leur vitesse d'apparition, les défauts sont classés en défauts soudains et progressifs [Zwi95], [Ise97a]. Les *défauts soudains* ne peuvent pas être détectés d'une façon précoce car un examen de l'évolution des caractéristiques du résidu est impossible. En revanche, les *défauts progressifs* peuvent être prévus par un examen ou une surveillance antérieure. A l'instant  $t_d$  le défaut  $d_i$  est détectable si le résidu  $r_i(t) \neq 0$ . Le défaut  $d_i$  est fortement détectable si le résidu  $r_i(t) \neq 0 \forall t > t_d$  [CP94]. La Figure I.9 illustre ces deux comportements des résidus.

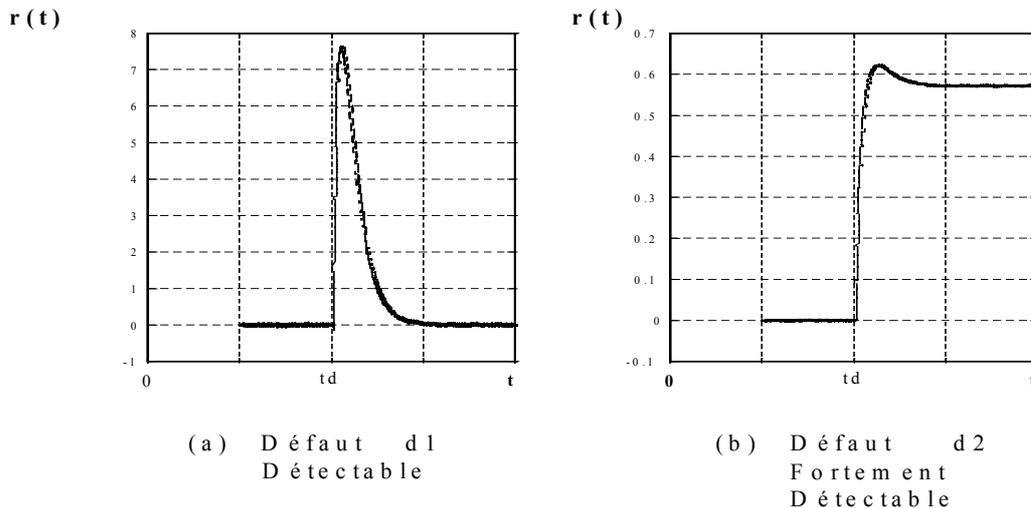


Figure I.9 : Le Comportement des Résidus.

Le résidu de la Figure I.9a ne sert qu'à la détection des défauts soudains car l'effet du défaut sur le résidu va disparaître après le transitoire. Ainsi la caractéristique "détectable" ou "fortement détectable" du défaut dépend du comportement du résidu.

La *localisation* du défaut est une caractéristique qui dépend de la signature. D'après Gertler [Ger97a] il existe trois types de signatures qui permettent la localisation des défauts : la signature de résidus structurés, la signature de résidus directionnels et la signature de résidus diagonaux.

- *signature des résidus structurés* : il s'agit d'un vecteur de résidus où chaque résidu est sensible à un ensemble de défauts;
- *signature de résidus diagonaux* : dans ce cas chaque résidu est sensible à un seul défaut;
- *signature de résidus directionnels* : les composantes du vecteur sont utilisées afin de construire une ligne droite. La direction de la ligne est différente pour chaque défaut.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons aux signatures des résidus structurés. Si le symptôme  $S_i$  est obtenu à l'aide d'une évaluation booléenne des résidus, la matrice de diagnostic sera composée de "1" et de "0", comme illustrée par le tableau I.1.

	SD	d1	d2	d3	d4
$S_1$	0	1	0	1	1
$S_2$	0	0	1	0	0
$S_3$	0	1	0	0	1

Tableau I.1 : Matrice de Diagnostic.

Un "0" à l'intersection de la ligne  $i$  et de la colonne  $j$  signifie que le résidu  $r_i(t)$  est insensible aux effets du défaut  $j$ . En revanche un "1" signifie que le résidu  $r_i(t)$  est sensible aux effets du défaut  $j$ . Trois remarques s'imposent. S'il n'y a pas de défaut, toutes les composantes de la signature sont égales à zéro (colonne SD). Ensuite, afin de localiser un défaut il faut des signatures différentes (colonnes d1, d2 et d3). Enfin, si des signatures identiques existent (colonnes d1 et d4) la localisation du défaut n'est pas possible. La différence entre toutes les signatures est une condition nécessaire mais pas suffisante pour garantir la localisation des défauts. Gertler et al. [GS90], [GA92] proposent la construction des signatures avec une structure canonique, Tableau I.2. Il s'agit de signatures qui ont le même nombre de "0", chacun placé à une position différente.

	SD	d1	d2	d3
S1	0	1	1	0
S2	0	1	0	1
S3	0	0	1	1

Tableau I.2 : Structure Canonique des Signatures.

La structure canonique des signatures a pour objectif d'éviter que le manque à la détection (cf. § IV.2.2) puisse générer des signatures égales. A titre d'exemple, nous étudions les signatures d1 et d3 du tableau I.1. Supposons un défaut d1 d'amplitude moyenne, par exemple 10 % de variation de la valeur nominale d'un paramètre (cf. § II.3.3). Si le défaut d1 n'influence pas suffisamment le résidu  $r_3(t)$ , alors la signature  $d1=[101]$  devient  $d1=[100]$ . Dans ce cas, la signature  $d1=[100]$  est identique à la signature  $d3=[100]$ . Le manque à la détection dans le résidu  $r_3(t)$  entraîne une dégradation de la signature d1. Ce problème n'existe pas dans la structure canonique des signatures, car le nombre de zéros est fixé à l'avance. Le résidu et/ou la signature doivent être insensibles ou les moins sensibles possibles aux effets des erreurs du modèle et des entrées inconnues. La *robustesse* est une caractéristique des systèmes de diagnostic. Elle a pour objectif de diminuer les effets des erreurs et des perturbations [Pat94], [DJ96], [PC97].

D'après Frank [Fra90] une étape de génération de résidus est robuste si la détection et la localisation possèdent les caractéristiques suivantes :

- détection de défauts : il est possible de distinguer les effets des défauts et des entrées inconnues;
- localisation de défauts : il est possible de distinguer les effets des défauts et des entrées inconnues, et de différencier les types de défauts.

Deux types de robustesse sont considérés dans la littérature : la robustesse active et la robustesse passive [Pat94], [DJ96]. La robustesse active se focalise dans l'étape de génération de résidus afin de rendre les résidus insensibles aux incertitudes du modèle ou aux perturbations. La robustesse passive se focalise sur l'étape d'évaluation de résidus, par exemple dans le choix des seuils adaptables pour la tâche de détection.

### **I.3.3 Conclusion.**

Un système peut être décrit de plusieurs façons. Dans la tâche de diagnostic, les représentations de bon et de mauvais fonctionnement du système sont aussi importantes que leurs interprétations. Le modèle, le résidu et la signature sont choisis en fonction de leurs capacités à révéler l'existence de défauts. Il est nécessaire d'établir des critères afin de choisir le modèle et l'interprétation les plus adaptées au défaut et au système. Dans le paragraphe suivant nous allons étudier la méthode de spécification du système de diagnostic ainsi que ses caractéristiques.

## **I.4 La spécification du système de diagnostic.**

### **I.4.1 Introduction.**

Le choix des modèles de bon et de mauvais fonctionnement constitue un problème complexe car les modèles décrivent seulement une partie du système. Dans le cadre du diagnostic, il n'y a pas de solution universelle [Lei93]. Il est donc nécessaire d'établir un cahier des charges afin de définir les limites du problème. A cet effet, Leitch [Lei93] propose d'abord une classification des besoins du diagnostic et ensuite une classification de leurs caractéristiques. D'après cet auteur, les besoins du diagnostic peuvent être rassemblés dans trois grandes classes, comme indiqué à la Figure I.10. Ces classes sont le modèle, le défaut et la tâche; les trois classes ainsi que leurs caractéristiques sont présentées dans les paragraphes suivants.

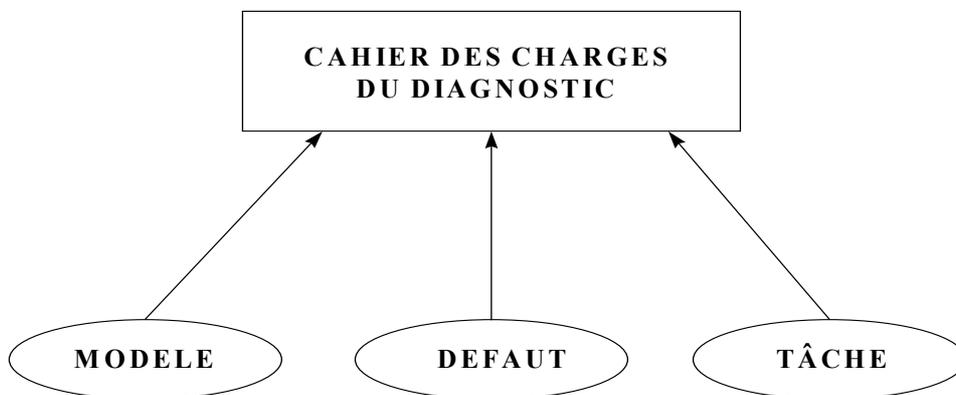


Figure I.10 : Classification des Besoins du Diagnostic.

## I.4.2 Le modèle.

Un modèle est correct s'il est capable d'accomplir son objectif [Lei92]. Dans la plupart des cas, un modèle est utilisé afin de reproduire l'évolution temporelle des variables d'un système physique; cette évolution est appelée le comportement du système. La description du modèle repose sur la connaissance de celui-ci. La source, l'orientation et le niveau sont les principales caractéristiques de la connaissance, décrites à la Figure I.11, qui seront employées afin de construire le modèle du système.

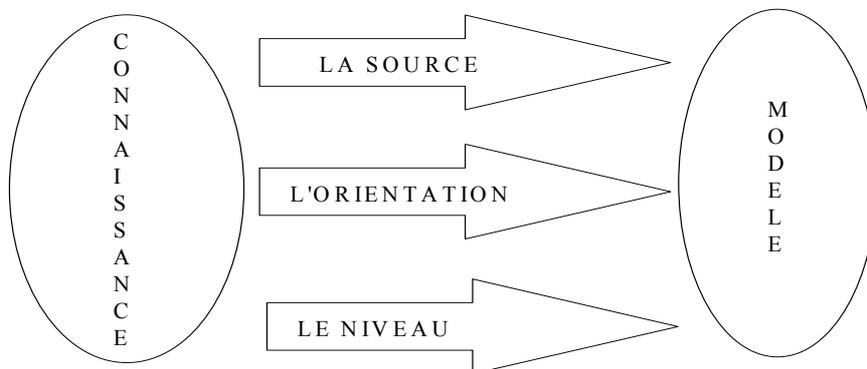


Figure I.11 : Les Caractéristiques du Modèle.

### La source de la connaissance.

La source de la connaissance peut être heuristique ou analytique. La connaissance heuristique repose sur l'expérience obtenue par l'observation directe du système [FL87]. Il est impossible d'obtenir cette connaissance à l'aide des modèles analytiques [Ise93]. En revanche, la connaissance analytique exploite la description de modèles afin de construire les relations de redondance analytique. Les connaissances heuristiques et analytiques fournissent des informations complémentaires qui permettent d'obtenir un diagnostic plus performant [FL87], [Ise94], [Fre91], [IU93].

### L'orientation de la connaissance.

Il s'agit de type de représentation utilisée pendant le raisonnement ou solution du problème. Cette représentation peut être implicite ou explicite [LA97], [Lei92]. Dans la représentation implicite, il n'existe aucun modèle pour établir la relation de cause à effet entre les défauts et les symptômes, le diagnostic s'effectue à l'aide des algorithmes de classification (cf. § I.2.3). En revanche, la représentation explicite est une description causale car il existe un modèle capable de représenter les relations de cause à effet entre les défauts et les symptômes [Ise97a].

Dans la plupart des cas, la représentation explicite emploie des sources de connaissance analytique. Cependant, elle peut utiliser des sources de connaissance heuristique [Ise94], [IU93]; tel est le cas des symptômes heuristiques qui sont représentés sous la forme de règles de production : SI

<SYMPTÔME> ALORS <CAUSE>. De même, la représentation implicite peut utiliser des connaissances analytiques ainsi que des connaissances heuristiques [Lei92].

### **Le niveau de la connaissance.**

Les modèles de bon et de mauvais fonctionnement représentent deux niveaux différents de connaissance [Lei93], [CGTT93] : le niveau objet et le meta niveau. Dans le niveau objet, la connaissance est utilisée afin de décrire le modèle de bon fonctionnement. Il s'agit seulement d'obtenir un modèle capable de reproduire le comportement du système lorsqu'il n'y a pas de défauts. En revanche, la connaissance du meta niveau a pour objectif de décrire le mauvais fonctionnement du système. Dans ce niveau, la connaissance est utilisée afin de trouver la cause (défaut) du dysfonctionnement (symptôme).

Il est clair que la connaissance du meta niveau est orientée et utilisée, pour le diagnostic; tandis que la connaissance du niveau objet se focalise plutôt sur la modélisation ou la description du comportement du système. Les équations I.1 et I.2 décrivent la connaissance du niveau objet (modèle) du comportement des états tandis que les équations I.8 à I.10 représentent le comportement des paramètres. Cependant la construction des résidus et des signatures nécessite la connaissance du meta niveau c'est-à-dire la connaissance de la tâche de diagnostic. Dans le paragraphe suivant, nous présentons les principales caractéristiques de cette tâche.

### **I.4.3 La tâche.**

D'après Isermann [Ise97a], la tâche de diagnostic a pour objectif de déterminer le type de défaut ainsi que les informations relatives à son amplitude, sa localisation et son temps d'apparition. Jusqu'à présent nous avons parlé du diagnostic en fonction des sous tâches (détection et localisation) ou des étapes (génération, évaluation et décision). Le diagnostic est-il une série de sous tâches ou une série d'étapes? Pour répondre à cette question il faut considérer le problème de diagnostic par rapport à la conception d'un produit. Selon Booch [Boo94], la conception d'un produit comprend quatre étapes : la spécification, le dessin, la construction et la mise en oeuvre.

- la spécification : elle consiste, d'une part, à établir les principales fonctions du produit et, d'autre part, à définir les limites du problème;
- le dessin : c'est le rassemblement et l'harmonisation des outils mathématiques qui vont permettre d'accomplir les fonctions;
- la construction : il s'agit de la sélection et de l'harmonisation des composants afin de construire le prototype du produit;
- la mise en oeuvre : c'est la vérification des caractéristiques du produit afin qu'il soit fonctionnel.

La Figure I.12 représente le synoptique du diagnostic en fonction des sous tâches [Ger91] et des étapes [CW84]. Au niveau de la spécification, du dessin et de la construction, les sous tâches de détection et de localisation sont accomplies à l'aide d'une étape de génération de résidus. En effet, la prise en compte du comportement des résidus ainsi que des signatures vont permettre de détecter et de localiser les défauts. Au niveau conceptuel le problème de diagnostic est résolu dans l'étape de génération de résidus car les résidus générés doivent posséder des caractéristiques particulières pour la détection et la localisation (cf. § I.3.2). Au niveau pratique (mise en oeuvre), le problème est résolu dans les étapes d'évaluation et de décision. En effet, les meilleures étapes d'évaluation et de décision s'avèrent incapables d'analyser et d'interpréter des informations qui n'existent pas dans les résidus

et/ou les signatures. Cependant il faut signaler que dans certains cas, par exemple dans la robustesse passive, les étapes d'évaluation et de décision jouent un rôle capital dans le diagnostic [Fra91a], [DJ96].

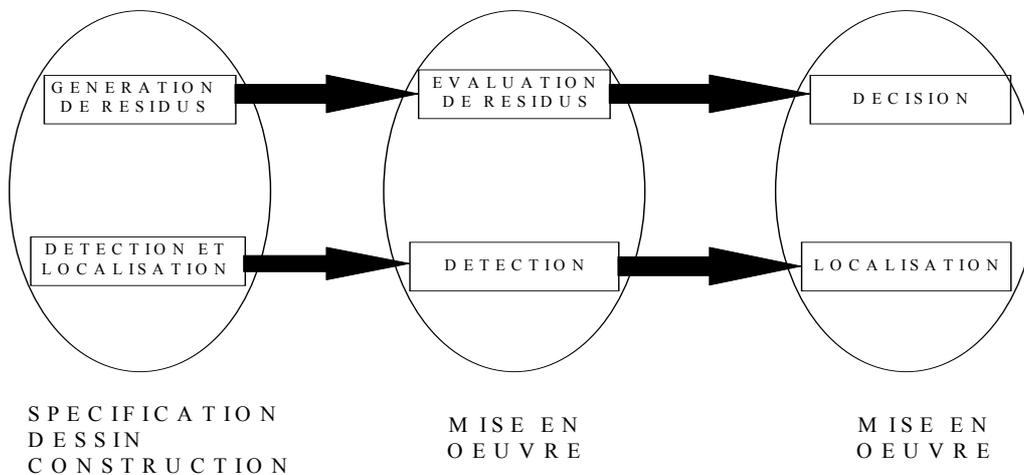


Figure I.12 : Les Sous Tâches et les Etapes du Diagnostic.

Les caractéristiques de la tâche sont utilisées afin d'identifier les problèmes de base du diagnostic. D'après Leitch [Lei93], les trois principales caractéristiques de la tâche sont la détection, la localisation et l'identification. Ces caractéristiques dépendent des contraintes imposées par les mesures et les moyens de calculs disponibles. Dans les paragraphes suivants, les caractéristiques et les contraintes seront présentées.

### Détection-localisation.

D'après Isermann [Ise97a] la détection consiste à signaler l'existence du défaut ainsi que son temps d'apparition tandis que la localisation a pour objectif de trouver le type de défaut. Parfois une méthode de diagnostic interne peut être utilisée pour signaler un dysfonctionnement dans le système. Par exemple Isermann [Ise94], [Ise93] utilise un banc d'observateurs seulement pour détecter, le plus rapidement possible, la rupture d'un forêt.

### Localisation-identification.

L'identification du défaut implique la connaissance de la l'amplitude de celui-ci [Fra91a]. Dans certains cas, la localisation ne suffit pas pour trouver la cause du défaut (cf. § I.5.3).

### Disponibilité des mesures.

D'une part, la performance du diagnostic augmente au fur et à mesure que le nombre de signaux augmente [Ise97a]. D'autre part, la disponibilité d'une mesure peut déterminer le choix de la méthode de diagnostic. En effet, si la sortie d'un actionneur ne peut pas être mesurée, alors l'actionneur devient un élément du système (gain ou constante de temps) [Ise94]. Dans ce cas, la méthode d'estimation paramétrique sera la plus adaptée pour le diagnostic des défauts sur l'actionneur.

## **Moyens de calcul.**

La mise en oeuvre des méthodes de diagnostic dépend des contraintes imposées par le temps, la complexité de calcul et le coût de l'équipement. Gertler et al. [GCFK95], [Ger91], [GC94] utilisent des équations de parité pour le diagnostic de défauts d'un moteur de voiture General Motors. La plupart de ces voitures sont équipées avec des microprocesseurs à huit bits. Il est alors nécessaire d'utiliser des algorithmes les plus simples possibles, par exemple les équations de parité et les algorithmes de détection par seuil.

## **Fiabilité du diagnostic.**

La fiabilité est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation (cf. § I.2.1). La maintenance, la reconfiguration et la protection définissent cette mission [Ise97a] tandis que le régime d'opération, normal ou dégradé, définit les conditions d'utilisation [Zwi95]. La reconfiguration permet de maintenir l'opération en régime normal ou dégradé. En revanche, la protection peut arrêter toute activité. Le régime dégradé implique que le système travaille en dessous des performances définies dans les spécifications techniques.

La prise en compte des caractéristiques de la tâche est très importante dans le choix des méthodes de diagnostic. Il ne faut pas oublier que le diagnostic a pour objectif de trouver la cause du défaut. Dans ce contexte, les caractéristiques du défaut sont aussi importantes que celles du modèle et de la tâche. Dans le paragraphe suivante, nous allons présenter les principales caractéristiques du défaut.

### **I.4.4 Le défaut.**

Les caractéristiques du défaut servent à définir les types de dysfonctionnements les plus rencontrés dans le système [Lei93]. En fait, elles ne représentent que des suppositions, car il est clair que le système peut tomber en panne de plusieurs façons. Cependant, certains défauts ont une fréquence d'apparition plus importante. Les caractéristiques du défaut peuvent être rassemblées dans trois grandes catégories, comme montré à la Figure I.13. Ces catégories sont la quantité, le comportement temporel et les hypothèses de fiabilité.

#### **Quantité.**

Par rapport à la quantité il existe deux types de défauts : le défaut unique et le défaut multiple. Le défaut unique est produit par le dysfonctionnement d'un seul capteur, actionneur ou système. Si le dysfonctionnement apparaît dans plusieurs éléments, le défaut est appelé défaut multiple. Les équations de parité sont une méthode de diagnostic bien adaptée pour les défauts uniques tandis que les observateurs et l'estimation paramétrique peuvent localiser soit des défauts uniques, soit des défauts multiples (cf. § II.2.4 et II.2.5).

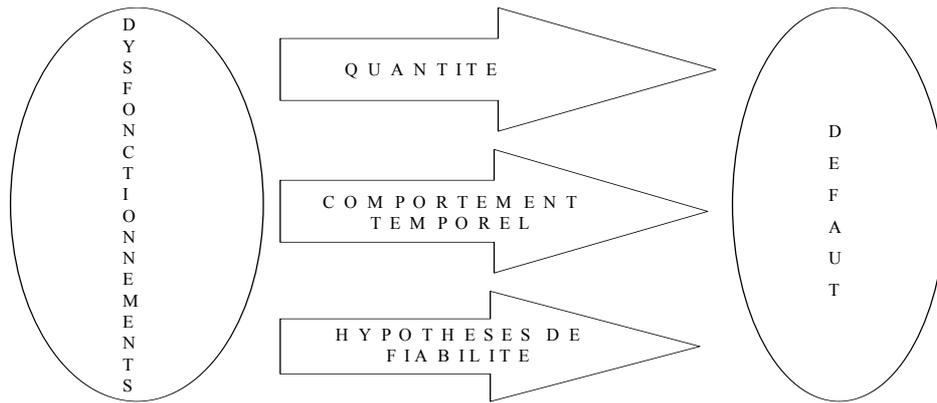


Figure I.13 : Les Caractéristiques du Défaut.

### Comportement temporel.

La vitesse d'apparition ainsi que la durée définissent le comportement temporel du défaut [Ise97a]. Par rapport à la vitesse d'apparition, les défauts peuvent être soudains ou progressifs.

- défaut soudain : la rupture d'un foret représente un exemple de ce type de défaut [Ise94]. Dans ce cas, le défaut ne peut pas être détecté par un examen de l'évolution des caractéristiques des résidus;
- défaut progressif : il s'agit d'un défaut qui peut être prévu par un examen ou une surveillance des résidus.

La durée du défaut est définie par la période de temps pendant laquelle le défaut est présent dans le système. Par rapport à la durée il y a deux types de défauts :

- défaut intermittent : le dysfonctionnement subsiste pendant une durée limitée, à la fin de laquelle l'élément retrouve son fonctionnement normal. Un tel défaut est souvent répétitif;
- défaut non intermittent : il s'agit d'un défaut qui est présent pendant une durée illimitée. Dans ce cas, l'élément retrouve son fonctionnement normal après avoir été soumis à une action corrective.

### Hypothèses de fiabilité.

Les hypothèses de fiabilité concernent notamment la validité des méthodes de diagnostic par rapport aux défauts additifs et multiplicatifs. En effet, dans la plupart des cas, l'emploi des équations de parité et des observateurs repose sur deux hypothèses [Ise94], [Ise97a], [Fra90].

- H1. la structure du système est bien connue;
- H2. la valeur des paramètres ne change pas.

Pour l'estimation paramétrique il est nécessaire de considérer une troisième hypothèse, en plus de H1.

- H3. il faut une condition d'excitation persistante.

Ces trois hypothèses constituent la base de la fiabilité des méthodes de diagnostic par rapport à la localisation de défauts, c'est-à-dire, l'aptitude du système de diagnostic à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation. Il est à noter que les caractéristiques du modèle de la tâche et du défaut ne sont pas des caractéristiques uniques et indépendantes. La connaissance du bon et du mauvais fonctionnement donne un cadre pour le choix d'un modèle qui sera utilisé afin d'accomplir une tâche dans le but de localiser un défaut. La conception du système de diagnostic n'est pas un processus séquentiel en boucle ouverte, comme montré à la Figure I.14.

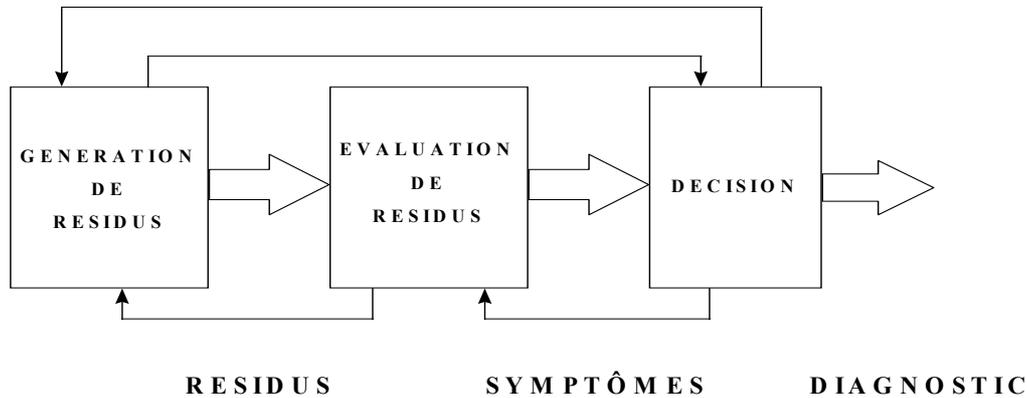


Figure I.14 : La Conception du Système de Diagnostic.

Les résidus sont générés en premier lieu afin de construire les signatures. Ils sont ensuite évalués pour obtenir les symptômes. Enfin, l'étape de décision permettra de localiser les défauts. Des interactions existent entre la génération, l'évaluation et la décision. Tel est le cas, par exemple, de la robustesse passive (décision - génération), du filtrage des résidus (évaluation - génération) et de la prise en compte du signe et/ou l'amplitude du symptôme (décision - évaluation).

## I.4.5 Conclusion.

La définition du cahier des charges est une étape incontournable dans la spécification du système de diagnostic. Les caractéristiques du modèle de la tâche et du défaut permettent de définir les limites du problème. Le modèle représente les types de connaissances utilisées dans le diagnostic. La relation entre les sous tâches et les étapes, ainsi que l'identification des problèmes de base sont décrites par la tâche. Enfin, les caractéristiques du défaut servent à définir les types de dysfonctionnements les plus rencontrés dans le système. Ces caractéristiques sont la quantité, le comportement temporel et les hypothèses de fiabilité.

Dans le paragraphe suivant, l'idée de base de notre travail de recherche est abordée. Il s'agit de la notion de fonction ou objectif particulier du diagnostic. La fonction est le concept de base dans l'approche fonctionnelle du diagnostic. Elle a pour objectif, d'une part, d'augmenter le nombre de défauts localisés et, d'autre part, d'obtenir une représentation qui soit plus proche des connaissances des ingénieurs en maintenance et/ou des opérateurs.

## I.5 La notion de fonction.

## I.5.1 Introduction.

La plupart des modèles utilisent des descriptions basées sur la structure et le comportement. La fonction est une interprétation subjective de ces deux caractéristiques. Milne [Mil87], Fink et al. [FL87], Abu-Hanna et al. [AB90] et Chitaro et al. [CGTT92], [CGTT93] ont été les premiers chercheurs à proposer et à utiliser la notion de fonction. Dans le diagnostic basé sur le modèle, la fonction a pour objectif, d'une part de choisir la représentation la plus convenable du modèle et, d'autre part, d'améliorer les performances du diagnostic.

L'emploi explicite de la notion de fonction dans le diagnostic est appelé l'approche fonctionnelle [ABJ91], [Fra91b]. Afin de mieux comprendre un modèle, il est parfois avantageux de regarder son objectif d'une façon plus globale. Les concepts et les abstractions permettent de représenter cette vue globale. La fonction est un type d'abstraction qui caractérise un objectif particulier car la fonction est une interprétation subjective de la structure et du comportement. Dans les paragraphes suivants, nous abordons les définitions de concept et d'abstraction. Ensuite, nous présentons les trois espaces d'abstraction afin de mieux comprendre le rôle de la notion de fonction dans le diagnostic. Enfin, nous étudions un exemple pour introduire l'idée de base de notre recherche, c'est-à-dire la notion de fonction dans la localisation de défauts.

## I.5.2 Les espaces d'abstraction.

Une abstraction fait ressortir les caractéristiques essentielles d'un objet. Le choix des caractéristiques dépend du point de vue de l'observateur. Ces caractéristiques servent également à différencier les objets. Enfin, les caractéristiques essentielles permettent de définir un concept. Les concepts sont des constructions mentales qui ont un contenu et un champ d'application. La relation élémentaire entre les concepts est leur lien, c'est-à-dire : un concept X a une caractéristique principale qui est décrite par le concept Y [Hau92]. La Figure I.15 montre deux différentes abstractions pour un réseau RC.

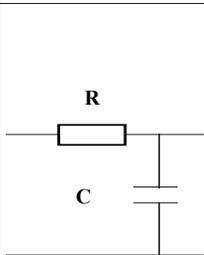
OBJET	OBSERVATEUR	ABSTRACTION	
		CONCEPT X	CONCEPT Y
	ELECTRONICIEN	FILTRE PASSE BAS	REJETER LES FREQUENCES HAUTES
	AUTOMATICIEN	RESEAU DE COMPENSATION	DIMINUER L'ERREUR DU REGIME STABLE

Figure I.15 : L'Abstraction et le Concept.

Dans le domaine du Génie Electronique, l'observateur (électronicien) regarde un filtre. Cette abstraction identifie un comportement souhaité afin de rejeter les hautes fréquences. Cependant dans le domaine de la Commande Automatique l'observateur (automaticien) regarde un réseau de compensation qui a pour objectif de diminuer l'erreur en régime stable. Des observateurs différents classent le même objet de différentes façons. Dans ce contexte, le modèle du système donne une représentation, la mieux adaptée, par rapport à un objectif particulier. Un modèle est seulement une représentation partielle du système et dépend des interprétations subjectives de l'observateur.

Dans le diagnostic la représentation du modèle est définie par l'abstraction du défaut [CGTT93], [ABJ91]. Or, il existe deux observateurs : l'expert qui décrit le modèle, et l'utilisateur qui doit interpréter cette description. Il est donc nécessaire de trouver dans un premier temps les meilleures représentations et ensuite leur lien pour augmenter la performance du diagnostic. Reprenons, par exemple, la classification de défauts additifs et multiplicatifs présentée au paragraphe I.3.1. La Figure I.16 montre le synoptique du lien entre le défaut de l'expert et celui de l'utilisateur.

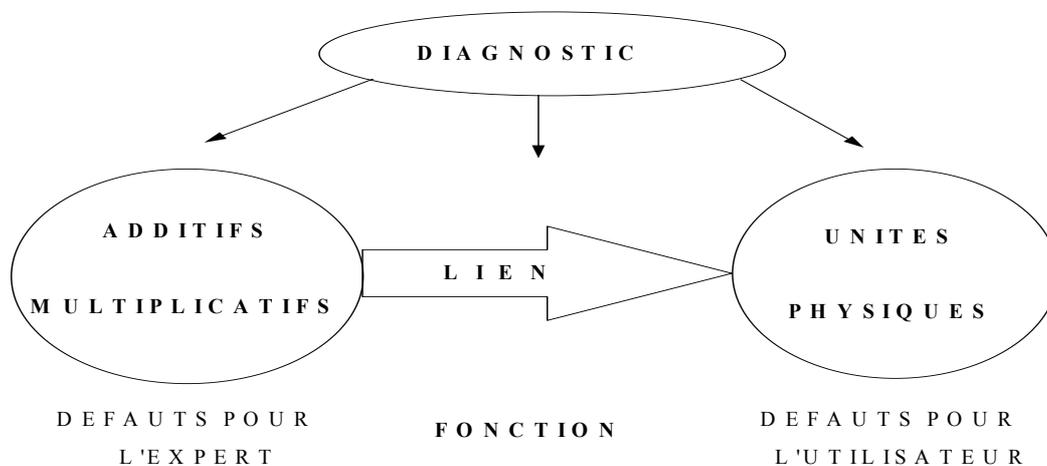


Figure I.16 : Le Lien entre l'Expert et l'Utilisateur.

Ainsi doit on considérer la dichotomie suivante: Dans le domaine de l'expert, les défauts produisent des variations dans les matrices ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) ou les états ( $X(t)$ ). C'est-à-dire, pour l'expert il s'agit de défauts additifs et multiplicatifs. Dans le domaine de l'utilisateur les défauts produisent des dysfonctionnements dans les unités physiques. Il s'agit donc de changer ou de réparer ces unités. Le lien entre l'expert et l'utilisateur est défini par la fonction ou objectif particulier du diagnostic [ABJ91], [CGTT93].

Considérons, par exemple, un système quelconque où l'ingénieur de maintenance est intéressé par le diagnostic des défauts de type capteur. Supposons que le modèle est représenté à l'aide d'équations d'état. Les équations de parité ou les observateurs sont choisis pour l'étape de génération de résidus. Ces deux méthodes sont les plus adaptées pour le diagnostic des défauts de type capteur, car dans la plupart des cas, les défauts des capteurs produisent des effets additifs dans les équations d'état [Ise94], [HP94]. Enfin, il faut choisir des résidus structurés et des signatures avec une structure canonique pour localiser le capteur défaillant. Si l'ingénieur en maintenance est intéressé par le diagnostic des défauts de type composant il est clair que la démarche la plus convenable sera de choisir un modèle de régression et une méthode d'identification de paramètres.

Il est à noter que le lien entre les éléments du système (capteur, actionneur, composant ou paramètre) et les défauts (additifs et multiplicatifs) est moins net qu'il n'y paraît au premier abord. En

effet, le défaut d'un capteur peut avoir soit des effets additifs soit des effets multiplicatifs dans le système.

D'après Isermann [Ise94], les changements statiques (gains) produisent des effets additifs dans le système. En revanche, les changements dynamiques (contamination ou intermittence) produisent des effets multiplicatifs.

Le benchmark d'un système électromécanique présenté par Blanke et al. [BBJP95] nous permettra de clarifier le rôle, mais également l'importance, de l'objectif particulier ou fonction dans le diagnostic. Il s'agit d'un actionneur électromécanique pour un moteur diesel. La description des défauts du capteur de position et de l'actionneur est la suivante :

- défaut capteur : il s'agit d'un défaut temporel (0,2 s.) et intermittent du capteur de position. Le défaut est produit par le vieillissement ou la poussière;
- défaut actionneur : l'actionneur est un moteur à courant continu, le défaut est produit, soit par la rupture du fil électrique, soit par un mauvais fonctionnement des commutateurs. Ce défaut empêche le moteur de tourner dans un sens, la source de puissance étant incapable de fournir des courants négatifs au moteur.

Ces deux défauts sont multiplicatifs car ils sont produits par des changements dynamiques [Ise94], [BBJP95]. Cependant afin de faciliter la détection et la localisation, les défauts multiplicatifs sont modélisés en tant que défauts additifs [BBJP95]. En effet dans le benchmark, le diagnostic des défauts de type capteur et actionneur repose sur une description additive des défauts, même si ceux-ci produisent des effets multiplicatifs dans le système. Un modèle est ainsi correct s'il est capable d'accomplir son objectif [Lei92].

L'exemple du benchmark nous a permis d'illustrer que la connaissance du système (expert et utilisateur) joue un rôle capital dans la représentation (modèle) et l'interprétation (abstraction) de l'objectif particulier (fonction) du diagnostic. En effet, la capacité humaine de raisonnement dépend des types de connaissances utilisées et de leur classification (cf. § I.2.3). D'après Abu-Hana et al. [ABJ91] et Chitaro et al. [CGTT92], [CGTT93] la connaissance peut être classée dans trois espaces, comme le montre la Figure I.17 : l'espace de l'expert ou noyau, l'espace d'abstraction et l'espace de l'utilisateur.

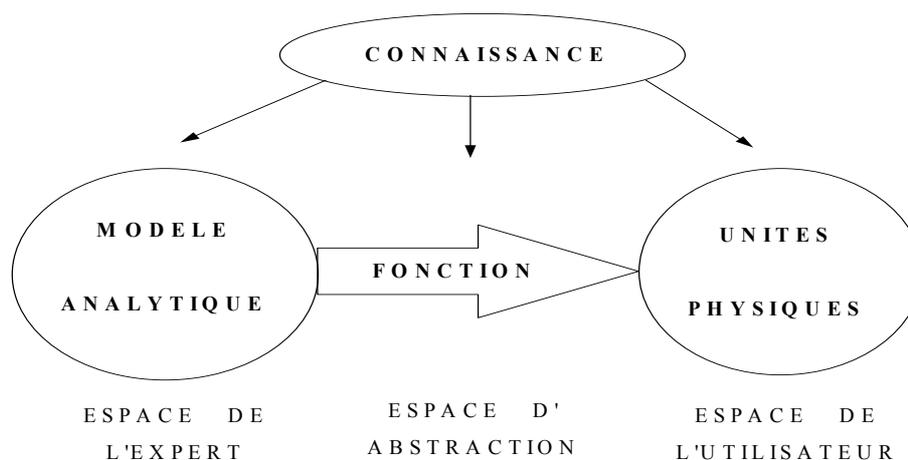


Figure I.17 : Les Trois Espaces de la Connaissance.

L'espace de l'expert, ou espace du noyau, est composé des équations du modèle qui décrivent le système. L'espace d'abstraction représente un objectif particulier ou une fonction. La fonction est une interprétation subjective de l'espace de l'expert, afin de la rendre compréhensible dans l'espace de l'utilisateur. Dans le cas du diagnostic, cet espace est défini, soit par l'ingénieur de maintenance, soit par l'opérateur.

La prise en compte de la notion de fonction permet de mieux comprendre les modèles et leurs interprétations. Dans le paragraphe suivant, nous allons montrer les avantages de la notion de fonction pour la localisation de défauts.

### I.5.3 La fonction dans la localisation de défauts.

Un système peut être modélisé de plusieurs façons, chaque modèle représente une interprétation subjective par rapport au point de vue de l'observateur. Jusqu'à présent, nous avons parlé des unités physiques dans l'espace de l'utilisateur, cependant il y a d'autres interprétations qui peuvent être compréhensibles pour l'ingénieur de maintenance ou l'opérateur. Dans ce paragraphe, nous montrons les avantages de la notion de fonction pour la localisation de défauts. A cet effet, nous étudions un exemple présenté par Isermann et al. [IB96]. Il s'agit d'un actionneur électromécanique qui est composé d'un moteur à courant continu et d'une valve à obturateur, Figure I.18.

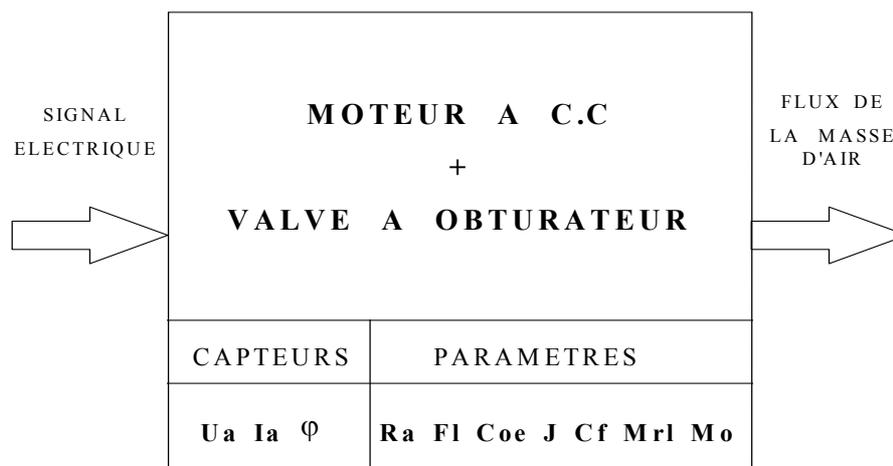


Figure I.18 : Actionneur Electromécanique.

Le moteur à courant continu règle l'ouverture de l'obturateur de la valve. L'actionneur électromécanique (moteur + valve) a pour objectif de contrôler le flux de la masse d'air dans la chambre de combustion d'une voiture. Dans cet exemple trois capteurs ( $U_a$ ,  $I_a$ ,  $\varphi$ ) et sept paramètres ( $R_a$ ,  $\Phi$ ,  $C_{oe}$ ,  $J$ ,  $M_{rl}$ ,  $M_o$ ,  $C_f$ ) décrivent le modèle de l'actionneur :

#### CAPTEURS

#### PARAMETRES

$U_a$  tension de l'armature du moteur  
 $I_a$  courant de l'armature du moteur

$R_a$  résistance de l'armature du moteur  
 $\Phi$  flux magnétique du moteur

$\varphi$	angle d'obturation de la valve	Coe	gain statique du moteur
		J	constante d'inertie du moteur
		Mrl	constante de frottements visqueux du moteur
		Mo	gain statique de la valve
		Cf	constante de raideur du ressort de la valve

La Figure I.19 décrit les quatorze défauts qui ont été générés au niveau de l'actionneur. Ces défauts correspondent à trois classes : défauts capteurs (F9 à F14), défauts paramètres (F1, F2, F6, F7, F8) et défauts composants (F3 à F5). Dans la plupart des cas, les systèmes de diagnostic utilisent une combinaison de méthodes internes (espace de parité, observateurs et estimation paramétrique) [Ise94], [HP94], [Höf95], [HI96], [Ise97a], [IP96], [Ise97b]. Plusieurs raisons justifient cette combinaison de méthodes :

- la description des modèles : les équations de parité et les observateurs sont les méthodes de diagnostic les plus adaptées pour la détection et la localisation des défauts additifs [Ise94], [HP94];
- le temps de la détection : dans les équations de parité et les observateurs, le temps de détection est inférieur à celui de l'estimation paramétrique [JJ93], [HP94];
- la localisation : l'information fournie par l'estimation paramétrique permet une localisation plus précise du défaut [IP96], [HI96].

DEFAUT	DESCRIPTION
F 1	AUGMENTATION DE LA TENSION DU RESSORT DE LA VALVE
F 2	DIMINUTION DE LA TENSION DU RESSORT DE LA VALVE
F 3	COURT CIRCUIT DANS LE COMMUTATEUR DU MOTEUR
F 4	COURT CIRCUIT DANS LE FIL DE L'ARMATURE DU MOTEUR
F 5	RUPTURE DANS LE FIL DE L'ARMATURE DU MOTEUR
F 6	RESISTANCE EN SERIE DANS L'ARMATURE DU MOTEUR
F 7	RESISTANCE EN PARALLELE DANS L'ARMATURE DU MOTEUR
F 8	AUGMENTATION DE LA FRICTION DANS LA BOITE DE REDUCTION VITESSE
F 9	BIAIS SUR LE CAPTEUR $U_a$
F 10	BIAIS SUR LE CAPTEUR $I_a$
F 11	BIAIS SUR LE CAPTEUR $\varphi$
F 12	MAUVAIS FACTEUR D'ECHELLE SUR LE CAPTEUR $U_a$
F 13	MAUVAIS FACTEUR D'ECHELLE SUR LE CAPTEUR $I_a$
F 14	MAUVAIS FACTEUR D'ECHELLE SUR LE CAPTEUR $\varphi$

Figure I.19 : Défauts de l'Actionneur Electromécanique.

Pour le diagnostic de défauts dans l'actionneur, Isermann et al. [IB96] utilisent les équations de parité et l'estimation paramétrique. La Figure I.20 montre les signatures, pour chaque défaut, obtenues par les équations de parité et l'estimation paramétrique. Les équations de parité sont utilisées afin de détecter et localiser les défauts de capteurs ( $U_a$ ,  $I_a$ ,  $\varphi$ ), tandis que l'estimation paramétrique est utilisée afin de détecter et localiser les défauts de paramètres et de composants.

Trois remarques s'imposent :

- les signatures de l'estimation paramétrique et des équations de parité sont sensibles à tous les défauts, c'est-à-dire que les deux méthodes de diagnostic sont capables de détecter tous les défauts de l'actionneur;
- l'estimation paramétrique permet la localisation de tous les défauts, car il n'y a pas de signatures identiques;
- les équations de parité ne sont pas capables de localiser tous les défauts, car certaines signatures sont identiques (F1-F3-F8, F2-F11-F14, F4-F10-F13, F5-F6, F9-F12).

DEFAUT	ESTIMATION PARAMETRIQUE							EQUATIONS DE PARITE			
	Ra	F1	Coe	J	Cf	Mrl	Mo	S1	S2	S3	S4
F1	0	0	0	0	0	0	--	+	-	+	-
F2	0	0	0	0	0	0	++	0	+	-	0
F3	--	--	0	+	+	++	0	+	-	+	-
F4	0	--	0	+	+	++	0	+	0	+	-
F5	++	-	0	0	+	++	+	-	-	+	+
F6	++	0	0	0	0	0	0	-	-	+	+
F7	--	--	0	0	+	++	0	+	+	+	-
F8	0	0	0	+	+	++	0	+	-	+	-
F9	0	0	+	0	0	0	0	-	-	0	+
F10	0	0	-	0	0	0	+	+	0	+	-
F11	0	0	0	0	0	0	-	0	+	-	0
F12	+	+	+	+	+	+	+	-	-	0	+
F13	-	0	0	+	+	+	+	+	0	+	-
F14	0	-	0	-	-	-	+	0	+	-	0

**0** pas de changement de la valeur du résidu  
**+** augmentation de la valeur du résidu  
**++** grande augmentation de la valeur du résidu  
**-** diminution de la valeur du résidu  
**--** grande diminution de la valeur du résidu

Figure I.20 : Les Signatures de Défauts de l'Actionneur.

Il faut signaler que les équations de parité ont été construites afin de détecter et localiser les défauts de type capteur. Cependant lors de l'apparition des défauts de type composant ou paramètre, les signatures des équations de parité perdent leur capacité à localiser les défauts de capteurs. Dans ce contexte, les équations de parité ne peuvent être utilisées que pour la détection de défauts.

Afin d'augmenter le nombre de défauts localisés par les équations de parité, nous proposons d'observer l'actionneur d'une façon plus globale. Les concepts et les abstractions nous permettent de représenter cette vue globale en utilisant la notion de fonction. Par exemple, nous pouvons nous intéresser au comportement de l'actionneur (électrique et mécanique) plutôt que de regarder les

éléments (capteur, paramètre, composant). Dans ce contexte, la fonction ou objectif particulier du diagnostic devient la localisation et la détection des défauts électriques et mécaniques dans l'actionneur électromécanique.

Au premier abord, cette dernière phrase peut paraître redondante, néanmoins elle nous amène à une réflexion intéressante concernant la prise en compte de la connaissance des caractéristiques de l'actionneur dans la localisation de ses défauts. La Figure I.21 montre le principe de base de la notion de fonction dans la localisation de défauts. Les équations de parité sont utilisées dans l'espace de l'expert afin de localiser les défauts. La fonction, ou objectif particulier, doit être choisie dans l'espace d'abstraction pour augmenter le nombre de défauts localisés. Ce choix repose sur la connaissance des signatures des équations de parité. Dans l'espace de l'utilisateur, les unités physiques sont classées par rapport à leur fonction électrique ou mécanique.

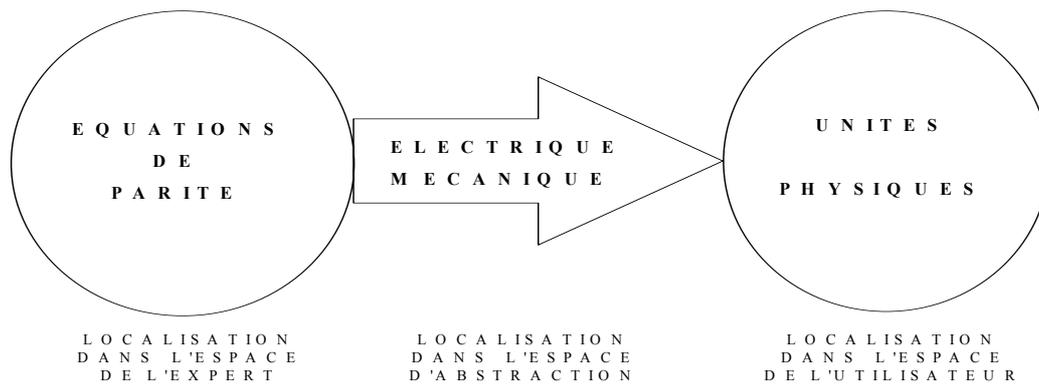


Figure I.21 : La Localisation dans les Trois Espaces de la Connaissance.

La Figure 1.22 présente les quatorze défauts de l'actionneur électromécanique et les signatures des équations de parité. Dans l'espace de l'expert il est possible de localiser un défaut (F7).

LOCALISATION DANS L'ESPACE DE L'EXPERT					LOCALISATION DANS L'ESPACE DE L'UTILISATEUR	
	EQUATIONS DE PARITE				ABSTRACTION FONCTIONNELLE	DESCRIPTION DES DEFAUTS
	S1	S2	S3	S4		
F1	+	-	+	-	DEFAUTS MECANIQUES	AUG. TENSION RESSORT
F3	+	-	+	-		COURT CIRCUIT COMMUTATEUR
F8	+	-	+	-		AUG. FRICTION BOITE VITESSE
F2	0	+	-	0	MECANIQUES	DIMINUTION TENSION RESSORT
F11	0	+	-	0		BIAIS CAPTEUR $\varphi$
F14	0	+	-	0		MAUVAISE ECHELLE CAPTEUR $\varphi$
F4	+	0	+	-	DEFAUTS ELECTRIQUES	COURT CIRCUIT FIL ARMATURE
F10	+	0	+	-		BIAIS CAPTEUR $I_a$
F13	+	0	+	-		MAUVAISE ECHELLE CAPTEUR $I_a$
F5	-	-	+	+	ELECTRIQUES	RUPTURE FIL ARMATURE
F6	-	-	+	+		RESISTANCE EN SERIE
F7	+	+	+	-		RESISTANCE EN PARALLELE
F9	-	-	0	+	DEFAUTS ELECTRIQUES	MAUVAISE ECHELLE CAPTEUR $U_a$
F12	-	-	0	+		BIAIS CAPTEUR $U_a$

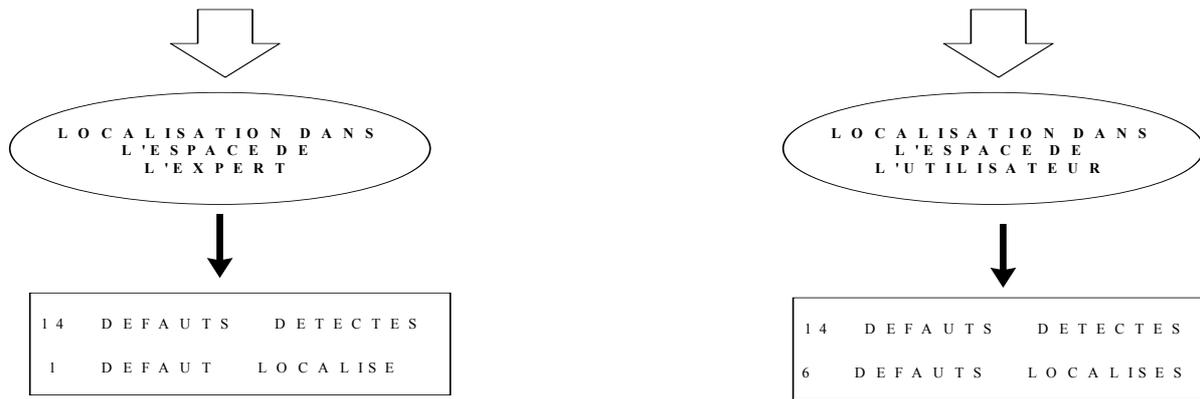


Figure I.22 : La Fonction dans la Localisation de Défauts.

En effet, l'expert regarde les signatures par rapport aux éléments de l'actionneur (capteurs, composants et paramètres). Dans ce cas, il est impossible de faire la différence, par exemple, entre F11 (défaut capteur) et F2 (défaut paramètre). En revanche, dans l'espace de l'utilisateur, il est possible de localiser six défauts. L'utilisateur regarde les signatures par rapport à la fonction électrique ou mécanique des unités physiques. La même signature dans F2 et F11 n'est pas un problème pour la localisation du défaut, car ces unités physiques sont liées à une fonction mécanique (tension, angle d'obturation) de la valve.

Fixer la fonction ou objectif particulier dans l'espace d'abstraction consiste à choisir une interprétation subjective, la plus convenable pour le diagnostic. En fait, il s'agit de classifier les défauts par rapport à cette interprétation subjective. L'exemple de l'actionneur électromécanique nous a permis de montrer les avantages de l'approche fonctionnelle du diagnostic. Dans cette approche, les modèles et leurs interprétations sont corrects s'ils sont capables d'accomplir leur fonction ou objectif particulier.

## I.5.4 Conclusion.

La fonction est le lien entre l'espace de l'expert et celui de l'utilisateur. La prise en compte de ce lien dans la tâche de diagnostic nous permet de choisir l'interprétation la plus convenable du défaut. En effet, la fonction est une interprétation subjective qui dépend du point de vue de l'observateur.

Les effets entre les défauts additifs et multiplicatifs dans les signatures sont un problème majeur dans le diagnostic. L'exemple que nous avons abordé dans la section précédente montre les effets de la variation des paramètres dans les signatures des équations de parité. Lors de ces variations, les résidus structurés deviennent non structurés et, en conséquence, la localisation du défaut n'est plus possible.

L'emploi de la notion de fonction permet d'une part d'augmenter le nombre de défauts localisés et, d'autre part, d'obtenir une représentation plus naturelle c'est-à-dire plus proche des connaissances des ingénieurs en maintenance et des opérateurs. La notion de fonction a été abordée d'une façon plutôt intuitive mais précise. Elle nous a permis de montrer l'importance et les avantages de l'interprétation des signatures. Dans le chapitre III, nous aborderons la notion de fonction d'une façon plus rigoureuse afin de formaliser et de généraliser son utilisation dans l'espace de parité, les observateurs et l'estimation des paramètres. A cet effet, nous allons définir un modèle ontologique de la détection et localisation de défauts.

## **I.6 Conclusion.**

Ce premier chapitre nous a permis de rappeler les définitions de base du diagnostic puis de présenter l'idée centrale de notre travail de recherche : la notion de fonction dans la localisation de défauts. La connaissance a priori du système est une étape incontournable dans le diagnostic. Le choix des modèles, des résidus et des signatures repose sur la connaissance de bon et de mauvais fonctionnement alors que le raisonnement ou interprétation dépend des types de connaissance utilisés et de leur classification.

Il est à noter que dans le diagnostic, l'information fournie par les modèles doit être interprétée par les ingénieurs de maintenance et par les opérateurs. Ainsi, il est nécessaire de trouver des représentations capables de garder le sens physique des modèles. Pour répondre à ce besoin, le système peut être modélisé par rapport aux unités physiques (actionneurs, composants et capteurs).

Aucune méthode de diagnostic n'est capable de détecter et localiser n'importe quel type de défaut. Il est nécessaire de définir un cahier des charges du diagnostic afin d'établir les limites du problème. Le modèle, la tâche et le défaut sont les principales caractéristiques qui définissent le cahier des charges. Ces caractéristiques ont pour objectif d'identifier le type de connaissance utilisée dans le modèle, d'établir les liens entre les étapes et les sous tâches de diagnostic, et enfin de définir les types de dysfonctionnements les plus rencontrés dans le système.

La prise en compte explicite du lien qui existe entre l'espace de l'expert (équations) et l'espace de l'utilisateur (unités physiques) est très importante dans le diagnostic. Ce lien est appelé fonction et constitue la base de l'approche fonctionnelle du diagnostic. L'emploi de la notion de fonction dans la localisation de défauts permet d'augmenter le nombre de défauts localisés. La notion de fonction constitue donc un moyen d'améliorer la performance de la tâche de diagnostic.

Le chapitre II sera consacré à la présentation des méthodes internes du diagnostic, à l'étude de leurs points communs et enfin à l'analyse de sensibilité des résidus.



# **Chapitre II**

## **La Génération de Résidus**

### **II.1 Introduction.**

Ce chapitre présente la génération de résidus à partir de modèles continus ainsi qu'une étude de sensibilité des résidus de l'espace de parité par rapport aux défauts additifs et multiplicatifs.

Le paragraphe II.2 est consacré à l'étude du modèle parallèle, de l'espace de parité, des observateurs et de l'estimation paramétrique ainsi qu'aux Filtres de Variables d'Etat. La sensibilité des résidus dépend du point d'opération et du type d'entrées du système.

Le paragraphe II.3 aborde le sujet de la sensibilité des résidus. L'étude de la sensibilité a pour objectif de calculer la variation des résidus lors de l'apparition de défauts additifs et multiplicatifs. Cette variation est utilisée afin de définir le seuil permettant de détecter un changement de la moyenne et d'écart type.

### **II.2 Méthodes internes du diagnostic.**

#### **II.2.1 Introduction.**

Les méthodes internes de diagnostic utilisent un modèle pour décrire les relations de cause (défaut) à effet (symptôme) dans le système. Les résidus sont générés par comparaison des sorties du modèle et du système, Dans la plupart des cas, le modèle repose sur la connaissance de la structure et

du comportement. En effet, le modèle parallèle, l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique utilisent la structure et le comportement afin de générer les résidus.

Dans le modèle parallèle, la structure est représentée par les unités physiques (capteurs, actionneurs etc.) et le comportement est décrit par les équations qui caractérisent ces unités. La structure de l'espace de parité, des observateurs et de l'estimation paramétrique est représentée par les variables et les constantes des équations tandis que le comportement est décrit par les opérateurs mathématiques (signe, dérivée etc.)

Il est à noter que le modèle parallèle cherche une représentation orientée vers l'espace de l'utilisateur (unités physiques). En revanche, l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique sont des méthodes de diagnostic orientées plutôt vers l'espace de l'expert (équations). La représentation en continu des modèles ainsi que la notion de fonction nous permettent de rapprocher ces trois méthodes de l'espace de l'utilisateur. Dans le paragraphe suivant, les principales caractéristiques du modèle parallèle sont étudiées.

## II.2.2 Le modèle parallèle.

Le modèle parallèle, ou modèle de simulation, a pour objectif de reproduire le comportement du système. En fait, il s'agit d'un modèle de référence qui a la même structure et le même comportement du système vis-à-vis des entrées, des sorties et des composants. La Figure II.1 montre le schéma d'un système en boucle fermée [DH95], [Dor92]. Le système est constitué de trois éléments qui sont le comparateur ( $\Sigma$ ), la chaîne directe (G) et la chaîne de retour (H). Le système présente une entrée (R) et une sortie (C); E désigne le signal d'erreur et B le signal de retour primaire.

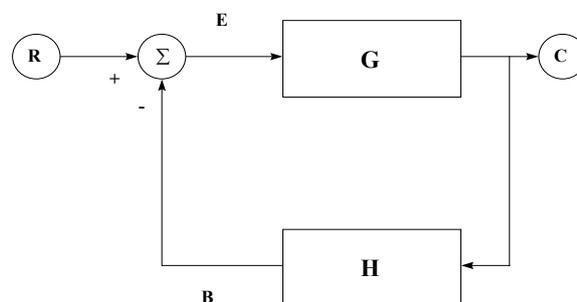


Figure II.1 : Système en Boucle Fermée.

La structure est décrite au moyen des éléments et de leurs connexions. La matrice adjacente permet de représenter la structure des systèmes [GT87], [GG94]. Il s'agit d'une matrice carrée où chaque ligne et colonne sont associées à un élément, comme le montre le Tableau II.1.

	R	S	G	C	H
R	0	1	0	0	0
S	0	0	1	0	0
G	0	0	0	1	1
C	0	0	0	0	0
H	0	1	0	0	0

Tableau II.1 : Matrice Adjacente.

La matrice est remplie ligne par ligne et colonne par colonne. Un "0" dans la ligne  $i$  et la colonne  $j$  signifie que l'élément de la ligne  $i$  n'a aucune influence ou connexion vers l'élément de la colonne  $j$ . En revanche, un "1" dans la ligne  $i$  et la colonne  $j$  signifie que l'élément de la ligne  $i$  a une connexion vers l'élément de la colonne  $j$ .

Le comportement est décrit par les équations qui représentent les caractéristiques statiques et dynamiques des éléments. Les équations II.1 à II.4 décrivent le comportement statique de la Figure II.1.

$$C = G E$$

(II.1)

$$B = H C$$

(II.2)

$$E = R - B$$

(II.3)

$$\frac{C}{R} = \frac{G}{1 + G H}$$

(II.4)

L'équation II.4 représente la principale caractéristique des systèmes en boucle fermée. S'il existe des comportements dynamiques dans le système, les équations peuvent être décrites, par exemple, à l'aide de l'opérateur de Laplace. Les équations II.1 à II.4 deviennent alors :

$$C(s) = G(s) E(s)$$

(II.5)

$$B(s) = H(s) C(s)$$

(II.6)

$$E(s) = R(s) - B(s)$$

(II.7)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) H(s)}$$

(II.8)

Bien que les équations décrivent le comportement du système, il est à noter que ces équations sont construites à partir des éléments et de leurs connexions.

Après avoir présenté les notions de structure et de comportement, le modèle parallèle est étudié dans le but de générer les résidus. Un bloc capable de reproduire le comportement d'un système est appelé modèle parallèle. Ce concept est utilisé dans plusieurs domaines et avec des noms divers, par exemple :

- commande adaptative : modèle de référence [Lan79] et filtre de variables d'état [ILM92];
- diagnostic : modèle du système [Lei93], modèle en boucle ouverte [CW84], modèle parallèle [LS87], modèle de simulation [JB86] et diagnostic de niveau 1 [Zwi95];

- estimation paramétrique : modèle de référence [Lan79] et modèle parallèle [Coi92];
- intelligence artificielle : modèle de prédiction et modèle qualitatif [Lei92].

D'après ces travaux, la définition utilisée dans ce mémoire pour le modèle parallèle est la suivante : une description qui repose sur la structure et le comportement du système et qui est capable de reproduire le comportement de celui-ci en connaissant ses entrées. La Figure II.2 montre un système en boucle fermée et la génération des résidus à partir d'un modèle parallèle. Le système est composé de trois blocs, un contrôleur  $G_c$ , un actionneur  $G_a$  et un sous-système  $G_s$ ;  $R$  est l'entrée et  $C$  la sortie du système.

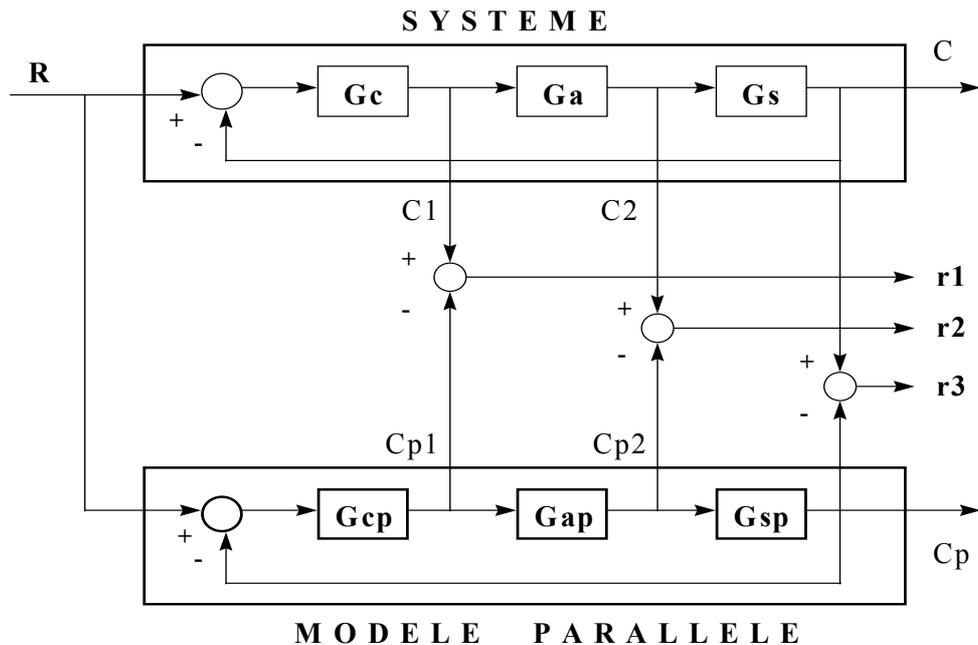


Figure II.2 : Génération de Résidus avec le Modèle Parallèle.

Le modèle parallèle doit comporter trois blocs ( $G_{cp}$ ,  $G_{ap}$  et  $G_{sp}$ ) et la boucle de retour, afin d'avoir la même structure que le système. Par ailleurs, chacun des blocs du modèle parallèle doit être capable de reproduire le comportement de son homologue dans le système. Dans ce contexte et sous l'hypothèse qu'il n'existe pas de défauts, les signaux des blocs des sorties du système ( $C_1$ ,  $C_2$  et  $C$ ) seront identiques à ceux des sorties des blocs du modèle parallèle ( $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$  et  $C_p$ ). En revanche, lors de l'apparition d'un défaut, il y a un écart entre les sorties du modèle et celles du système. Les résidus ( $r_1$ ,  $r_2$  et  $r_3$ ) obtenus à partir du modèle parallèle sont décrits par les équations II.9 à II.11

$$r_1 = C_1 - C_{p1} \quad (\text{II.9})$$

$$r_2 = C_2 - C_{p2} \quad (\text{II.10})$$

$$r_3 = C - C_p \quad (\text{II.11})$$

En effet la génération de résidus (cf. § I.2.2) repose sur la comparaison entre les observations (sorties du système) et les valeurs de référence (modèle parallèle). Les équations II.12 à II.14 représentent les équations de parité obtenues à partir du modèle parallèle.

$$e_{p1} = C_1 - C_{p1}$$

(II.12)

$$e_{p2} = C_2 - C_{p2}$$

(II.13)

$$e_{p3} = C_3 - C_{p3}$$

(II.14)

Le diagnostic de défauts utilisant un modèle parallèle implique d'une part la connaissance de la structure et son comportement, et d'autre part, un modèle très précis. Le modèle parallèle a été utilisé avec succès pour le diagnostic de systèmes assez complexes aussi bien dans le cas statique que dans le cas dynamique. Par exemple, Zwingelstein [Zwi95] utilise un modèle dynamique pour le diagnostic de défauts d'une centrale nucléaire à eau pressurisée. De même, Lapus [LS87] utilise un modèle statique pour le diagnostic de défauts d'un réseau de distribution de gaz. D'après Isermann [Ise97a], la performance du diagnostic augmente au fur et à mesure que le nombre de signaux mesurés augmente. L'avantage du modèle parallèle réside dans la disponibilité et l'utilisation des sorties de chacun des blocs du système. Il est à noter que les résidus du modèle parallèle sont des équations de parité obtenues à partir des représentations entrées-sorties de chacun des blocs ( $G_{cp}$ ,  $G_{ap}$ ,  $G_{sc}$ ). Pour garder le sens physique des modèles, le système peut être modélisé à l'aide de modèles continus. L'élément clé dans la représentation des modèles en continu est l'obtention des dérivées des équations. Les Filtres de Variables d'Etat permettent d'obtenir ces dérivées. Ces filtres sont présentés dans le paragraphe suivant.

### II.2.3 Les Filtres de Variables d'Etat (FVE).

Considérons un système linéaire monovariante invariant d'ordre  $n$  régi par l'équation différentielle suivante :

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^{n-i} y(t)}{dt^{n-i}} = \sum_{j=0}^m b_j \frac{d^{m-j} u(t)}{dt^{m-j}}$$

(II.15)

où :

$u(t)$  et  $y(t)$  sont les signaux d'entrée et de sortie mesurables;

$\frac{d^i y(t)}{dt^i}$  et  $\frac{d^j u(t)}{dt^j}$  sont les dérivées successives de  $u(t)$  et  $y(t)$ ;

avec :

$$a_0 = 1;$$

$$m \leq n;$$

$$i=0, \dots, n;$$

$$j=0, \dots, m.$$

Ce modèle utilise les dérivées des signaux  $u(t)$  et  $y(t)$ , qui sont malheureusement rarement mesurables. La dérivation directe des signaux n'est pas une solution recommandable car cette procédure entraîne l'augmentation des niveaux de bruit [MH72], [Che84], [Oga87]. Plusieurs méthodes ont été proposées pour résoudre ce problème; celles-ci peuvent être regroupées en trois grandes classes [UR87], [Gar95] : les filtres linéaires, les fonctions de modulation et les méthodes intégrales. Dans ce mémoire, nous considérons uniquement les filtres linéaires et plus particulièrement les filtres de variables d'état (FVE).

En présence des conditions initiales nulles, la transformée de Laplace du système décrit par l'équation II.15 donne :

$$A(p)Y(p) = B(p)U(p) \quad (\text{II.16})$$

avec :

$$A(p) = p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n \quad (\text{II.1})$$

7)

$$B(p) = b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m \quad (\text{II.1})$$

8)

Les signaux d'entrée/sortie et leurs dérivées peuvent être obtenus, comme l'illustre la Figure II.3, à l'aide des filtres.

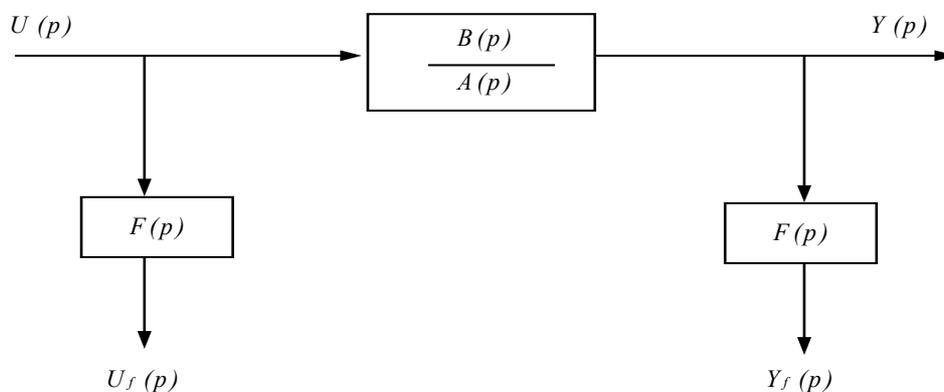


Figure II.3 : Les Signaux Filtrés.

En multipliant les deux membres de l'équation II.16 par un filtre stable  $F(p)$ , la relation entre l'entrée et la sortie n'est pas modifiée et les paramètres du modèle restent inchangés.

$$A(p)F(p)Y(p) = B(p)F(p)U(p) \quad (\text{II.19})$$

Cette équation peut alors s'écrire sous la forme :

$$A(p)Y_f(p) = B(p)U_f(t) \quad (\text{II.20})$$

avec :

$$Y_f(p) = F(p)Y(p) \quad (\text{II.21})$$

$$U_f(p) = F(p)U(p) \quad (\text{II.22})$$

Dans la plupart des applications, un filtre passe-bas pur, de type Butterworth, suffit pour l'implantation du filtre  $F(p)$  [ILM92], [Spr92], décrit par la fonction transfert.

$$F(p) = \frac{1}{p^n + a_{f1}p^{n-1} + \dots + a_{fn-1}p + a_{fn}} \quad (\text{II.2})$$

3)

ou en représentation d'état sous forme canonique commandable :

$$\dot{X}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & & 1 \\ -a_{fn} & -a_{fn-1} & \dots & & -a_{f1} \end{bmatrix} X(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (\text{II.2})$$

4)

avec :

$$X(t) = \begin{bmatrix} X_0(t) \\ X_1(t) \\ \vdots \\ X_{n-1}(t) \end{bmatrix}$$

$$y_f^{(i)} = X_i(t) \quad i = 0, 1, \dots, n$$

La Figure II.4 montre le schéma bloc du filtre de variables d'état représenté par l'équation II.24. Ce filtre permet d'obtenir les dérivées successives du signal  $y_f(t)$  jusqu'à l'ordre  $n$ . En effet, les états  $X(t)$  du filtre correspondent aux dérivées de  $y_f(t)$ .

Il est avantageux de choisir la bande passante du filtre  $F(p)$  comparable à celle du système [ILM92]. Ce choix a pour objectif d'une part, de garder toute l'information fréquentielle propre du

système et, d'autre part, de réduire les effets du bruit. Les coefficients  $a_{fi}$  du FVE sont choisis en fonction de la bande passante du système.

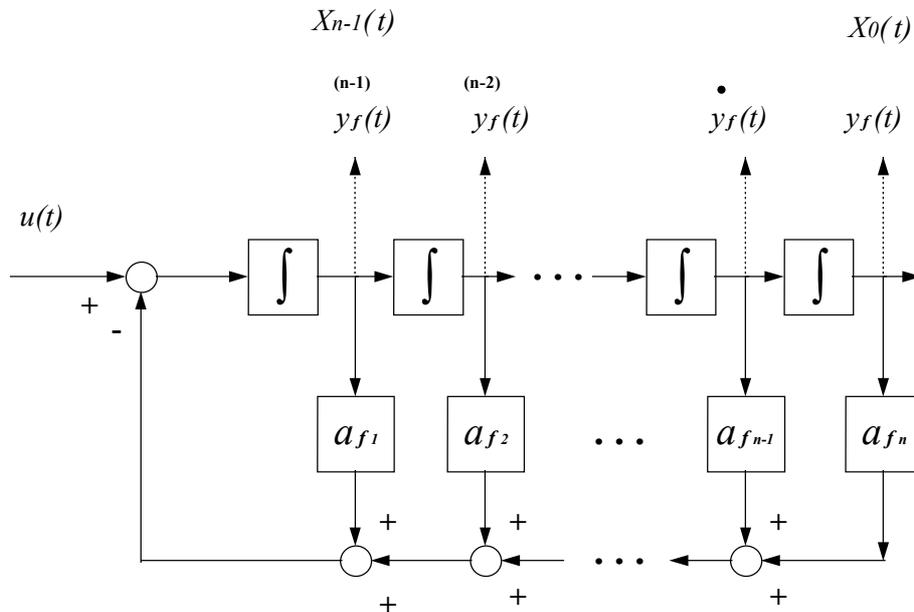


Figure II.4 : Le Filtre de Variables d'Etat.

## II.2.4 L'espace de parité.

Dans les systèmes numériques, le mot parité signifie équivalence ou égalité. Un bit de parité sert à vérifier que le code binaire reçu est identique au code binaire transmis. Ainsi, la parité a pour objectif de signaler la différence, ou écart, entre ces codes. Dans le domaine du diagnostic, les équations de parité représentent un outil mathématique pour la détection et la localisation de défauts. D'après Patton et al. [PC91a] une relation ou équation qui génère un résidu est appelée relation ou équation de parité. Les équations de parité primaires peuvent être obtenues à partir des équations qui décrivent le comportement du système [GK93], [GS90], [Ger97a], [Ger91], [PC91b], [PC91a].

Reprenons le modèle continu sous forme de représentation d'état décrit dans les équations I.1 et I.2.

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t)$$

$$Y(t) = CX(t)$$

Ces équations peuvent être utilisées directement pour générer des résidus.

$$r_1(t) = \dot{X}(t) - AX(t) - BU(t) \quad (II.25)$$

$$r_2(t) = Y(t) - CX(t) \quad (II.26)$$

Les équations II.25 et II.26 représentent soit des résidus primaires, soit des équations de parité primaires. Il est à noter que les signatures sont des vecteurs de symptômes (cf. § I.2.2), obtenus à partir des résidus évalués. Dans ce contexte les résidus et l'espace de parité sont des concepts synonymes

[PC91a]. Cependant, nous utilisons dans ce mémoire l'expression "espace de parité" pour désigner les résidus obtenus à partir d'une représentation dans l'espace d'état (cf. § I.2), dont la sortie estimée  $\hat{Y}(t)$  est engendrée en utilisant seulement l'entrée  $U(t)$ . La représentation en continu de l'espace de parité peut être obtenue à partir de la description dans l'espace d'état du système [HP94], [HI96], [Höf95]. Il faut dériver l'équation I.2 et ensuite substituer  $\dot{X}(t)$ .

$$\dot{Y}(t) = C\dot{X}(t) \quad (\text{II.27})$$

$$\dot{Y}(t) = C[A X(t) + B U(t)] \quad (\text{II.28})$$

En répétant cette opération  $m$  fois, l'équation II.29 est obtenue.

$$\begin{bmatrix} Y(t) \\ \dot{Y}(t) \\ \ddot{Y}(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Y^{(m-1)}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ CA^{m-1} \end{bmatrix} X(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ CB & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ CAB & CB & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(t) \\ \dot{U}(t) \\ \ddot{U}(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ U^{(m-1)}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

où :

- $m$  est l'ordre de l'espace de parité;
- $n$  est le nombre d'équations de l'espace d'état;
- $m \leq n$ .

La valeur optimale de  $m$  est obtenue à l'aide d'un test d'observabilité [CW84], [Höf95]. Si  $m = n$  l'espace de parité est appelé espace de parité d'ordre complet. Les dérivées successives des signaux  $Y(t)$  et  $U(t)$  sont obtenues à partir d'un filtre de variables d'état. L'équation II.29 devient alors :

$$Y_f(t) = TX(t) + QU_f(t) \quad (\text{II.30})$$

L'équation II.30 est multipliée à gauche par une matrice  $W$  qui décrit l'espace nul de  $T$ .

$$WY_f(t) = WTX(t) + WQU_f(t) \quad (\text{II.31})$$

$$WT = 0 \quad (\text{II.32})$$

$$WY_f(t) = WQU_f(t) \quad (\text{II.33})$$

La matrice  $W$  a un double objectif: en premier lieu, elle doit rendre les résidus indépendants des états  $X(t)$  non mesurables et elle doit ensuite permettre de générer des résidus structurés [GK93]. Le choix de la matrice  $W$  n'est pas unique [Ise97a], [GS90], [HI96]. L'espace de parité ou espace de résidus est obtenu à partir de l'équation II.33.

$$r(t) = W Y_f(t) - W Q U_f(t) \quad (\text{II.34})$$

$$r(t) = W Y_f(t) - W \hat{Y}_f(t) \quad (\text{II.35})$$

où :

$\hat{Y}_f(t)$  est la valeur estimée de la sortie  $Y_f(t)$  à partir de l'entrée  $U_f(t)$ ;

La Figure II.5 montre le synoptique de la génération de résidus représentée par l'équation II.34.

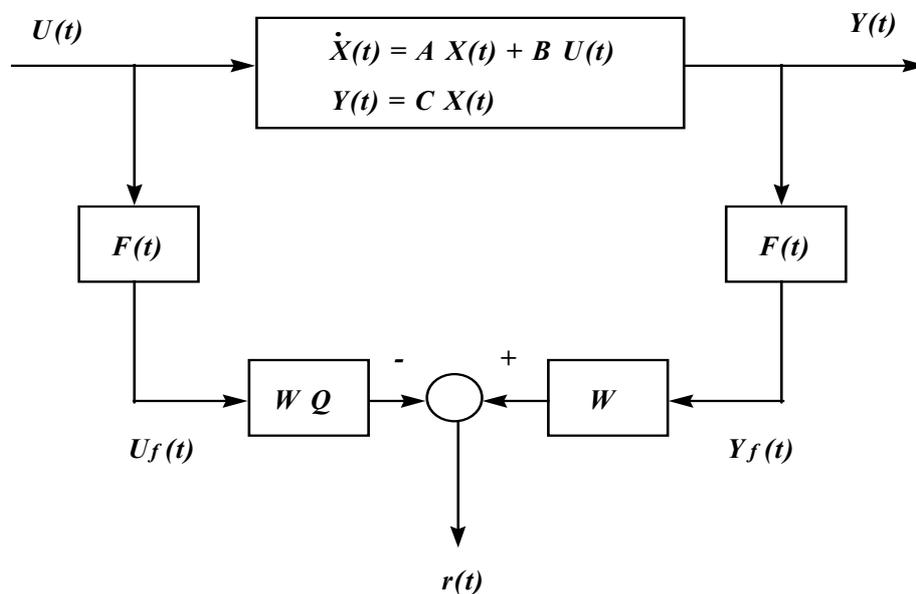


Figure II.5 : L'Espace de Parité en Continu.

Les dérivées successives des signaux d'entrée-sortie ( $U(t)$ ,  $Y(t)$ ) sont obtenues par l'intermédiaire d'un filtre de variables d'état ( $F(t)$ ). La matrice  $W$  permet de générer des résidus indépendants des états  $X(t)$ . La matrice  $W$  est appelée matrice de génération de résidus ou matrice de transformation [GK93], [Ger97a], [Ger97b]. Les équations de parité nécessitent la connaissance de la structure et du comportement du système. Cependant, un temps de réponse court, face aux défauts soudains, ainsi qu'une complexité de calcul moyen sont les principaux avantages des équations de parité [Ise94].

Il est à noter que l'équation II.30 est une description de la structure et du comportement du système. Or l'équation II.34 a été obtenue à partir de l'équation II.30 et de la matrice  $W$ . Dans ce contexte,  $W$  représente une transformation de la description basée sur la structure et le comportement. Cette transformation a pour objectif de permettre la localisation de défauts. Cependant, la matrice  $W$  n'est pas le seul moyen pour réaliser cet objectif, comme le montre la Figure II.6.

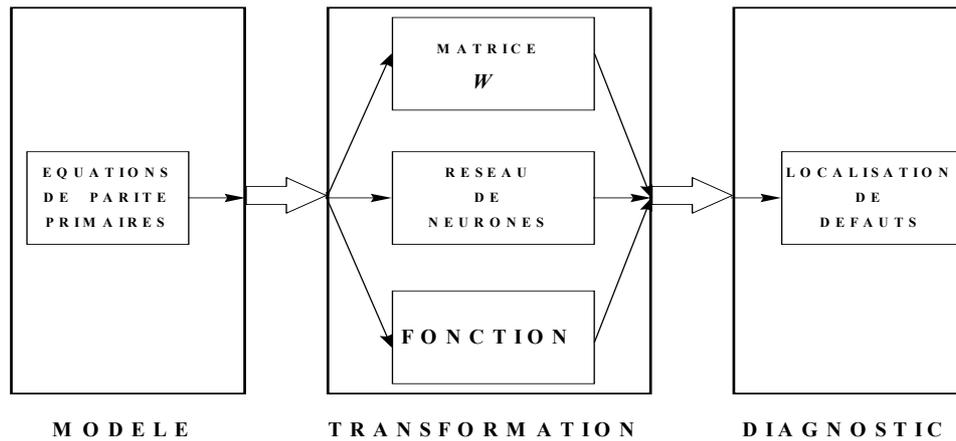


Figure II.6 : Les Transformations dans la Localisation de Défauts.

Danai et al. [DJ96] proposent une transformation des résidus à l'aide d'un réseau de neurones qui représente la dynamique du système. Vela et al. [VTS97a] utilisent une transformation ou changement de l'objectif particulier (fonction) des résidus obtenus à partir d'un modèle parallèle. De même, Vela et al. [VTS97b] proposent une autre stratégie qui repose sur la notion de fonction. Dans cette stratégie, les résidus déjà transformés par une matrice  $W$  (structure et comportement) sont à nouveau modifiés en utilisant la notion de fonction. En résumé, une transformation a pour objectif de chercher des représentations qui révèlent plus facilement les effets des défauts. Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés aux transformations obtenues à partir de la matrice  $W$  et de la fonction.

Le choix de la transformation n'est pas unique et dépend du point de vue de l'observateur. La Figure II.7 montre deux interprétations possibles pour la transformation des équations de parité primaires. Bien que les deux transformations aient le même objectif (localisation), les observateurs conçoivent et interprètent le problème d'une façon différente. Dans la première ligne, l'observateur considère que la structure et le comportement sont les caractéristiques essentielles des équations de parité. Dans ce cadre, la transformation des équations correspond à changer la description de leur structure et comportement, dans le but d'améliorer la localisation de défauts. Un choix adéquat des coefficients de la matrice  $W$  permet d'atteindre cet objectif. Dans la deuxième ligne, l'observateur considère que la fonction est la caractéristique la plus importante des équations de parité. La transformation qui repose sur la fonction consiste à changer l'objectif particulier des équations de parité (cf. § I.5.2 et I.5.3).

OBJET	OBSERVATEUR	ABSTRACTION	
		CONCEPT X	CONCEPT Y
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">EQUATIONS DE PARITE</div> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">TRANSFORMATION</div>	STRUCTURE ET COMPORTEMENT	CHOIX MATRICE $W$	LOCALISATION DE DEFAUTS
	F O N C T I O N	CHOIX OBJECTIF PARTICULIER	

### Figure II.7 : Transformations des Equations de Parité.

Afin de bien comprendre le rôle de la fonction dans la localisation, nous considérons nécessaire de rappeler quatre définitions présentées dans le chapitre I (cf. § I.2.3 et I.4.2).

- la capacité humaine de raisonnement dépend des types de connaissances utilisées et de leur classification [CGTT93], [JAB93];
- le diagnostic est une méthode de solution de problèmes qui repose sur la classification [Pup93];
- les méthodes internes de diagnostic impliquent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme des modèles mathématiques qui devront être obligatoirement validés expérimentalement avant toute utilisation industrielle [Zwi95];
- la connaissance du meta niveau est orientée, et utilisée, vers le diagnostic; tandis que la connaissance du niveau objet se focalise plutôt sur la modélisation du système [Lei93], [CGTT93].

La fonction dans la localisation représente la connaissance du meta niveau. C'est-à-dire que la fonction est utilisée dans le diagnostic plutôt que dans la modélisation du système. Une transformation à partir de la fonction signifie classifier autrement les types de défauts. Dans ce mémoire, nous n'aborderons pas le problème de modélisation des systèmes.

La Figure II.8 illustre la stratégie de diagnostic développée dans le cadre de notre travail de recherche. Les équations de parité primaires sont obtenues à partir d'un modèle représentant la structure et le comportement du système. L'objectif particulier ou fonction des équations de parité (primaires ou déjà transformées) est changé afin d'améliorer la localisation de défauts. Les observateurs et/ou l'estimation paramétrique sont utilisés pour obtenir des informations complémentaires. Celles-ci seront classifiées par rapport à la fonction déjà choisie. Les informations issues des méthodes de diagnostic utilisées seront combinées afin de localiser le plus grand nombre possible de défauts.

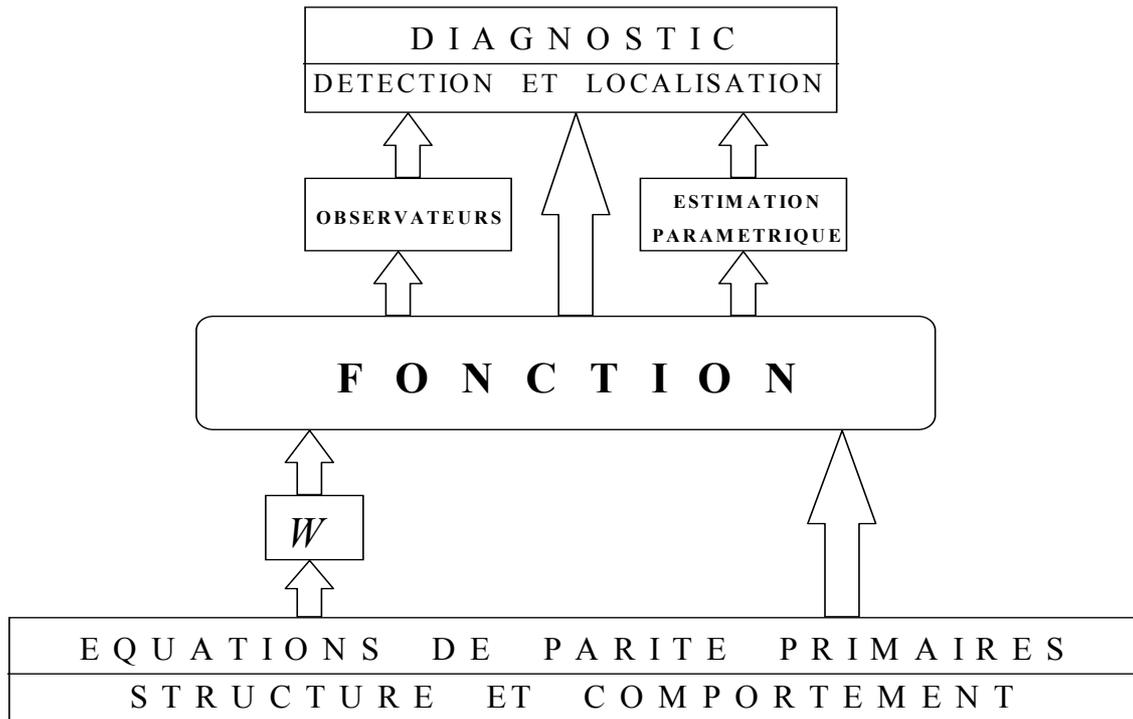


Figure II.8 : La Fonction et le Diagnostic.

## II.2.5 Les observateurs.

Il existe deux types d'observateurs : en boucle ouverte et en boucle fermée. L'observateur en boucle ouverte est un modèle parallèle car les états sont estimés à partir des entrées. En revanche, un observateur en boucle fermée utilise les entrées et les sorties du système afin de reconstruire le vecteur d'état. Cette caractéristique marque la différence, au moins dans le cadre de notre travail, entre l'espace de parité et les observateurs (cf. § équations II.34 et II.40). Dans la suite de ce mémoire, le terme observateur sera utilisé pour désigner un estimateur d'état en boucle fermée, ou observateur de Luenberger, comme le montre la Figure II.9. L'observateur est constitué d'un modèle du système avec une contre-réaction utilisant l'erreur d'estimation. Cette contre-réaction permet de minimiser l'effet des conditions initiales, des perturbations et des erreurs du modèle. L'observateur a pour équations :

$$\hat{X}(t) = A_o \hat{X}(t) + BU(t) + HY(t) \quad (\text{II.36})$$

$$\hat{Y}(t) = C\hat{X}(t) \quad (\text{II.37})$$

$$A_o = [A - HC] \quad (\text{II.38})$$

$$e(t) = Y(t) - \hat{Y}(t) \quad (\text{II.39})$$

où :

$\hat{X}(t)$  est la valeur estimée de  $X(t)$  ;

$H$  est la matrice de contre-réaction;

$e(t)$  est l'erreur d'estimation;  
 $A_o$  est la matrice d'état de l'observateur;

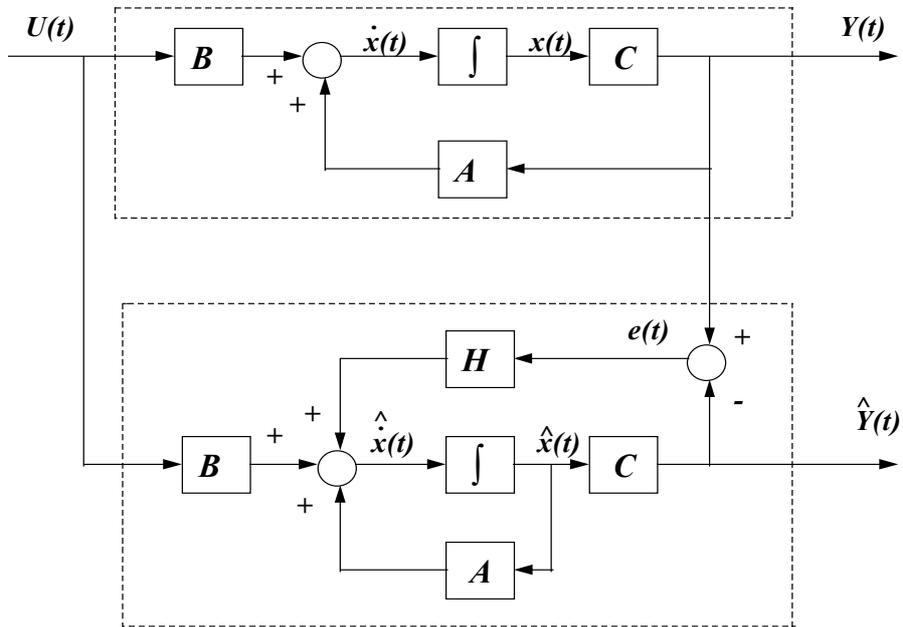


Figure II.9 : L'Observateur de Luenberger.

La matrice de contre-réaction  $H$  est choisie en fonction des performances désirées pour l'observateur. En effet, cette matrice est calculée de façon à réaliser un placement de pôles de la matrice  $A_o$  qui soit compatible avec la dynamique du système. La Figure II.10 montre le schéma de base pour la génération de résidus dans le cas des systèmes continus [Ise94], [Ise93], [Ise97a].

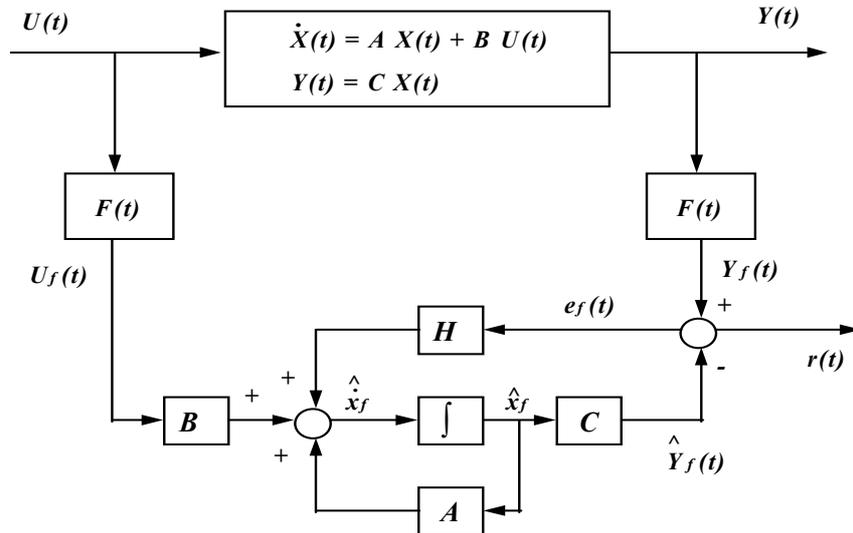


Figure II.10 : L'Observateur dans les Systèmes Continus.

Les dérivées successives des signaux d'entrée-sortie sont obtenues à l'aide du filtre de variables d'état  $F(t)$ . Ces dérivées, ou signaux filtrés, sont utilisés par l'observateur afin de construire le vecteur des sorties estimées  $\hat{Y}_f(t)$ . Enfin, le vecteur de résidus est généré à partir de l'erreur d'estimation.

$$r(t) = Y_f(t) - \hat{Y}_f(t)$$

(II.40)

L'observateur qui reconstruit ou estime tout le vecteur d'état  $X(t)$ , est appelé observateur d'ordre complet. L'observateur d'ordre réduit estime seulement une partie du vecteur d'état. L'observateur de Luenberger qui est désigné à partir de certaines conditions de synthèse est appelé observateur à entrées inconnues UIO (Unknown Input Observer) [PC91b], [Pat94]. Les conditions de synthèse ont pour objectif de diminuer la sensibilité aux variations des paramètres et aux perturbations. Lorsque le niveau de bruit et l'incertitude sur les paramètres du système sont faibles, l'observateur de Luenberger est bien adapté. En revanche, si le niveau de bruit est important, le filtre de Kalman doit être utilisé [Fra93], [Fra89], [Pat94]. Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la génération de résidus à partir d'un seul observateur de Luenberger d'ordre complet. Cependant, pour être complet sans prétendre à l'exhaustivité, il convient de mentionner au moins brièvement, les méthodes de diagnostic qui utilisent un ou plusieurs observateurs d'ordre réduit. D'après Frank et al. [Fra86], [Fra89], [FW89], ces schémas peuvent être classés dans deux grandes catégories :

- l'observateur unique;
  - schéma SOS (Simplified Observer Scheme);
- les bancs d'observateurs;
  - schéma DOS (Dedicated Observer Scheme);
  - schéma GOS (Generalized Observer Scheme).

Il faut signaler que les schémas SOS, DOS et GOS peuvent être construits à partir d'observateurs de Luenberger, d'observateurs à entrées inconnues ou de filtres de Kalman [Pat94], [Ise94], [Fra93], [Fra86], [FW89]. Ces schémas peuvent être utilisés pour le diagnostic de défauts sur de capteurs, d'actionneurs et de composants.

- défaut capteur IFD (Instrument Fault Detection);
- défaut actionneur AFD (Actuator Fault Detection);
- défaut composant CFD (Component Fault Detection).

Pour le diagnostic de défauts de type composant (CFD), la stratégie consiste à décomposer le système en sous-systèmes. Il s'agit donc d'utiliser des observateurs locaux hiérarchisés [FW89]. Dans cette stratégie, les interactions entre les sous-systèmes compliquent la localisation du composant en défaut. Les schémas SOS, DOS et GOS pour les défauts de type capteur (IFD) et actionneur (AFD) sont décrits dans les paragraphes suivants.

#### **Schéma SOS.**

- IFD : il s'agit d'un seul observateur piloté par toutes les entrées et une seule sortie. Ce schéma ne fournit qu'une redondance simple et de ce fait ne permet uniquement que la localisation d'un seul capteur en défaut;
- AFD : l'observateur est piloté par toutes les sorties et une seule entrée.

#### **Schéma DOS.**

- IFD : un banc d'observateurs permet de construire ce schéma. Chacun des observateurs est piloté par toutes les entrées et une seule sortie. Le nombre d'observateurs est donc égal au nombre de sorties. Ce schéma permet la localisation de défauts multiples;

- AFD : il s'agit d'un banc d'observateurs où chacun des observateurs est piloté par toutes les sorties et une seule entrée.

### **Schéma GOS.**

- IFD : ce schéma est comparable à celui du DOS si l'on considère le nombre d'observateurs qu'il exploite. Cependant, chaque observateur est piloté par toutes les entrées et  $m-1$  sorties ( $m$ =nombre de sorties);
- AFD : il s'agit d'un banc d'observateurs où chacun des observateurs est piloté par toutes les sorties et  $n-1$  entrées ( $n$  = nombre d'entrées).

Les observateurs et les équations de parité ont des caractéristiques similaires par rapport au temps de détection, à la complexité de calcul et à la connaissance du système [Ise94]. Cependant, les observateurs permettent la détection et la localisation de défauts multiples.

## **II.2.6 L'estimation paramétrique.**

L'identification est une approche expérimentale pour la détermination du modèle dynamique du système [Lan93]. Elle comporte quatre étapes :

- acquisition des entrées-sorties sous un protocole expérimental;
- choix de la structure du modèle (complexité);
- estimation des paramètres du modèle;
- validation du modèle identifié (structure et valeur des paramètres).

Par rapport à l'identification il existe deux types de modèles dynamiques [Lan93], [SP91].

- modèles non paramétriques: il s'agit de décrire le système à partir de sa réponse impulsionnelle ou de sa réponse à un échelon;
- modèles paramétriques: toute l'information disponible du système est décrite par la structure du modèle avec un nombre limité de paramètres.

Dans ce paragraphe, nous abordons le problème de l'estimation paramétrique à partir des modèles paramétriques. D'après Eykoff, cité par Schoukens et al. [SP91], l'estimation paramétrique est la détermination des valeurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système, en supposant que la structure de celui-ci est connue.

Les mesures des entrées-sorties sont, en général, perturbées par le bruit. Il est alors nécessaire d'utiliser des méthodes statistiques afin d'aborder le problème de l'estimation paramétrique [SP91]. Landau [Lan93] considère deux grandes catégories de méthode d'estimation récursive: les méthodes d'estimation basées sur le blanchiment de l'erreur de prédiction et les méthodes basées sur la décorrélation du vecteur d'observation et de l'erreur de prédiction :

- méthodes d'estimation basées sur le blanchiment de l'erreur de prédiction;
  - moindres carrés récursifs (M.C.R.);
  - moindres carrés étendus (M.C.E.);

- maximum de vraisemblance récursif (M.V.R.);
- erreur de sortie avec modèle de prédiction étendu (E.S.M.P.E.);
- moindres carrés généralisés (M.C.G.);
  
- méthodes basées sur la décorrélation du vecteur d'observation et de l'erreur de prédiction;
  - variable instrumentale à observations retardées (V.I.O.R.);
  - variable instrumentale à modèle auxiliaire (V.I.M.A.);
  - erreur de sortie à compensateur fixe (E.S.C.F.);
  - erreur de sortie à compensateur ajustable (E.S.C.A).

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'estimateur des moindres carrés (MC), et plus particulièrement à l'algorithme des moindres carrés récursifs avec facteur d'oubli fixe.

Reprenons le système décrit par l'équation I.8.

$$Y(t) = \varphi^T(t) \theta \quad (\text{II.41})$$

Connaissant l'entrée et la sortie du système, nous cherchons une estimation  $\hat{\theta}$  du vecteur des paramètres vrais  $\theta$ .

$$\hat{\theta}^T = [\hat{a}_1 \cdots \hat{a}_n \quad \hat{b}_0 \cdots \hat{b}_m] \quad (\text{II.42})$$

$$e(t) = Y(t) - \varphi^T(t) \hat{\theta} \quad (\text{II.43})$$

L'équation de l'erreur  $e(t)$  représente la différence entre la sortie  $Y(t)$  et la sortie estimée  $\hat{Y}(t)$ , [Ise97a]. L'estimateur des moindres carrés cherche à minimiser un critère basé sur la norme euclidienne de l'erreur  $e(t)$  [AW89], [Spr92].

$$V(\theta, t) = \frac{1}{2} \|E(t)\|^2 \quad (\text{II.44})$$

$$E(t) = [e(1) \quad e(2) \quad \cdots \quad e(t)] \quad (\text{II.45})$$

La solution non récursive des moindres carrés est donnée par l'équation II.46 [AW89], [Spr92], [JJ93].

$$\hat{\theta}(t) = \left[ \varphi^T(t) \quad \varphi(t) \right]^{-1} \varphi^T(t) Y(t) \quad (\text{II.46})$$

Les deux conditions qu'expriment les propriétés essentielles d'une estimation sont le biais et la consistance. Une estimation  $\hat{\theta}$  est biaisée, si l'espérance mathématique  $E\{\theta - \hat{\theta}\}$ , ou erreur d'estimation, est différente de zéro. Cette condition revient à avoir un signal à excitation persistante. Cela signifie que le spectre fréquentiel du signal d'entrée correspond au moins à la bande passante du

système, et qu'elle sera appliquée pendant toute la période d'observation. Si la condition d'excitation persistante existe, alors la matrice  $\varphi^T(t)\varphi(t)$  est inversible [AW89], [Spr92]. Une estimation  $\hat{\theta}$  est consistante si  $\hat{\theta}$  converge asymptotiquement vers  $\theta$ .

L'estimateur non récursif des moindres carrés permet l'estimation hors ligne du vecteur de paramètres  $\theta(t)$ . Cependant dans le cadre du diagnostic, il est nécessaire de connaître en ligne l'évolution des paramètres. L'estimateur récursif des moindres carrés a pour objectif de diminuer le temps de calcul et l'espace mémoire utilisé. L'estimateur récursif des moindres carrés utilise l'estimée du vecteur  $\theta(t-1)$  afin d'obtenir l'estimée du vecteur  $\theta(t)$ . Les équations II.47 à II.49 décrivent la représentation récursive de l'algorithme des moindres carrés. [AW89], [Ise97a], [JJ93], [Spr92] :

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t) [Y(t) - \varphi^T(t) \hat{\theta}(t-1)] \quad (\text{II.47})$$

$$K(t) = P(t-1) \varphi(t) [I + \varphi^T(t) P(t-1) \varphi(t)]^{-1} \quad (\text{II.48})$$

$$P(t) = [I - K(t) \varphi^T(t)] P(t-1) \quad (\text{II.49})$$

où :

$I$  représente la matrice identité.

L'algorithme des équations II.47 à II.49 n'est valable que pour des systèmes non variants dans le temps, c'est-à-dire les systèmes dont le vecteur  $\theta(t)$  est constant [AW89], [Spr92]. Dans le cadre du diagnostic et de l'estimation paramétrique, un défaut produit un changement de coefficients du vecteur  $\theta(t)$ . Il s'agit donc d'estimer les paramètres des systèmes variants dans le temps. Pour ces systèmes, il faut pondérer les mesures avec un facteur d'oubli  $\lambda$  [Spr92]. Les équations II.48 et II.49 sont alors remplacées par :

$$K(t) = P(t-1) \varphi(t) [\lambda I + \varphi^T(t) P(t-1) \varphi(t)]^{-1} \quad (\text{II.50})$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda} [I - K(t) \varphi^T(t)] P(t-1) \quad (\text{II.51})$$

Pour la représentation en continu, les dérivées du vecteur  $Y(t)$  sont obtenues à l'aide des filtres de variables d'état. En général dans la représentation en continu, les paramètres du vecteur  $\theta$  dépendent des coefficients physiques du système rassemblés dans le vecteur  $p$  (résistance, inertie, frottement visqueux etc.).

$$\theta = f(p) \quad (\text{II.52})$$

Si l'inversion de la relation  $f(p)$  existe alors :

$$p = f^{-1}(\theta) \quad (\text{II.53})$$

et les changements  $\Delta p_i$  des coefficients physiques du système peuvent être déterminés [Ise97a], [HP94], [Ise93]. L'estimation paramétrique est une méthode de diagnostic bien adaptée pour des défauts multiplicatifs. En fait, elle permet une localisation plus précise des défauts. Cependant le temps de détection et la complexité des calculs sont plus importants.

## II.2.7 Conclusion.

Les méthodes internes de diagnostic reposent sur la connaissance d'un modèle. Le modèle parallèle, l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique utilisent des descriptions basées sur la structure et le comportement afin de générer des résidus. Dans le cadre de notre travail, la fonction peut être vue comme une transformation de la structure et du comportement (cf. § II.2.4). Le choix de la fonction n'est pas unique et dépend du point de vue de l'observateur.

## II.3 Sensibilité des résidus.

### II.3.1 Introduction.

L'étude de la sensibilité des résidus permet de connaître leur variation face aux défauts du système. Leur sensibilité dépend du point d'opération et du type d'entrées. Nous allons étudier un système de deuxième ordre afin de montrer les effets des défauts additifs et multiplicatifs. Il faut signaler que les dérivées des signaux sont obtenues à partir des filtres de variables d'état. Dans ce contexte, nous pouvons parler de défauts sur des capteurs réels et de défauts sur des capteurs virtuels.

### II.3.2 Sensibilité aux défauts additifs et multiplicatifs

Nous allons reprendre l'équation II.34 afin d'étudier les effets des défauts sur les résidus.

$$r(t) = [W \quad -WQ] \begin{bmatrix} Y_f(t) \\ U_f(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.54})$$

L'équation des résidus obtenue à partir de l'Espace de Parité est maintenant représentée par la matrice  $\Theta(p)$  et le vecteur  $\psi(t)$  [HI96] :

$$r(t) = \Theta(p) \psi(t) \quad (\text{II.55})$$

où :

- $p$  est le vecteur des paramètres physiques du système.
- $\Theta(p)$  est la matrice qui contient l'information du modèle par rapport au vecteur  $p$
- $\psi(t)$  est le vecteur des mesures des signaux d'entrée-sortie.

L'équation II.55 permet d'effectuer une analyse de sensibilité qui est applicable à l'espace de parité et à l'estimation paramétrique. Cette équation montre que la valeur des résidus dépend des paramètres et des mesures. Les changements de paramètres représentent des défauts multiplicatifs ( $\Delta p$ ) tandis que les changements de mesures représentent des défauts additifs ( $\Delta \psi(t)$ ). L'équation II.57 décrit les effets des défauts additifs sur le résidu  $i$  du vecteur  $r(t)$  [HI96] :

$$r_i(t) = \Theta_i^T(p) \psi(t) \quad (\text{II.56})$$

$$\Delta r_i(t) = \Theta_i^T(p) \Delta \psi(t) \quad (\text{II.57})$$

Pour les défauts multiplicatifs, l'équation du résidu peut être obtenue en utilisant le développement en Séries de Taylor [HI96].

$$0 = \Theta_i^T(p + \Delta p) \psi(t) \quad (\text{II.58})$$

$$0 = \Theta_i^T(p) \psi(t) + \frac{\partial [\Theta_i^T(p) \psi(t)]}{\partial p} \Delta p + [\text{Termes d'ordre supérieur}] \quad (\text{II.59})$$

$$\Delta r_i(t) = - \psi^T(t) \frac{\partial [\Theta_i(p)]}{\partial p} \Delta p \quad (\text{II.60})$$

L'équation qui décrit la sensibilité du résidu aux effets des défauts additifs et multiplicatifs est obtenue en combinant les équations II.57 et II.60 [HI96], [Höf95].

$$\Delta r_i(t) = \Theta_i^T(t) \Delta \psi(t) - \psi^T(t) \frac{\partial [\Theta_i(p)]}{\partial p} \Delta p \quad (\text{II.61})$$

L'équation II.61 permet de calculer la valeur de la variation du résidu. Cette valeur peut être utilisée afin de fixer le seuil  $t_{r_i}$  pour la détection [BFH97].

$$t_{r_i} = \Delta r_i + C_{r_i} \quad (\text{II.62})$$

où :

$C_{ri}$  est une constante qui représente les effets du bruit et les erreurs du modèle.

Deux remarques s'imposent :

- la variation des résidus dépend du point de fonctionnement du système;
- les défauts de paramètres liés aux constantes de temps du système changent seulement la valeur de l'écart type du résidu.

### II.3.3 Exemple d'application.

Afin d'étayer notre propos, nous proposons d'examiner l'exemple suivant (Figure II.11) :

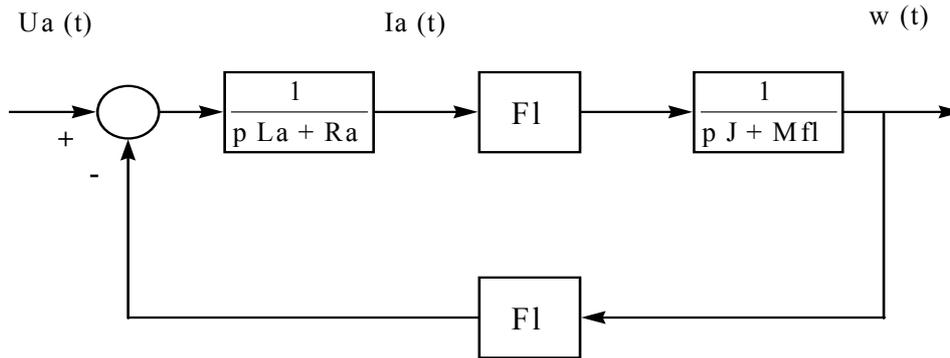


Figure II.11 : Schéma à Blocs du Moteur à Courant Continu.

où :

$R_a$	$= 1.64 \ \Omega$	est la résistance de l'armature.
$L_a$	$= 0.00676 \ \Omega \text{ s}$	est l'inductance de l'armature.
$Fl$	$= 0.345 \ \text{V s}$	est le flux magnétique.
$J$	$= 0.9335 \text{ e-3} \ \text{kg m}$	est la constante d'inertie.
$Mfl$	$= 1.72 \text{ e-3} \ \text{N m s}$	est le coefficient de frottements visqueux .

Il s'agit d'un moteur à courant continu [HP94] qui a une entrée  $U_a(t)$  et deux variables : le courant de l'armature  $I_a(t)$  et la vitesse angulaire de l'axe  $w(t)$ . Il faut signaler que la boucle de retour est une boucle intrinsèque propre aux équations qui décrivent le comportement du système. L'équation II.63 décrit le modèle du moteur sous forme d'une représentation d'états.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-Fl}{L_a} \\ \frac{Fl}{J} & \frac{-Mfl}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} U_a(t)$$

(II.63)

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

(II.64)

A partir des équations II.29 et II.34 (cf. § II.2.4), deux résidus sont générés. Il est à noter que ceux-ci sont obtenus en utilisant une représentation en continu du modèle du système.

$$\begin{bmatrix} Y(t) \\ \dot{Y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} X(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ CB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ua(t) \\ \dot{Ua}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.65})$$

$$Y_f(t) = TX(t) + QU_f(t)$$

$$\begin{bmatrix} Ia(t) \\ w(t) \\ \dot{Ia}(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{-Ra}{La} & \frac{-Fl}{La} \\ \frac{-Fl}{J-} & \frac{-Mfl}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{La} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ua(t) \\ \dot{Ua}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.66})$$

$$W = \begin{bmatrix} Ra & Fl & La & 0 \\ -Fl & Mfl & 0 & J \end{bmatrix} \quad (\text{II.67})$$

$$r(t) = W Y_f(t) - WQU_f(t) \quad (\text{II.68})$$

$$r_1(t) = La \dot{Ia}(t) + Ra Ia(t) + Fl w(t) - Ua(t) \quad (\text{II.69})$$

$$r_2(t) = J w(t) - Fl Ia(t) + Mfl w(t) \quad (\text{II.70})$$

La Figure II.12 montre le comportement des deux résidus dans le cas de fonctionnement normal et avec une entrée  $Ua(t)=110$  Volts. Les mesures du courant  $Ia(t)$  et de la vitesse  $w(t)$  sont bruitées par un bruit blanc gaussien  $N(0, \sigma^2 = e - 6)$ . Les caractéristiques des résidus sont :

$r_1(t)$	
valeur moyenne	: -4.0566 e-5
écart type	: 0.0059
$r_2(t)$	
valeur moyenne	: 4.4785 e-6
écart type	: 8.9675 e-4

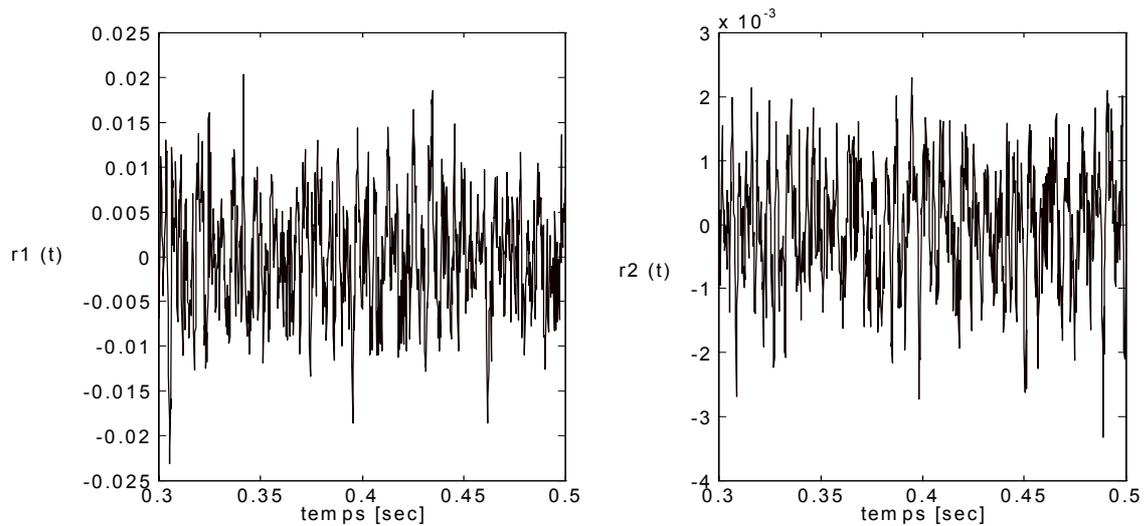


Figure II.12 : Valeur des Résidus sans Défaut.

Les deux résidus ont une valeur proche de zéro. Cela signifie que les erreurs du modèle peuvent être négligées. L'écart type est différent de zéro, dans ce contexte la valeur de la constante  $C_{r_i}$  est déterminée seulement par rapport aux effets du bruit sur les résidus.

$$C_{r_1} > 0.02$$

$$C_{r_2} > 3 \text{ e} - 3$$

$$t_{r_1} = \Delta r_1 \pm 0.025$$

$$t_{r_2} = \Delta r_2 \pm 4 \text{ e} - 3$$

Dans le paragraphe suivant est étudiée la sensibilité des résidus par rapport aux défauts additifs, notamment sur le capteur Ia.

### II.3.3.1 Défauts sur les capteurs.

Il s'agit d'une variation soudaine de +10 % par rapport à la valeur nominale du capteur du courant Ia. Les conditions de simulation sont les suivantes :

#### avant le défaut

$$U_a \text{ moy}(t) = 110 \text{ V.}$$

$$I_a \text{ moy}(t) = 1.5528 \text{ A.}$$

$$\omega \text{ moy}(t) = 311.4292 \text{ rad./s.}$$

#### après le défaut

$$U_a \text{ moy}(t) = 110 \text{ V.}$$

$$I_a \text{ moy}(t) = 1.7081 \text{ A.}$$

$$\omega \text{ moy}(t) = 311.4592 \text{ rad./s.}$$

$$\Delta I_a \text{ moy}(t) = 0.15528 \text{ A.}$$

La Figure II.13 montre le comportement des résidus. Le temps d'apparition du défaut est égal à 0.35 seconde.

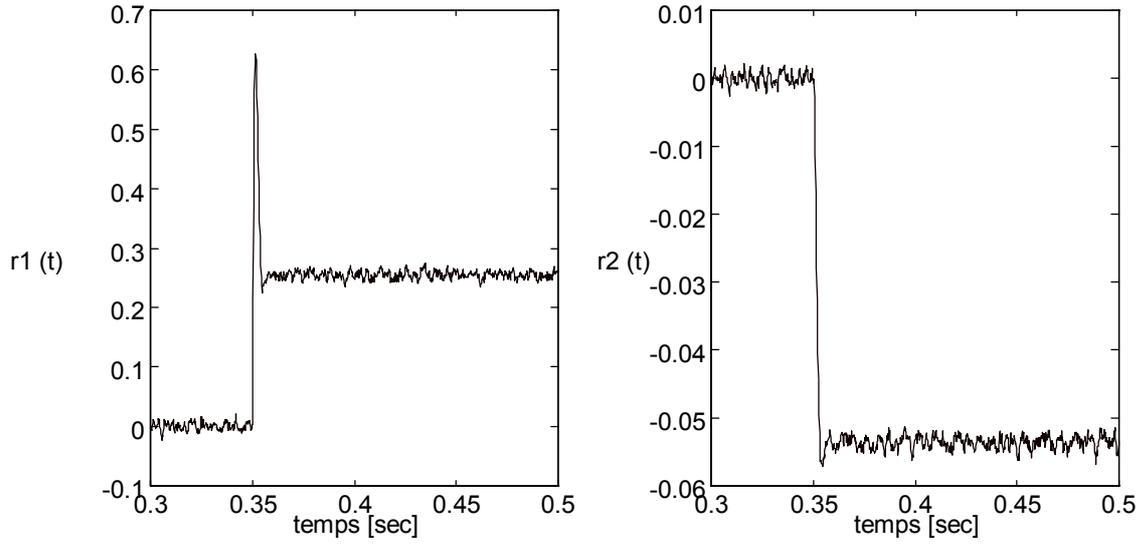


Figure II.13 : Défaut Additif  $\Delta I_a = +10\%$ .

Dans le cas d'un fonctionnement normal, les résidus sont décrits par les équations II.71 et II.72.

$$r_1(t) = [W_1 \quad -W_1 Q] \begin{bmatrix} Y_f(t) \\ U_f(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.71})$$

$$r_2(t) = [W_2 \quad -W_2 Q] \begin{bmatrix} Y_f(t) \\ U_f(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.72})$$

Dans le cas de défauts sur les capteurs, la variation des résidus est décrite par les équations II.73 et II.74 (cf. § équations II.54 et II.57).

$$\Delta r_1(t) = \begin{bmatrix} [Ra \quad Fl \quad La \quad 0] & [-1 \quad 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_a(t) & \Delta w(t) & \Delta \dot{I}_a(t) & \Delta \dot{w}(t) & \Delta U_a(t) & \Delta \dot{U}_a(t) \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.73})$$

$$\Delta r_2(t) = \begin{bmatrix} [-Fl \quad Mfl \quad 0 \quad J] & [0 \quad 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_a(t) & \Delta w(t) & \Delta \dot{I}_a(t) & \Delta \dot{w}(t) & \Delta U_a(t) & \Delta \dot{U}_a(t) \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.74})$$

$$\Delta r_1(t) = La \Delta \dot{I}_a(t) + Ra \Delta I_a(t) + Fl \Delta w(t) - \Delta U_a(t) \quad (\text{II.75})$$

$$\Delta r_2(t) = J \Delta w(t) - Fl \Delta I_a(t) + Mfl \Delta w(t) \quad (\text{II.76})$$

Les équations II.75 et II.76 décrivent la sensibilité des résidus par rapport aux défauts additifs. Elles permettent de calculer les effets du défaut  $\Delta I_a$  sur les résidus.

$$\Delta r_1 \text{ moy}(t) = Ra \Delta I_a \text{ moy}(t) \quad (\text{II.77})$$

$$\Delta r_1 \text{ moy}(t) = 0.2546$$

$$\Delta r_2 \text{ moy}(t) = -Fl \Delta I_a \text{ moy}(t) \quad (\text{II.78})$$

$$\Delta r_2 \text{ moy}(t) = -0.05357$$

Les variations calculées correspondent aux valeurs obtenues sur la Figure II.13. Le résidu 1 est plus sensible aux effets du défaut  $\Delta I_a$ . Cela s'explique par la valeur des paramètres Ra et Fl car le produit  $Ra \Delta I_a$  sera toujours supérieur à celui de  $Fl \Delta I_a$ .

Il est à noter que les capteurs des signaux  $\dot{I}_a(t)$  et  $\dot{w}(t)$  sont des capteurs virtuels, car les dérivées des signaux  $I_a(t)$  et  $w(t)$  ne sont pas obtenues par une mesure directe. En effet, les dérivées des signaux sont obtenues à l'aide des Filtres de Variables d'Etat. Dans ce contexte, un défaut sur le capteur  $I_a$  produit aussi un défaut sur le capteur  $\dot{I}_a$ . L'équation II.77 devient alors:

$$\Delta r_1 \text{ moy}(t) = Ra \Delta I_a \text{ moy}(t) + La \Delta \dot{I}_a \text{ moy}(t) \quad (\text{II.79})$$

La Figure II.14 montre le produit  $La \dot{I}_a(t)$ .

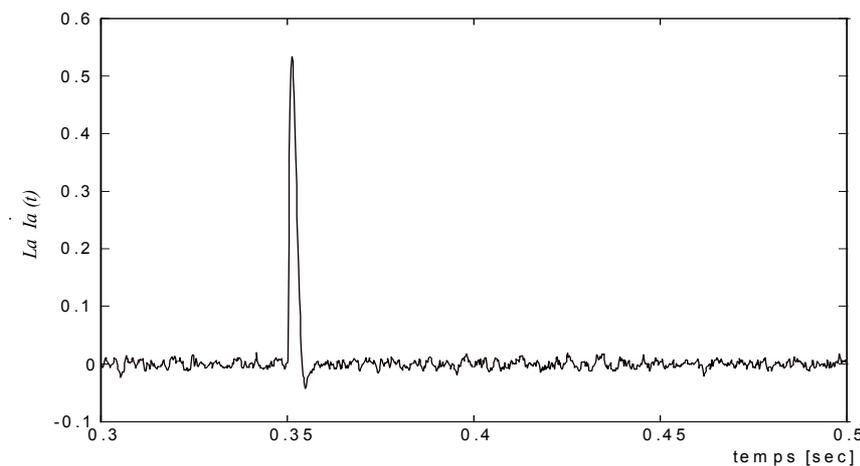


Figure II.14 : Effets du Capteur  $I_a$  sur le Capteur  $\dot{I}_a$ .

Le défaut sur le capteur  $I_a$  produit une variation de la valeur moyenne du résidu 1 (cf. § Figure II.13). Cependant le défaut sur le capteur  $\dot{I}_a$  ne change pas la valeur moyenne du résidu. L'équation II.80 permet d'expliquer ce comportement.

$$\dot{I}a_{moy}(t) = \frac{d[Ia(t)_{moy} + bruit]}{dt}$$

(II.80)

$$\dot{I}a_{moy}(t) = 0 + \frac{d[bruit]}{dt}$$

(II.81)

En effet, la dérivée d'une constante est égale à zéro. Le signal  $\dot{I}a(t)$  est donc égale à la dérivée du bruit dans la mesure du capteur Ia. Cela permet d'expliquer le transitoire du résidu r1 sur la Figure II.13. Trois remarques s'imposent :

- le résidu 2 est découplé des effets du défaut sur le capteur Ua. Les effets sur les capteurs Ia et w ne peuvent pas être localisés;
- la valeur des résidus dépend du point d'opération fixé par l'entrée  $Ua_{mot}(t)$  qui caractérise  $Ia_{moy}(t)$  et  $w_{moy}(t)$ ;
- les résidus sont plus sensibles aux défauts sur le capteur de vitesse w, même si  $Ra > Fl$  et  $Fl > Mfl$ . Cela s'explique par les valeurs de la vitesse (311.4592) et du courant (1.5528).

La valeur du seuil  $t_{r_i}$  peut être fixée par rapport à la variation la plus petite des résidus. Le Tableau II.2 montre la variation des résidus par rapport aux défauts sur les capteurs Ia, w et Ua.

Δ défauts= +10 % de la valeur nominale des capteurs.

	$\Delta Ia(t)$	$\Delta w(t)$	$\Delta Ua(t)$
$\Delta r_1(t)$	0.2546	10.7395	11
$\Delta r_2(t)$	-0.05357	0.05357	0

Tableau II.2 : Sensibilité des Résidus.

Les résidus sont moins sensibles aux effets du défaut sur le capteur Ia. Alors, le seuil  $t_{r_i}$  peut être fixé de la façon suivante :

$$|t_{r_i}| = |\Delta r_i(t)_{\min}| + |C_{r_i}|$$

(II.82)

$$|t_{r_1}| = |0.2546| + |0.025|$$

(II.83)

$$|t_{r_2}| = |-0.05357| + |4 \cdot 10^{-3}|$$

(II.84)

Si les seuils sont fixés selon les équations II.83 et II.84, il est impossible de localiser les défauts sur les capteurs Ia et w, comme le montre le Tableau II.3. En effet, seul le défaut sur le capteur Ua peut être localisé, car les défauts sur les capteurs Ia et w ont des signatures identiques.

**d Ia                      d w                      d Ua**

$S_1$	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
$S_2$	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>

Tableau II.3 : Matrice de Diagnostic.

Il faut signaler que plusieurs facteurs interviennent dans le choix des termes  $\Delta r_i(t) \min$  et  $C_{r_i}$ . Si  $\Delta r_i(t) \min = 0$ , le seuil  $t_{r_i}$  est déterminé à partir de la valeur de la constante  $C_{r_i}$  seule. Un  $C_{r_i} < 0.025$  peut produire des fausses alarmes, tandis qu'un  $C_{r_i}$  nettement supérieur à 0.025 peut produire une manque à la détection (cf. § IV.2). Le choix de  $\Delta r_i(t) \min$  peut modifier la sensibilité de la détection et/ou la structure des signatures [BNF97], [BJRE97], [BFFI97]. Par exemple, un  $\Delta r_i(t) \min < 0.2546$  permet la détection des variations inférieures à 10 % de la valeur nominale du capteur Ia. Cependant le choix de ce terme peut aussi augmenter le nombre de défauts localisés, comme l'illustre le Tableau II.4.

	<b>d Ia</b>	<b>d w</b>	<b>d Ua</b>	
$S_1$	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>S</b> : symptôme.
capteur.				<b>d</b> : défaut sur le
				$ \Delta r_1(t) \min  =  10 $
$S_2$	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	$ \Delta r_2(t) \min  =  0.053 $

Tableau II.4 : Matrice de Diagnostic pour le Moteur à Courant Continu.

Le choix de  $|\Delta r_1(t) \min| = 10$  permet de différencier les défauts des capteurs Ia et w. En effet, pour dépasser le seuil  $t_{r_1} = 10.025$ , il faut un  $\Delta Ia > 350\%$ . Un défaut de telle amplitude veut dire que la fiabilité du système ne peut pas être garantie. Le capteur ne peut plus alors assurer sa mission dans le système.

Dans le paragraphe suivant, nous allons étudier la sensibilité des résidus par rapport aux défauts multiplicatifs et notamment les défauts liés aux dérivées des signaux.

### II.3.3.2 Défauts sur les paramètres.

Reprenons l'équation II.60, la variation des résidus aux défauts paramétriques est décrite par l'équation II.85 [HI96].

$$\Delta r_i(t) = - \sum_{j \in Pe} \psi(t) \frac{\partial [\Theta_i(p)]}{\partial p_j} \Delta p_j \quad (II.85)$$

où :

$Pe$  représente le sous ensemble des paramètres liés au résidu  $i$ .

Dans le cas du moteur à courant continu, la variation des résidus est donnée par les équations II.86 et II.87.

$$\Delta r_1(t) = - \sum_{j \in P_e} \left[ I_a(t) \quad w(t) \quad \dot{I}_a(t) \quad \dot{w}(t) \quad U_a(t) \quad \dot{U}_a(t) \right] \frac{\partial [Ra \quad Fl \quad La \quad 0 \quad -1 \quad 0]}{\partial p_j} \Delta p_j$$

(II.86)

$$\Delta r_2(t) = - \sum_{j \in P_e} \left[ I_a(t) \quad w(t) \quad \dot{I}_a(t) \quad \dot{w}(t) \quad U_a(t) \quad \dot{U}_a(t) \right] \frac{\partial [-Fl \quad Mfl \quad 0 \quad J \quad 0 \quad 0]}{\partial p_j} \Delta p_j$$

(II.87)

$$\Delta r_1(t) = -\Delta La \dot{I}_a(t) - \Delta Ra I_a(t) - \Delta Fl w(t)$$

(II.88)

$$\Delta r_2(t) = -\Delta J w(t) + \Delta Fl I_a(t) - \Delta Mfl w(t)$$

(II.89)

La Figure II.15 montre le comportement des résidus dû à une variation sur le paramètre  $Ra$ . Les conditions de simulation sont les mêmes que celles utilisées à la section II.3.3. La valeur  $I_a(t)_{moy}$  après le défaut est égale à 1.5492 A.

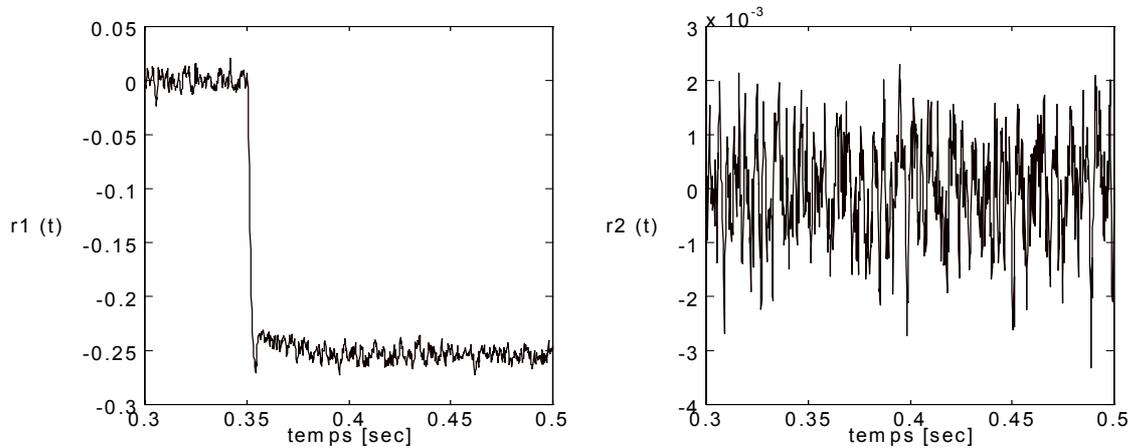


Figure II.15 : Défaut Multiplicatif  $\Delta Ra = +10\%$ .

Il s'agit d'une variation soudaine de  $+10\%$  par rapport à la valeur nominale du paramètre  $Ra$ . Il est à noter que le résidu 2 est découplé des effets du paramètre  $Ra$ . L'équation II.90 permet de calculer la variation du résidu 1.

$$\Delta r_1 \text{ moy}(t) = -\Delta Ra I_a \text{ moy}(t)$$

(II.90)

$$\Delta r_1 \text{ moy}(t) = -0.2546$$

$$\Delta r_2 \text{ moy}(t) = 0$$

Les valeurs calculées correspondent aux variations obtenues sur la Figure II.15. Si les signaux sont constants, les défauts liés aux dérivées des signaux ne sont pas facilement détectables [Ise94], [HP94]. En fait, il faut que l'amplitude du défaut soit importante pour détecter ce type de défaut. Par exemple, une variation de +10 % de la valeur nominale du paramètre  $La$  ne peut pas être détectée, comme montré à la Figure II. 16.

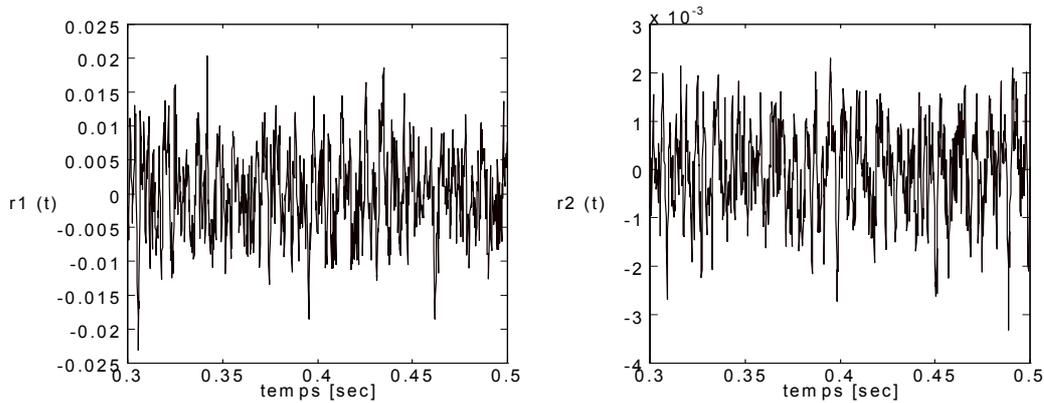


Figure II.16 : Défaut Multiplicatif  $\Delta La.= +10 \%$ .

En comparant les Figures II.12 et II.16 nous pouvons constater que le comportement des résidus est presque identique. Cela veut dire qu'avec des signaux constants, le défaut  $\Delta La.=+10 \%$  n'a pas d'effets significatifs sur la valeur moyenne ou sur l'écart type des résidus. Pour détecter les défauts de petite amplitude, il ne faut pas que les signaux soient constants.

La Figure II.17 montre le comportement des signaux  $Ua(t)$ ,  $Ia(t)$  et  $w(t)$  lorsque un signal d'excitation est superposé à l'entrée  $Ua(t)$ .

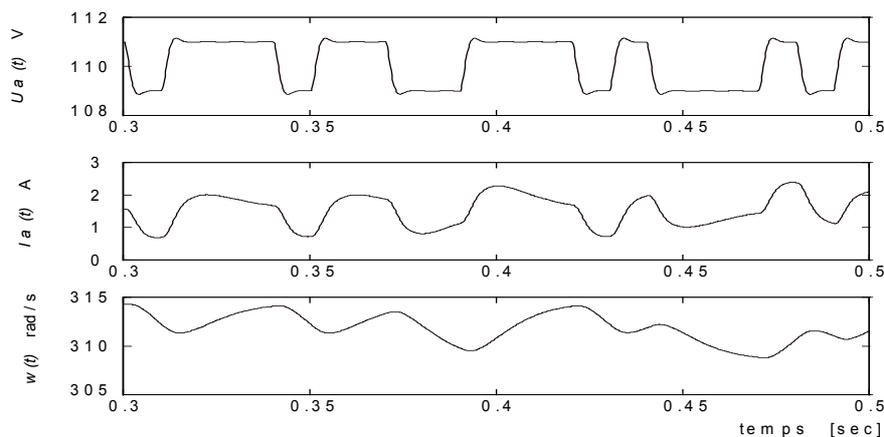


Figure II.17 : Signaux du Moteur avec  $Ua(t)+SBPA$ .

Ce signal d'excitation est une séquence binaire pseudo-aléatoire (SBPA) d'amplitude égale à  $\pm 1$  V. La SBPA a été engendrée par un registre à décalage de 7 bits. Dans le cadre de l'estimation paramétrique, la SBPA a pour objectif d'assurer la condition d'excitation persistante (cf. § II.2.6). Si

les signaux ne sont pas constants, alors il est possible de détecter les défauts des paramètres liés aux dérivées des signaux, même si ceux-ci sont de petite taille, comme il est montré à la Figure II.18.

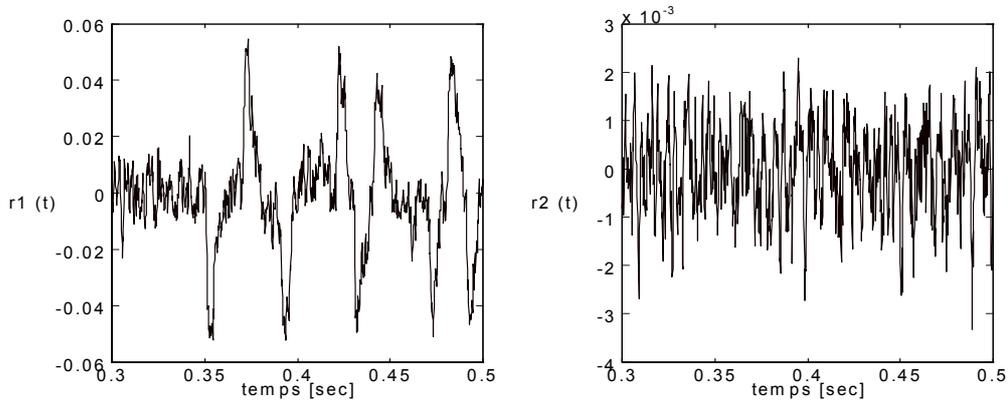


Figure II.18 : Défaut Multiplicatif  $\Delta La = +3\%$ .

Il s'agit d'une variation de  $+3\%$  de la valeur nominale du paramètre  $La$ . Le temps d'apparition du défaut est égal à 0.35 secondes. D'une part, le résidu 2 est découplé des effets du défaut  $\Delta La$  (cf. § équation II.89). D'autre part, le paramètre  $La$  est lié à la dérivée de  $\dot{I}a(t)$  dans le résidu 1. Cela veut dire que le défaut  $\Delta La$  produit un changement de l'écart type du résidu 1.

### II.3.4 Conclusion.

La sensibilité des résidus joue un rôle capital dans la détection des défauts. Le choix du seuil de détection ainsi que la structure des signatures dépendent du comportement des résidus. La valeur moyenne et l'écart type permettent, dans la plupart des cas, la détection et la localisation des défauts. Si le signal d'entrée est constant, il faut des défauts de grande amplitude pour détecter les dysfonctionnements liés aux dérivées des signaux. En revanche, si les signaux ne sont pas constants, il est possible de détecter les défauts de petite amplitude. Il faut signaler que le choix du seuil dépend de la connaissance du système et de ses défauts. Les variations qui peuvent être tolérées dans les valeurs des résidus et la structure des signatures dépendent des objectifs du système de diagnostic (cf. § I.3 et I.4).

## II.4 Conclusion.

Le modèle parallèle, l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique utilisent des descriptions basées sur la structure et le comportement afin de générer des résidus. Dans les méthodes internes de diagnostic, la fonction peut être vue comme une transformation de la structure et du comportement. Le choix de cette transformation n'est pas unique et dépend du point de vue de l'observateur.

La sensibilité des résidus dépend du point de fonctionnement du système et du type d'entrée. Le seuil de la détection est déterminé par les effets du bruit et par la variation de la valeur des résidus.

La mise en œuvre des méthodes de diagnostic dépend des contraintes imposées par le temps de détection, la complexité du calcul et la localisation. Les résidus obtenus à partir de l'espace de parité ou des observateurs possèdent un temps de détection court et une complexité de calcul moyen. Cependant l'estimation paramétrique permet une localisation plus précise du défaut.

Dans le chapitre suivant, nous allons montrer que la notion de fonction permet d'augmenter le nombre de défauts localisés. La fonction est un concept générique qui peut être utilisée dans les méthodes internes de diagnostic.

# Chapitre III

## La Notion de Fonction dans le Diagnostic

### III.1 Introduction.

Ce chapitre présente notre démarche ainsi que sa justification et des avantages de l'approche proposés dans ce travail de recherche. La démarche consiste à exploiter des concepts de l'intelligence artificielle pour les appliquer au diagnostic. La justification repose sur l'utilisation d'un modèle ontologique afin de classifier la connaissance de la tâche du diagnostic. Car le diagnostic est une méthode de solution de problèmes, qui repose sur la classification des connaissances contenues dans le modèle du système.

La fonction est une interprétation subjective de la structure et du comportement. Le nombre de défauts localisés dépend de la fonction choisie dans les méthodes internes du diagnostic. Des concepts très utiles pour la classification et l'organisation de la connaissance, tels que l'ontologie et la fonction, sont abordés au paragraphe III.2. Le paragraphe III.3 présente la classification de la connaissance et établit les conditions pour spécifier l'ontologie.

La notion de fonction peut être utilisée avec les méthodes internes du diagnostic. Les orientations pour choisir la fonction sont étudiées au paragraphe III.4. Quatre exemples extraits de la littérature permettent de montrer les avantages de la fonction dans l'espace de parité, les observateurs, l'estimation paramétrique et le modèle parallèle.

Enfin, le paragraphe III.5 présente le modèle ontologique de la détection et de la localisation de défauts. Ce modèle est obtenu à partir d'une étude des points communs entre les équations de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique. Le modèle ontologique de la détection et de la localisation de défauts ainsi que la notion de fonction sont les principaux résultats de ce travail de recherche.

### III.2 L'approche proposée : Ontologie, Fonction et Diagnostic.

Au début des années 90 les mots intelligent, expert et apprentissage sont des concepts largement acceptés et utilisés dans la commande automatique et le diagnostic. Cependant, il y a trente ans ces concepts appartenaient, presque exclusivement, au domaine de l'intelligence artificielle. L'intelligence

est l'habilité pour comprendre, raisonner et appréhender. Alors, un capteur intelligent est-il capable de comprendre, de raisonner et appréhender ? Dans le cadre de l'automatique, le mot intelligent est synonyme de simplicité d'opération et de capacité d'adaptation [Ast91]. Un capteur intelligent de phmètrie est un dispositif capable de fournir des informations concernant :

- le bon état de l'électrode;
- le bon niveau du liquide;
- les connexions des câbles.

Ainsi le capteur intelligent est capable de faire un autodiagnostic, afin de signaler si les conditions d'opération permettent d'accomplir sa mission. Dans ce contexte, l'opération du capteur intelligent devient simple, car avant de fournir une mesure erronée, le capteur signale la présence d'un dysfonctionnement. D'autre part, un système de commande intelligente est capable d'appréhender le fonctionnement d'un processus. L'apprentissage permet au contrôleur de réagir, ou de s'adapter, aux perturbations et aux différentes conditions d'opération du processus. Ainsi un système de commande intelligente utilise les avantages de la commande automatique et de l'intelligence artificielle. La Figure III.1 donne un exemple de la combinaison des systèmes experts et de l'identification [AW89], [Ast91]. Un système expert est constitué d'une base de faits, d'une base de règles et d'un moteur d'inférence. Le système expert réalise le travail d'un expert, c'est-à-dire qu'il simule les raisonnements humains afin de résoudre un problème.

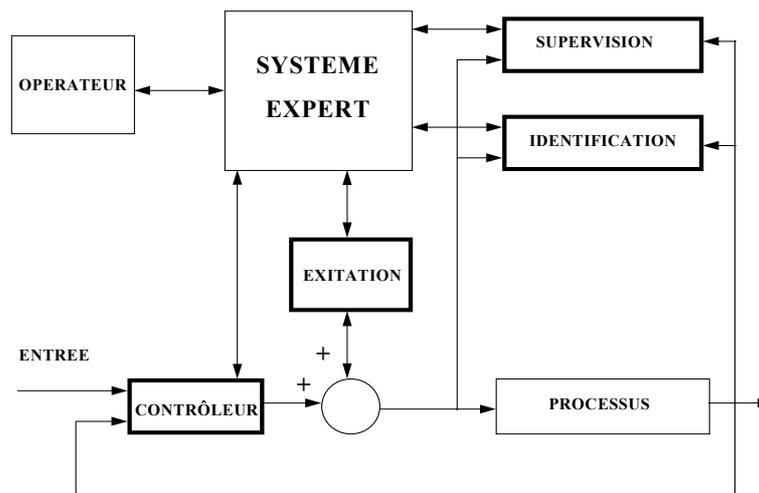


Figure III.1 : Système de Commande Intelligente.

Le système de commande intelligente est composé d'un système en boucle fermée classique (processus + contrôleur) et d'un système expert. Les blocs du contrôleur, d'excitation et d'identification contiennent plusieurs algorithmes de commande, des signaux d'excitation et des algorithmes d'identification. Le bloc de supervision intègre plusieurs algorithmes de diagnostic et celui de l'opérateur est une interface entre le processus et l'opérateur. Le bloc du système expert a pour objectif d'harmoniser le fonctionnement des autres blocs. Par exemple, un algorithme d'identification et un signal d'excitation seront choisis afin de connaître la structure et les paramètres du processus. Avec cette information, un contrôleur (PI, adaptable, optimal) permettra de maintenir l'opération adéquate du processus. Si les conditions d'opération changent (point de fonctionnement, perturbations, paramètres), le système expert permet à la commande de réagir ou de s'adapter à cette nouvelle situation.

Lors de l'apparition d'un défaut, le système expert informe l'opérateur sur l'état de fonctionnement du processus. Cette information peut être utilisée aussi bien pour la maintenance que pour la reconfiguration ou l'accommodation de défauts. Dans le domaine de l'automatique, la tâche de diagnostic est une partie essentielle des systèmes intelligents ou commandes intelligentes [Ast91]. D'après Paton [Patt97], la commande tolérante aux défauts comprend deux approches : l'approche passive qui repose sur la commande robuste et l'approche active qui utilise les principes de la commande intelligente. Deux remarques s'imposent :

- les concepts de l'intelligence artificielle ont permis de générer des idées et des techniques très utiles, qui peuvent être employées afin d'améliorer les systèmes de commande automatique [Ast91];
- la commande tolérante aux défauts est un problème complexe qui nécessite une approche multidisciplinaire : commande automatique, intelligence artificielle, sûreté de fonctionnement etc. [Pat97].

Notre travail de recherche repose sur une démarche qui rejoint les orientations données par Aström [Ast91] et Patton [Pat97]. L'approche proposée consiste à utiliser des concepts issus de l'intelligence artificielle. Des concepts tels que la connaissance interprétative, l'ontologie et la solution de problèmes seront introduits et appliqués afin de résoudre des problèmes dans le cadre de l'automatique. Trois définitions de base, issues du domaine de l'intelligence artificielle, permettent de présenter notre démarche :

- le diagnostic est une méthode de solution de problèmes qui repose sur la classification [Pup93];
- la solution d'un problème dépend des types de connaissances utilisées, de leur classification et de leur organisation [CGTT93], [JAB93];
- l'ontologie est une organisation de la connaissance conceptuelle du domaine [DR95].

Dans le cadre de l'automatique, notre approche peut être exprimée et interprétée de la façon suivante [VTS97a], [VTS97b] :

- la détection et la localisation de défauts dépendent de la classification des connaissances contenues dans les signatures;
- le critère de classification repose sur la notion de fonction des méthodes internes du diagnostic;
- le modèle ontologique donne un cadre générique et formel pour utiliser la fonction dans la détection et la localisation de défauts.

La Figure III.2 illustre la démarche proposée dans notre travail de recherche.

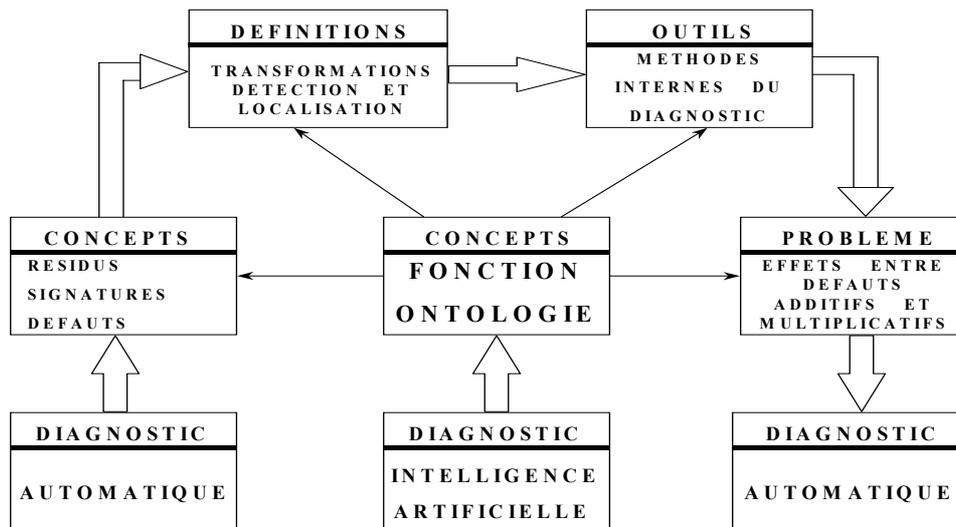


Figure III.2 : La Démarche Proposée.

Il s'agit d'utiliser la fonction et l'ontologie afin d'interpréter la connaissance contenue dans les résidus et les signatures. Cette connaissance est utilisée par l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique afin de détecter et de localiser les défauts additifs et multiplicatifs.

### III.3 Le modèle ontologique.

#### III.3.1 Introduction.

La connaissance du modèle joue un rôle capital dans les méthodes internes du diagnostic. La classification de cette connaissance permet de mieux comprendre le modèle. La structure et le comportement appartiennent à la connaissance fondamentale, tandis que la fonction et la téléologie appartiennent à la connaissance interprétative (cf. § III.3.2).

Afin de représenter la connaissance dans un cadre générique, un modèle ontologique sera spécifié. Le modèle ontologique consiste en deux éléments de base, les entités et les relations. Ainsi, la structure, le comportement, la fonction et la téléologie seront décrits à l'aide de ces éléments. Bien que les entités et les relations décrivent des concepts génériques, leurs définitions dépendent de l'objectif du modèle. Par exemple, dans le cadre du diagnostic, les résidus et les signatures sont classifiés par rapport aux entités et aux relations, afin de décrire le bon et le mauvais comportement du système.

#### III.3.2 Les classes de la connaissance.

Le modèle et l'interprétation d'un système sont conçus par rapport à la connaissance d'un domaine particulier (cf. § I.5.2). Dans le domaine du diagnostic, les méthodes internes reposent sur le modèle du système. D'après Jansweijer et al. [JAB93] et Chitaro et al. [CGTT93] la connaissance contenue dans le modèle peut être divisée en deux classes, fondamentale et interprétative, comme présenté à la Figure III.3.

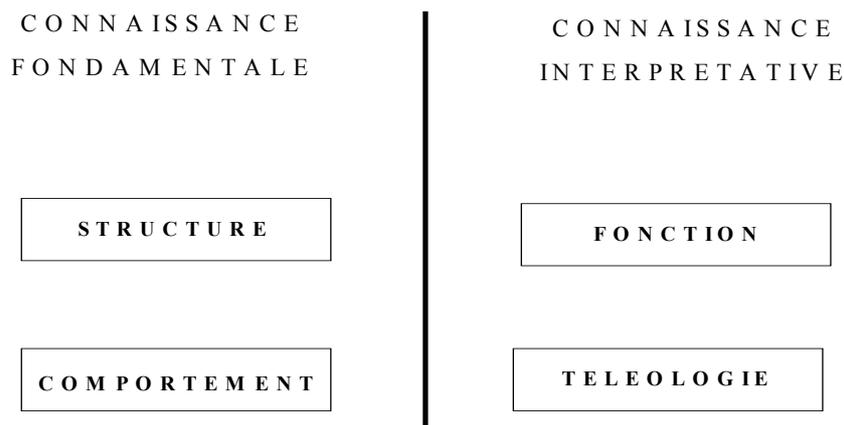


Figure III.3 : La Connaissance du Modèle.

La connaissance fondamentale est composée de la structure et du comportement. La structure décrit les éléments du système et leurs connexions. Le comportement est décrit par les équations qui caractérisent les variables et les paramètres. La connaissance interprétative inclut la fonction et la téléologie. La fonction et la téléologie sont des interprétations subjectives de la structure et du comportement [CGTT92], [ABJ91]. La fonction s'applique à un objectif particulier, tandis que la téléologie s'applique à un objectif général. Par exemple, une pompe et un moteur peuvent avoir la même téléologie ou objectif général, c'est-à-dire la transformation de puissance. Cependant, la pompe et le moteur ont des objectifs particuliers différents. En effet, l'objectif particulier de la pompe est la transformation de la puissance électrique en hydraulique, tandis que pour le moteur l'objectif particulier consiste à transformer la puissance électrique en mécanique. Dans ce contexte, la pompe et le moteur ont la même téléologie mais ont des fonctions différentes.

Les connaissances fondamentales et interprétatives peuvent être utilisées pour la modélisation des systèmes [CLCS94], [Kou91], [BY91], [Fra91b] ou pour le diagnostic [CGTT93], [ABJ91], [AB90], [CCGTT89]. Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés à la connaissance interprétative et plus particulièrement à la notion de fonction. Celle-ci sera utilisée dans la localisation de défauts (diagnostic) et non dans la modélisation des systèmes. La solution d'un problème dépend des connaissances utilisées, de leur classification et leur interprétation. Le diagnostic est une méthode de classification de problèmes qui repose sur la classification. Il est alors nécessaire de trouver un moyen pour l'emploi explicite et générique de la notion de fonction, afin de classifier la connaissance du diagnostic. A cet effet, nous définissons un modèle ontologique de la connaissance.

### III.3.3 Le modèle ontologique de la connaissance.

Dans le domaine de la philosophie, l'ontologie est l'étude des concepts et des catégories du monde [Leh92]. L'ontologie a pour objectif la définition du vocabulaire propre à un domaine. Pour construire une ontologie il faut répondre à trois questions [Bos96] :

- quels sont les concepts nécessaires pour décrire le domaine?
- comment les concepts peuvent-ils être définis?
- quel est le terme le plus adapté pour décrire le concept?

Dans les paragraphes suivants, nous répondrons à ces questions afin de définir le modèle ontologique de la connaissance.

### Quels sont les concepts nécessaires pour décrire le domaine?

L'ontologie est l'organisation de la connaissance conceptuelle du domaine [DR95]. D'après Ramoni et al. [RSMB92] deux classes d'éléments existent dans une ontologie : les entités et les relations. Ces deux éléments seront utilisés afin de décrire, de façon générique, les connaissances fondamentales et interprétatives.

### Comment les concepts peuvent-ils être définis?

Les concepts à définir sont les entités et les relations. Leur définition dépend des connaissances fondamentales et interprétatives contenues dans le modèle du système (cf. Figure III.4). Dans la structure, les entités sont définies par les composants et les relations par les connexions. Dans le comportement, les entités sont définies par les paramètres et les variables tandis que les relations sont spécifiées par les équations. Ainsi, la connaissance fondamentale (structure et comportement) est décrite à l'aide de concepts génériques, c'est-à-dire des entités et des relations. Dans le cadre de la connaissance interprétative, les entités sont définies par des objectifs et les relations par des conditions. D'une part, dans la fonction, les entités et les relations sont décrites par l'objectif particulier et les conditions. D'autre part, dans la téléologie, les entités sont définies par l'objectif général, tandis que les relations sont spécifiées par les conditions. Il est à noter que les conditions donnent un sens aux entités. Par exemple, les connexions donnent un sens aux composants afin de décrire la structure, les équations permettent de décrire le comportement en utilisant les paramètres et les variables.

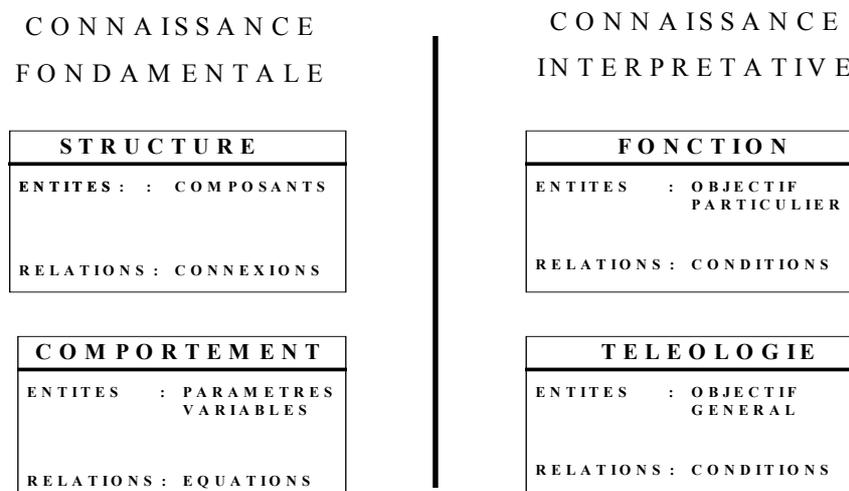


Figure III.4 : Ontologie de la Connaissance.

### Quel est le terme le plus adapté pour décrire le concept?

Le terme le plus adapté pour exprimer les concepts d'entités et de relations dépend des objectifs du modèle. Par exemple, l'ontologie de la connaissance fondamentale, représentée à la Figure III.4, a pour objectif de décrire le modèle du système par rapport aux entrées. Cependant, dans le cadre du diagnostic, l'objectif du modèle est différent et les entités et les relations doivent être définies autrement. La Figure III.5 montre que le choix du terme qui exprime les entités et les relations dépend de l'objectif du modèle.

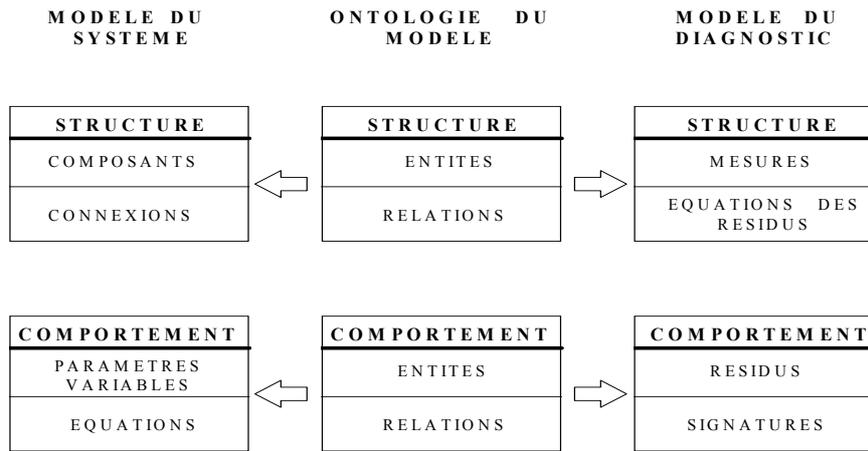


Figure III.5 : Ontologie de la Connaissance Fondamentale.

Dans la connaissance fondamentale du modèle ontologique, la structure et le comportement sont décrits par les concepts d'entités et de relations. Cependant, les modèles du système et du diagnostic utilisent des termes différents pour exprimer ces concepts. Dans la structure du modèle de diagnostic, les mesures des variables constituent les éléments de base et les équations des résidus établissent le lien entre les variables et les paramètres. Ainsi, les mesures sont le terme le plus adapté pour exprimer le concept d'entités, tandis que les équations des résidus sont le terme le plus adapté pour exprimer le concept de relations. Dans le comportement du modèle du diagnostic, les entités et les relations sont décrites par les résidus et les signatures. Ces définitions sont les plus adaptées pour exprimer le comportement du modèle du diagnostic car les résidus et les signatures permettent de connaître le bon et le mauvais fonctionnement du système.

### III.3.4 Conclusion.

Notre travail de recherche se focalise sur la connaissance utilisée dans la tâche du diagnostic. La connaissance fondamentale est décrite par la structure et le comportement, tandis que la connaissance interprétative est décrite par la fonction et la téléologie. Le modèle ontologique est un moyen pour représenter et classifier de façon générique les connaissances fondamentales et interprétatives. Les entités et les relations sont les éléments de base du modèle ontologique.

Dans le domaine du diagnostic, la structure est décrite par les mesures (entités) et les équations de résidus (relations), tandis que les résidus et les signatures permettent de décrire les entités et les relations du comportement. Les mesures et les équations des résidus représentent la connaissance fondamentale de la tâche de diagnostic. Le paragraphe suivant est consacré à l'étude de la fonction dans la localisation de défauts. Nous allons montrer que la fonction est un concept générique qui peut être utilisé dans les méthodes internes du diagnostic : l'espace de parité, les observateurs, l'estimation paramétrique et le modèle parallèle.

## III.4 La fonction dans la localisation de défauts.

### III.4.1 Introduction.

La fonction est une partie de la connaissance interprétative. Dans la plupart des cas, la tâche de diagnostic considère soit des défauts additifs et multiplicatifs, soit des défauts du type capteur, actionneur et paramètre. Cependant, il est possible d'interpréter et de classifier autrement les défauts. La fonction est une interprétation subjective de la structure et du comportement, c'est-à-dire des résidus et des signatures.

Nous montrerons que les signatures peuvent être interprétées de plusieurs façons. Chaque interprétation constitue en soi une fonction. Il est donc nécessaire de choisir la meilleure fonction pour la tâche de diagnostic. Le critère de ce choix repose sur le nombre de défauts localisés. La meilleure fonction est celle qui permet de localiser le plus grand nombre possible de défauts. La notion de fonction est un concept générique utile dans la tâche de diagnostic.

### III.4.2 Le choix de la fonction.

La fonction est une **interprétation subjective** de la structure et du comportement. Le choix du terme le plus adapté pour définir l'objectif particulier (entités) et les conditions (relations) n'est pas une tâche évidente. Dans ce mémoire, la notion de fonction est utilisée afin d'augmenter le nombre de défauts localisés. Le terme le plus adapté pour définir la fonction est celui qui permettra d'augmenter le nombre de défauts localisés. Même si cette définition peut paraître ambiguë, elle nous donne le point de départ pour définir la fonction dans les méthodes internes du diagnostic. Dans les paragraphes suivants, nous présentons plusieurs critères qui servent à classer les défauts et à définir la fonction.

Le diagnostic a pour objectif la détection et la localisation de défauts. Cependant il existe plusieurs critères pour classer les défauts. Le choix du critère dépend de l'objectif particulier souhaité. Dans la plupart des cas, les défauts sont classifiés par rapport à deux critères.

- les effets sur les états et les paramètres : défauts additifs et multiplicatifs [Ise94], [HP94], [HI96];
- les effets sur les composants : défaut capteur, défaut actionneur, défaut contrôleur et système [PC91a], [Fra91a], [Pat94], [BCCS94], [CP94].

Ces critères correspondent aux concepts de base dans le domaine de l'automatique. Cependant les défauts peuvent être classifiés en utilisant les concepts d'autres domaines, par exemple le génie électrique ou le génie hydraulique.

- effets sur les composants de base [Oga87] :
  - système électrique : résistance, inductance et capacitance;
  - système mécanique : inertie, ressort et amortisseur;
  - système hydraulique : réservoir, pompe, vanne et actionneur électromécanique;
- effets sur les variables de puissance [Wel79], [KMR90] :
  - système électrique : tension et courant;
  - système mécanique en translation : force et vitesse;
  - système mécanique en rotation : couple et vitesse angulaire;
  - système thermique : température et flux entropique;
  - système chimique : potentiel chimique et flux molar;

La décomposition d'un système permet la classification de défauts. La décomposition peut être réalisée par rapport à la structure, au comportement ou à la fonction [Keu91], [Mil87]. Les niveaux de profondeur ou granularité de la décomposition constituent une hiérarchie [Zwi95], [Hou95]. Les défauts seront donc classifiés de la façon suivante :

- effets sur la structure, le comportement et la fonction;
- effets sur les niveaux de granularité: système, sous-système, composant et élément.

Les six critères que nous avons énumérés précédemment ne constituent pas une classification exhaustive des défauts, car l'objectif de notre travail n'est pas la modélisation des systèmes. Cependant ces critères ont servi à montrer que la classification de défauts est une interprétation subjective qui dépend du point de vue de l'observateur. Par exemple, le changement de la valeur nominale d'une résistance électrique peut être interprété comme un défaut multiplicatif [HP94], un défaut électrique [VTS97b] ou un défaut thermique [DCG97]. De même, nous pouvons parler de diagnostic hiérarchique [BTR93], [Zwi95], thermique [DCG97], ou fonctionnel [ABJ91]. En résumé, les entités de la fonction sont définies par l'objectif particulier. Cet objectif dépend de l'interprétation subjective des défauts.

### **III.4.3 La fonction dans les méthodes internes du diagnostic.**

Les relations donnent un sens aux entités du modèle ontologique. La section précédente a permis de montrer les orientations qui servent à définir les entités de la fonction. Afin de montrer les orientations pour définir les relations, nous examinons quatre exemples extraits de la littérature. Ces exemples abordent le problème de diagnostic pour des systèmes de nature différente et des méthodes de diagnostic différentes :

- actionneur électromécanique : espace de parité;
- trois cuves : observateurs;
- robot : estimation paramétrique;
- moteur à courant continu en boucle fermée : modèle parallèle.

#### **III.4.3.1 La fonction et l'espace de parité.**

Il s'agit de l'actionneur électromécanique [IB96] présenté au paragraphe I.5.3. La Figure III.6 décrit deux fonctions possibles dans le cadre du modèle ontologique. La fonction 1 représente l'objectif particulier fixé par rapport aux composants tandis que la fonction 2 représente l'objectif particulier par rapport aux phénomènes physiques.

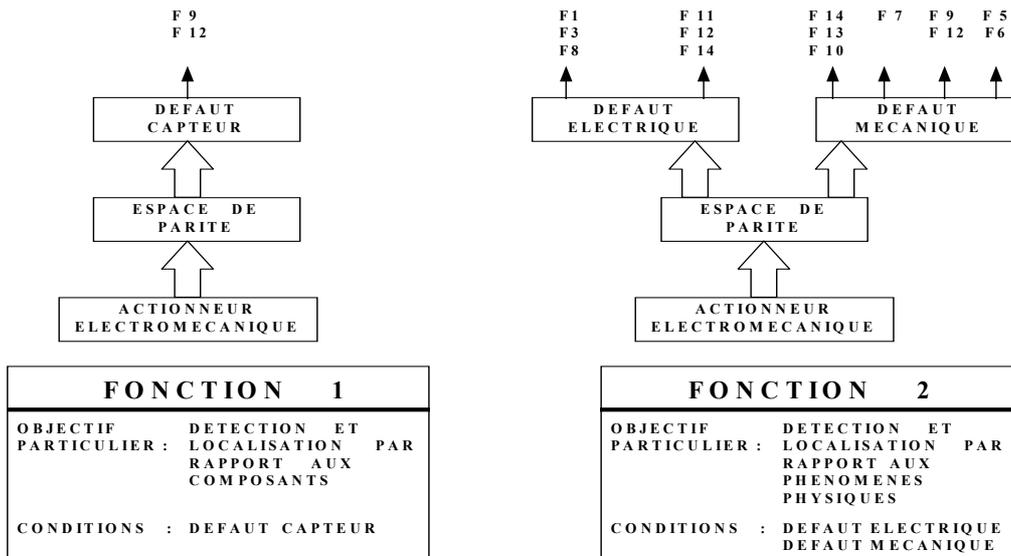


Figure III.6 : La Fonction et la Localisation avec l’Espace de Parité.

Les conditions ont pour but d’établir les limites de l’objectif particulier. La condition 1 signifie que l’Espace de Parité est utilisé pour la détection et la localisation de défauts de type capteur. Dans ce cas, il n’est possible de localiser que les défauts (F9-F12) sur le capteur Ua (cf. § I.5.3). La condition 2 signifie que l’Espace de Parité est utilisé pour la détection et la localisation de défauts du type électrique et mécanique. Ainsi, la fonction 2 permet la localisation de six défauts (F1-F3-F8, F2-F11-F14, F4-F10-F13, F9-F12 et F-F6). Deux remarques s’imposent :

- les conditions (relations) servent à donner un sens ou à fixer les limites de l’objectif particulier (entités). Par exemple, la fonction 1 est définie par la détection et la localisation de défauts des composants de type capteur, même s’il y a d’autres composants dans le système (ressort, valve etc.);
- le nombre de défauts localisés dépend de la fonction choisie. La fonction 1 permet la localisation d’un défaut (capteur Ua), tandis que la fonction 2 permet la localisation de 6 défauts (2 électriques et 4 mécaniques).

Le choix de la fonction est donc un problème d’interprétation des signatures. La fonction 1 considère que l’espace de parité a généré des résidus structurés afin de localiser les défauts de type capteur. La conception de la fonction 1 ne permet que la localisation des défauts de ce type. En revanche, la fonction 2 permet de concevoir autrement la localisation des défauts. Cette fonction considère que l’interprétation des signatures par rapport aux défauts électriques et mécaniques permet de mieux connaître l’état de fonctionnement du système.

### III.4.3.2 La fonction et les observateurs.

Il s’agit d’un système hydraulique [KNC97] composé de trois cuves (Cu1, Cu2, Cu3) et de trois conduits (C1, C2, C3). Le système a deux entrées, les débits U1 et U2. Un banc de cinq observateurs à entrées inconnues (UIO) est utilisé pour détecter et localiser six défauts (F1 à F6). Les défauts sont classifiés en deux catégories :

- fuites dans les cuves (F1, F2, F3);
- encrassement des conduits (F4, F5, F6).

La Figure III.7 montre le schéma de base du système ainsi que les signatures des défauts. Les sorties des observateurs sont utilisées afin de générer des résidus structurés. Cependant, il est

impossible de différencier une fuite dans la cuve Cu3 de l'encrassement dans le conduit C3, car comme le montre le tableau, les signatures des défauts F3 et F6 sont identiques.

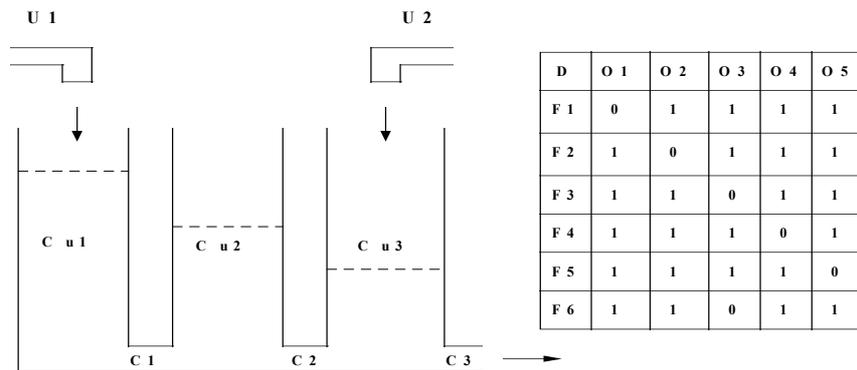


Figure III.7 : Système Hydraulique et Signatures des Défauts.

Afin de montrer l'importance de la prise en compte explicite de la fonction, nous choisissons le critère de granularité des unités physiques pour interpréter les signatures. La Figure III.8 décrit deux fonctions définies par rapport à ce critère. La fonction 1 considère que le système se compose de six unités physiques (éléments), trois cuves et trois conduits. La fonction 2 conçoit un système qui consiste de six unités physiques simples (trois cuves et trois conduits) et de trois unités physiques composées : cuve-conduit 1, cuve-conduit 2 et cuve-conduit 3.

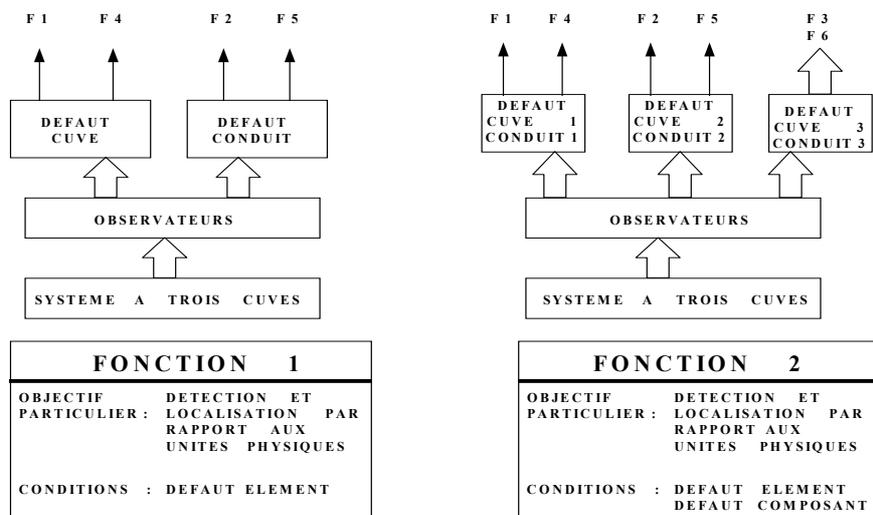


Figure III.8 : La Fonction et la Localisation avec les Observateurs.

La condition 1 établit que les observateurs sont utilisés pour la détection et la localisation des défauts de type élément. Dans ce cas, il est possible de localiser quatre défauts (F1, F2, F4, F5), car les éléments Cu3 et C3 ont des signatures identiques. La condition 2 permet de concevoir un système avec deux niveaux de granularité: les éléments et les composants. La fonction 2 permet la localisation de cinq défauts F1, F4, F2, F5 et F3-F6. Les défauts des cuves et des conduits 1 et 2 sont localisés dans le niveau de granularité des éléments; tandis que les défauts de la cuve et du conduit 3 sont localisés dans le niveau de granularité des composants. Ce niveau de granularité permet de contourner le problème des signatures identiques pour la rupture de la cuve 1 et l'encrassement du conduit 2. En effet, ces deux défauts se localisent dans le composant cuve-conduit 1. Les objectifs particuliers 1 et 2 ont la même définition, cependant les conditions 1 et 2 permettent de définir des fonctions différentes.

### III.4.3.3 La fonction et l'estimation paramétrique.

L'estimation paramétrique est utilisée pour la détection et la localisation de six défauts dans un robot [Fre91]. Il s'agit d'un robot de type sphérique dont la structure mécanique est composée de six axes rotatifs. Chacun des axes est piloté par un moteur à courant continu avec deux boucles de régulation, l'une en position et l'autre en vitesse. La Figure III.9 illustre le schéma du robot ainsi que les signatures des défauts.

ROBOT SPHERIQUE	
STRUCTURE MECANIQUE A 6 AXES	6 ACTIONNEURS ELECTRO MECANIQUES

--	GRANDE	DIMINUTION
-	DIMINUTION	
0	PAS DE CHANGEMENT	
+	AUGMENTATION	
++	GRANDE	AUGMENTATION

D	$\hat{J}$	$\hat{M}_{D0}$	$\hat{M}_{D1}$	$\hat{M}_G$
F1	0	--	-	0
F2	0	--	-	0
F3	0	++	+	0
F4	0	-	--	0
F5	++	+	0	++
F6	+	+	++	++

^ ERREUR D'ESTIMATION

Figure III.9 : Robot Sphérique et Signatures des Défauts.

La détection et la localisation des défauts reposent sur l'estimation de quatre paramètres mécaniques : l'inertie de la structure et de la charge (J), le coefficient de friction sèche ( $M_{D0}$ ), le coefficient de frottement visqueux ( $M_{D1}$ ) et le couple dû aux effets de la gravité ( $M_G$ ). Le tableau de la Figure III.9 représente les défauts d'un seul axe du robot. Les défauts F1 à F6 sont définis de la façon suivante :

- F1 : perte de la vis de sécurité de la boîte de réduction de vitesse;
- F2 : usure excessive de l'axe de l'actionneur;
- F3 : vis de sécurité trop ajustée dans la chaîne de transmission;
- F4 : surchauffe du moteur;
- F5 : surcharge de l'axe due à une charge trop lourde;
- F6 : mauvais fonctionnement du disjoncteur électromagnétique.

Il est à noter que les défauts F1 et F2 ont des signatures identiques. Si les défauts sont classifiés par rapport aux unités physiques, il est impossible de localiser les défauts F1 et F2. Cependant les défauts peuvent être classifiés autrement, comme montré à la Figure III.10. La fonction 1 classifie les défauts par rapport aux composants des unités physiques : la vis, l'axe, le moteur, la charge et le disjoncteur. Cette classification permet la localisation de quatre défauts (F2 à F6). Les défauts F1 et F2 ne sont pas localisables, car ils ont des signatures identiques.

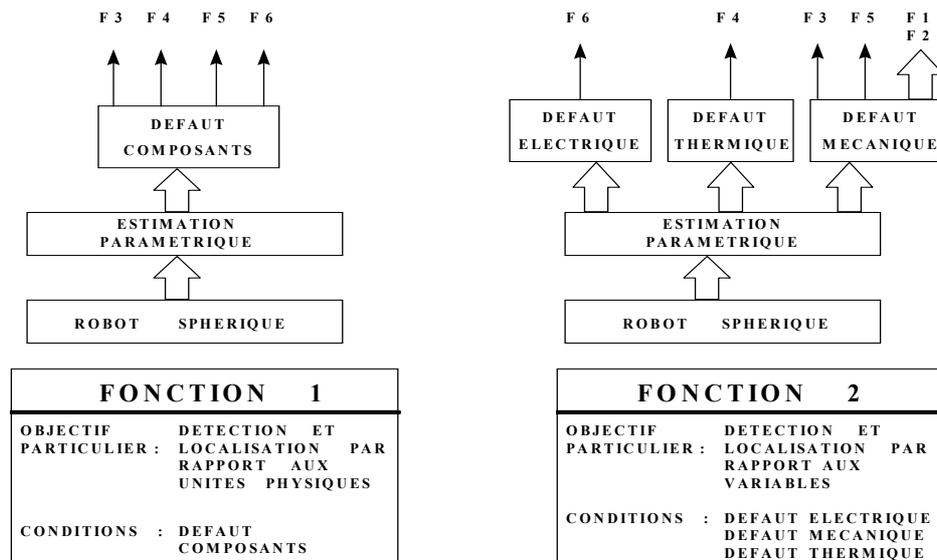


Figure III.10 : La Fonction et la Localisation avec l'Estimation Paramétrique.

La fonction 2 classe les défauts par rapport aux variables, par exemple l'usure est produite par la friction. L'usure peut être alors considérée comme un défaut mécanique. Dans ce contexte la fonction 2 est capable de localiser cinq défauts (F6, F4, F5, F3, F1-F2), car F1 et F2 sont des défauts mécaniques.

### III.4.3.4 La fonction et le modèle parallèle.

Il s'agit d'un moteur à courant continu en boucle fermée, avec un contrôleur PI en courant et un autre en vitesse [VTS97a]. Le système a deux entrées, la consigne en vitesse (U) et le couple de la charge (Ml). Un modèle parallèle est utilisé pour la détection et la localisation de défauts de type capteur, actionneur et paramètre. La description des défauts est la suivante :

- F1 : défaut sur le capteur de vitesse (Cw);
- F2 : défaut sur le paramètre de friction visqueuse (Mfl);
- F3 : défaut sur le paramètre d'inertie (J);
- F4 : défaut sur le capteur de couple (Ml);
- F5 : défaut sur l'actionneur (Uc);
- F6 : défaut sur le capteur de courant (CIa);
- F7 : défaut sur le paramètre de résistance (Ra);
- F8 : défaut sur le paramètre d'inductance (La);
- F9 : défaut sur le paramètre de flux magnétique (Fl).

Quatre résidus sont générés à partir de :

- la sortie du contrôleur PI en vitesse (r1);
- la sortie du contrôleur PI en courant (r2);
- la mesure de courant (r3);
- la mesure de vitesse (r4).

Cependant, après une analyse des signatures, seuls les résidus 1 et 2 sont retenus pour la détection et la localisation des défauts. La Figure III.11 montre le schéma de base du système ainsi que les signatures obtenues.

M O T E U R   A   C . C . E N   B O U C L E F E R M E E		
C A P T E U R S	A C T I O N N E U R S	P A R A M E T R E S

r	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
r1	1-	1+	0	1+	0	1+	0	0	1-
r2	1-	0	0	1+	1-	0	1+	0	1+

1 +    V A L E U R   P O S I T I V E   D U   R E S I D U  
 0      P A S   D E   C H A N G E M E N T  
 1 -    V A L E U R   N E G A T I V E   D U   R E S I D U

Figure III.11 : Moteur en Boucle Fermée et Signatures des Défauts.

Les signatures de la Figure III.11 montrent qu'il est possible de localiser cinq défauts (F1, F4, F5, F7 et F9). Cependant il faut signaler que ces signatures ont été obtenues par l'augmentation des valeurs nominales des composants du système (capteur, actionneur et paramètre). Si les défauts sont produits par une diminution des valeurs nominales, les signes des signatures vont alors changer. Par exemple, la signature de F1 sera égale à [1+ 1+]. Dans ce contexte, il est possible de localiser seulement le défaut F9. Le nombre de défauts localisés peut être augmenté si les défauts sont classifiés autrement, comme montré à la Figure III.12.

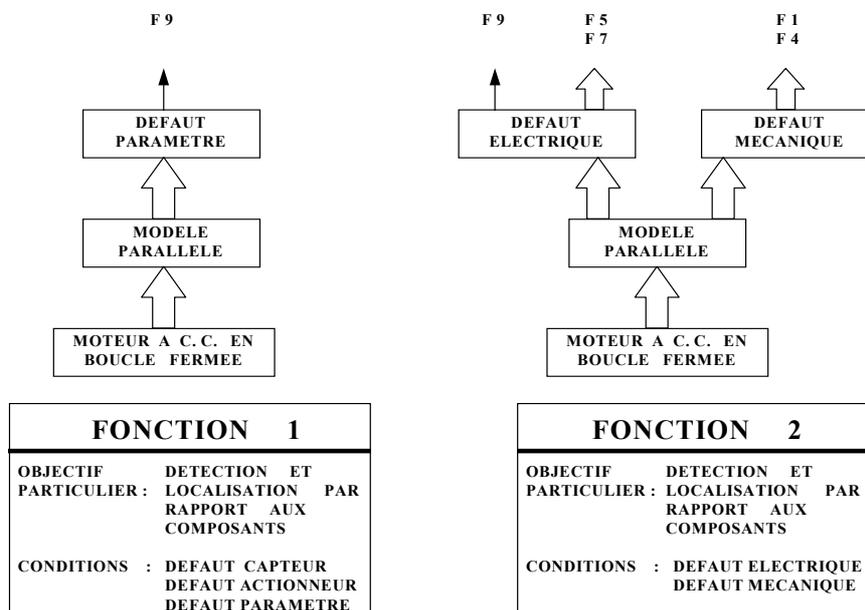


Figure III.12 : La Fonction et la Localisation avec le Modèle Parallèle.

La fonction 1 considère qu'il existe trois types de composants dans le système : les capteurs, les actionneurs et les paramètres. Cette classification prend en compte les unités physiques (capteur et actionneur) et les équations (paramètres). La fonction 1 permet seulement la localisation du défaut F9, qui correspond à une variation de valeur du flux magnétique. Cependant la fonction 2 permet d'augmenter le nombre de défauts localisés. Pour accomplir ce but, il faut interpréter autrement les dysfonctionnements du système. Par exemple, un défaut du capteur de vitesse (Cw) peut être considéré

comme un défaut mécanique, car la vitesse est une variable mécanique. En considérant des défauts de type électrique et mécanique, la fonction 2 permet la localisation de trois défauts, deux électriques (F9, F5-F7) et un mécanique (F1-F4).

### **III.4.4 Conclusion.**

Le nombre de défauts localisés dépend de la classification des défauts. Cette classification repose sur la fonction. L'objectif particulier (entités) et les conditions (relations) définissent la fonction dans le modèle ontologique. Le choix de la fonction dépend des interprétations subjectives du système par rapport aux signatures.

La nature des systèmes, leurs variables ou la granularité peuvent être utilisées pour définir la fonction. Chacun de ces critères représente une fonction. Dans la tâche de diagnostic, la meilleure fonction est celle qui permet de localiser le plus grand nombre de défauts. Les exemples présentés montrent que la notion de fonction peut être appliquée à l'espace de parité, aux observateurs, à l'estimation paramétrique et au modèle parallèle.

## **III.5 Le modèle ontologique de la détection et la localisation de défauts.**

### **III.5.1 Introduction.**

Le modèle ontologique de la détection et de la localisation de défauts est composé de la connaissance fondamentale et de la connaissance interprétative. Les méthodes internes du diagnostic ont des caractéristiques communes. Le modèle ontologique permet d'exprimer d'une façon générique ces caractéristiques.

Dans le modèle ontologique, la téléologie et la fonction sont décrites par des entités et des relations. La détection et la localisation de défauts dépendent de l'objectif général et l'objectif particulier. Ces objectifs et leurs conditions seront choisis par rapport à la tâche de diagnostic, afin de décrire le modèle ontologique de la connaissance interprétative.

### **III.5.2 La fonction et la téléologie dans le modèle ontologique.**

La fonction et la téléologie décrivent la connaissance interprétative du système et de la tâche de diagnostic. Dans le modèle ontologique, les conditions définissent l'objectif particulier (fonction) et l'objectif général (téléologie). Dans la détection et la localisation de défauts, la fonction et la téléologie peuvent être exprimées de la façon suivante [VTS97b] :

#### **TELEOLOGIE.**

OBJECTIF GENERAL : SIGNALER UN DYSFONCTIONNEMENT;

#### **FONCTION.**

## OBJECTIF PARTICULIER : DETECTION ET LOCALISATION.

Il est à noter que les résidus du modèle parallèle et de l'espace de parité sont des équations de parité (cf. § II.2). En effet, les équations de parité dans le modèle parallèle sont obtenues à partir d'une représentation d'entrée-sortie, tandis que dans l'espace de parité les équations sont obtenues à partir d'une représentation d'état. Les caractéristiques des équations de parité sont alors valables aussi bien pour le modèle parallèle que pour l'espace de parité.

Les conditions sont aussi importantes que les objectifs pour définir la fonction et la téléologie. Afin de trouver ces conditions, il faut étudier les caractéristiques des méthodes internes de diagnostic. D'après Isermann [Ise94] les principales caractéristiques des Equations de Parité, des Observateurs et de l'Estimation Paramétrique sont les suivantes :

### **Equations de Parité :**

- la structure et les paramètres du modèle doivent être connus;
- sont bien adaptées pour les défauts additifs;
- temps de réponse court par rapport aux défauts soudains;
- l'utilisation en ligne est possible même pour les processus rapides;
- pour les défauts additifs, il est nécessaire que les signaux d'entrée soient excités. Cependant, il est impossible de détecter tous les défauts paramétriques;
- pour la détection des défauts liés aux constantes de temps, l'amplitude du défaut doit être grande. Si l'amplitude est petite, seuls les défauts additifs ou les défauts liés aux gains peuvent être détectés;

### **Observateurs :**

- la structure et les paramètres du modèle doivent être connus;
- sont bien adaptés pour les défauts additifs;
- dans la plupart des cas, il est nécessaire d'utiliser plusieurs signaux de sortie;
- temps de réponse court par rapport aux défauts soudains;
- la détection des défauts paramétriques dépend de la sélection des variables d'état et du type du banc des observateurs;
- pour les processus rapides, l'utilisation en ligne dépend du nombre d'observateurs;
- l'excitation des signaux d'entrée n'est pas nécessaire pour les défauts additifs. Cependant il est impossible de détecter tous les défauts paramétriques;
- dans la plupart des cas, seuls les défauts de grande amplitude peuvent être détectés .

### **Estimation Paramétrique :**

- la structure du modèle doit être connue;
- bien adaptée pour les défauts multiplicatifs et les défauts additifs sur les signaux d'entrée et de sortie;
- quelques défauts paramétriques sont seulement détectables;
- il est possible de détecter les défauts soudains ou progressifs même s'ils sont de petite amplitude;
- il est possible de diagnostiquer les défauts liés aux coefficients physiques;
- l'utilisation en ligne est possible si le processus n'est pas très rapide;
- l'excitation persistante est nécessaire.

En comparant les caractéristiques des équations de parité, des observateurs et de l'estimation paramétrique, il est possible de trouver des points communs entre ces méthodes de diagnostic. Le choix de ces points et leur classification est une interprétation subjective qui dépend du point de vue de l'observateur. Dans le cadre du modèle ontologique, cette interprétation a pour objectif de répondre à la question suivante : quel est le terme le plus adapté pour exprimer les concepts des relations. Quatre points communs permettent de définir les conditions (relations) de la fonction et de la téléologie [VTS97b] :

- la connaissance de la structure du modèle;
- la connaissance des paramètres du modèle;
- le type de défaut;
- le type d'entrée.

La Figure III.13 illustre la classification de ces points par rapport à la connaissance interprétative. Dans la connaissance interprétative du modèle, les entités sont décrites par l'objectif particulier (fonction) et général (téléologie) tandis que les conditions sont définies par les conditions des objectifs.

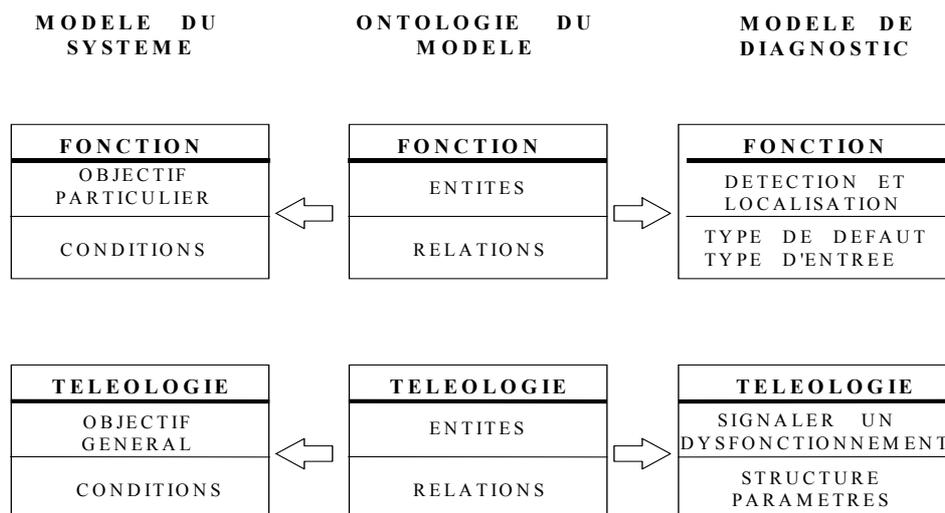


Figure III.13 : Ontologie de la Connaissance Interprétative.

Dans le cadre du diagnostic, l'objectif général consiste à signaler un dysfonctionnement. La connaissance de la structure et les paramètres sont les conditions qui donnent un sens ou valident l'objectif général. Par exemple, si les équations de parité sont utilisées pour signaler un dysfonctionnement, il faut connaître la structure et la valeur des paramètres du modèle. L'objectif particulier ou fonction est la détection et la localisation. Le type de défaut et le type d'entrée sont les conditions qui permettent d'accomplir cet objectif. Par exemple la détection et la localisation de défauts de type multiplicatif nécessite la condition d'excitation persistante (type d'entrée).

### III.5.3 Le modèle ontologique des méthodes internes du diagnostic.

Le modèle ontologique des méthodes internes du diagnostic décrit les caractéristiques communes entre l'espace de parité, les observateurs, l'estimation Paramétrique et le modèle parallèle. Ces méthodes ont pour objectif la détection et la localisation de défauts. Dans ce contexte, le modèle ontologique des méthodes internes et le modèle ontologique de la détection et de la localisation constituent des expressions similaires.

Le modèle ontologique décrit les connaissances fondamentale et interprétative. Dans le domaine du diagnostic , la structure, le comportement, la fonction et la téléologie représentent la connaissance de la tâche de diagnostic. La Figure III.14 montre le modèle ontologique de la détection et de la localisation de défauts. Il s'agit en fait, d'une synthèse des résultats présentés aux Figures III.5 et III.13. Le modèle ontologique permet la description générique des connaissances fondamentale et interprétative en utilisant des entités et des relations. La structure et le comportement représentent la connaissance fondamentale. Les mesures et les équations des résidus décrivent la structure tandis que le comportement est décrit par les résidus et les signatures. La fonction et la téléologie sont des interprétations subjectives de la structure et du comportement. L'objectif, général et particulier, ainsi que leurs conditions définissent la téléologie et la fonction.

## DETECTION ET LOCALISATION DE DEFAUTS

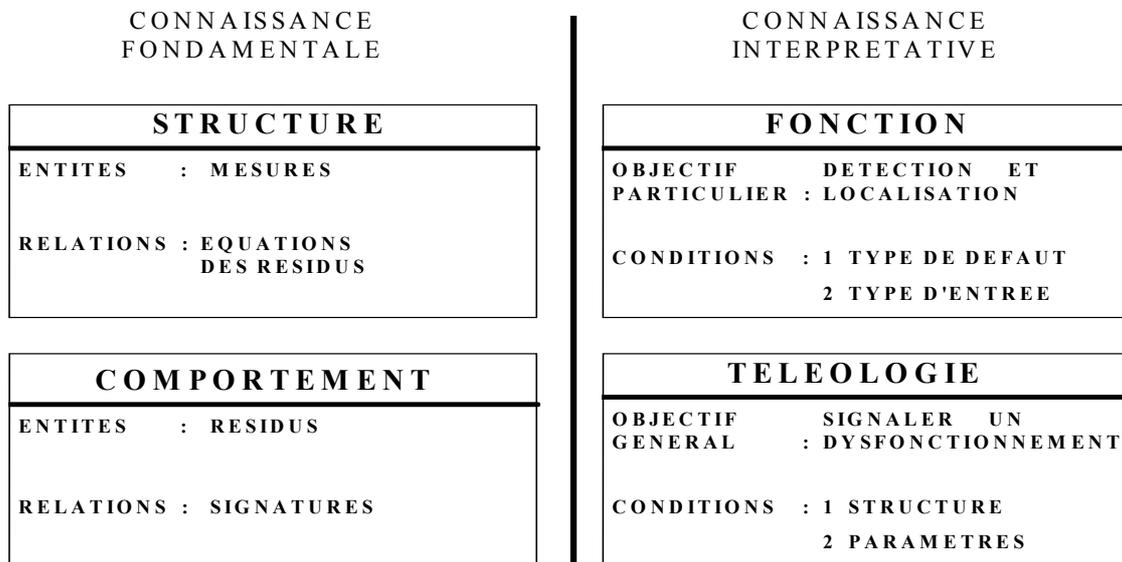


Figure III.14 : Modèle Ontologique de la Détection et la Localisation de Défauts.

Notre travail de recherche se focalise sur la notion de fonction pour la détection et la localisation de défauts. Le nombre de défauts localisés dépend de la fonction choisie dans la tâche de diagnostic. L'objectif particulier et ses conditions permettent de définir la fonction.

Dans le modèle ontologique, l'objectif particulier décrit les entités tandis que les conditions décrivent les relations. Les entités et les relations sont des termes génériques qui permettent de représenter les connaissances fondamentale et interprétative de la tâche de diagnostic.

L'apport de notre travail de recherche consiste à utiliser la notion de fonction pour la détection et la localisation de défauts. Le modèle ontologique est un cadre générique et formel qui permet d'utiliser la notion de fonction avec les quatre méthodes internes du diagnostic.

### **III.5.4 Conclusion.**

La connaissance de l'espace de parité, des observateurs, de l'estimation paramétrique et du modèle parallèle peut être décrite à l'aide des entités et des relations. La structure, le comportement, la fonction et la téléologie représentent les connaissances fondamentales et interprétatives.

Le modèle ontologique de la détection et de la localisation de défauts utilise les mesures et les équations des résidus pour représenter la connaissance fondamentale. La connaissance interprétative est décrite par la téléologie ou objectif général et par la fonction ou objectif particulier. La téléologie a pour objectif de signaler un dysfonctionnement, tandis que la fonction a pour objectif la détection et la localisation.

La connaissance de la structure et des paramètres du modèle sont les conditions qui permettent de signaler un dysfonctionnement. La détection et la localisation dépendent de deux conditions : le type de défaut et le type d'entrée.

### **III.6 Conclusion.**

L'approche proposée présente deux avantages principaux. Le premier avantage consiste à obtenir une représentation plus naturelle des dysfonctionnements dans le système. Les défauts peuvent en effet être classifiés par rapport aux variables et aux composants physiques. Le deuxième avantage consiste à localiser le plus grand nombre possible de défauts, en présence de signatures identiques.

Des concepts issus de l'intelligence artificielle tels que la fonction et l'ontologie peuvent être appliqués en automatique. Ces concepts s'avèrent très utiles pour la détection et la localisation de défauts. Les méthodes internes de diagnostic reposent sur la connaissance du modèle du système. La connaissance fondamentale est décrite par la structure et le comportement tandis que la fonction et la téléologie représentent la connaissance interprétative.

Le modèle ontologique est un moyen pour organiser et classifier la connaissance. Les entités et les relations sont les éléments de base qui permettent de décrire une ontologie. Dans le domaine du diagnostic, la structure et le comportement sont décrits par les mesures, les équations des résidus, les résidus et les signatures.

La fonction et la téléologie sont des interprétations subjectives de la structure et du comportement. Ces interprétations dépendent du point de vue de l'observateur. Dans le modèle ontologique, la fonction et la téléologie sont décrites à l'aide des objectifs (entités) et des relations (conditions). La fonction est un objectif particulier tandis que la téléologie représente un objectif général.

Le modèle ontologique de la détection et de la localisation de défauts donne un cadre générique et formel pour utiliser la fonction dans la tâche du diagnostic. Les points communs entre les équations de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique permettent de définir les conditions et les relations de la fonction et la téléologie. Le type de défaut et le type d'entrée définissent les conditions de la fonction. La connaissance de la structure et des paramètres du modèle exprime les conditions de la téléologie.

Le nombre de défauts localisés dépend de la fonction choisie dans la tâche du diagnostic. La fonction est un concept qui peut être appliqué dans les équations de parité, les observateurs,

l'estimation paramétrique et le modèle parallèle. La fonction est une interprétation subjective qui dépend du point de vue de l'observateur. Donc la meilleure interprétation subjective ou fonction est celle qui permet de localiser le plus grand nombre possible de défauts.

Dans le chapitre IV, les sujets de l'évaluation et de la décision sont abordés. Nous montrerons que les connaissances de l'évaluation et de la décision peuvent être classifiées en utilisant un modèle ontologique. A cet effet, les modèles ontologiques des résidus et du réseau de causalité seront établis à partir des caractéristiques les plus représentatives des résidus et des défauts.

# Chapitre IV

## L'Évaluation et la Décision.

### IV.1 Introduction.

La solution d'un problème dépend du type de connaissances utilisées, de leur classification et de leur organisation. Ce chapitre aborde ce sujet pour les étapes d'évaluation et de décision. La connaissance contenue dans les résidus, les symptômes et les signatures est classifiée et organisée à l'aide d'un modèle ontologique.

Le paragraphe IV.2 est consacré aux définitions de base de l'étape d'évaluation ainsi qu'à la description du modèle ontologique des résidus. Les concepts d'hypothèses, de fausses alarmes et de manque à la détection sont présentés afin d'étudier les tests d'évaluation d'hypothèses binaires ainsi que les tests non statistiques de logique à seuil. Le modèle ontologique représente les connaissances fondamentales et interprétatives contenues dans les résidus.

Le paragraphe IV.3 aborde le problème de la décision pour le diagnostic. Le réseau de causalité est utilisé afin de représenter et d'interpréter la connaissance contenue dans les symptômes et les signatures. Le modèle ontologique du réseau de causalité repose sur la notion de fonction pour la localisation de défauts. Finalement, le paragraphe IV.4 présente les conclusions. Ce quatrième chapitre utilise une partie des résultats déjà présentés dans les chapitres I (cf. § I.4) et III (cf. § III.3).

### IV.2 L'évaluation et l'ontologie.

#### IV.2.1 Introduction.

Le problème de l'évaluation consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut. Pour formaliser le problème de l'évaluation, on considère que chaque élément de la signature est assimilable à une grandeur aléatoire dont on connaît les paramètres statistiques [Zwi95] (valeur moyenne, variance, loi de densité). Les tests statistiques ont pour objectif de rationaliser, à partir

d'informations partielles, la prise de décision dans l'étape d'évaluation. Cette prise de décision permet de contrôler les risques d'erreurs en les maintenant dans des limites fixées à l'avance.

Les caractéristiques principales des tests statistiques sont :

- la connaissance des lois statistiques qui régissent les variables aléatoires;
- la définition du nombre d'hypothèses;
- l'acceptation d'un risque d'erreur dans la décision de l'évaluation;
- le choix d'une statistique qui est fonction de la taille des échantillons observés;
- le choix d'une règle de décision dans l'évaluation;
- l'observation de l'échantillon.

## IV.2.2 Tests d'hypothèses binaires.

Les tests d'hypothèses binaires utilisent un nombre fixe d'observations et sont d'autant plus performants que le nombre d'observations utilisées est grand [BLJRV90]. La présence d'un défaut sur le système se traduit par une modification des caractéristiques stochastiques d'un ou plusieurs résidus, telles que la moyenne ou la variance [IP96]. On considère, pour chacun des indicateurs de défauts ou résidus, un état normal et un état anormal auquel on associe les hypothèses suivantes [Coi92] :

- $H_0$  : hypothèse de fonctionnement normal;
- $H_1$  : hypothèse de fonctionnement anormal.

L'évaluation des résidus conduit aux deux décisions  $D_0$  et  $D_1$  : retenir  $H_0$  ou rejeter  $H_0$ . En réalité, quatre types de situations et donc de décisions peuvent être rencontrés [Zwi95] :

- $D_{00}$  :  $H_0$  est retenue et  $H_0$  est vraie (décision correcte);
- $D_{01}$  :  $H_0$  est retenue et  $H_1$  est vraie (manque à la détection);
- $D_{10}$  :  $H_1$  est retenue et  $H_0$  est vraie (fausse alarme);
- $D_{11}$  :  $H_1$  est retenue et  $H_1$  est vraie (décision correcte).

Seules les décisions  $D_{00}$  et  $D_{11}$  sont des décisions correctes. La décision  $D_{01}$  correspond à un manque à la détection ou non détection du défaut. La décision  $D_{10}$  représente une fausse alarme car le système est déclaré défaillant alors qu'en réalité il fonctionne normalement.

Les tests d'hypothèses binaires s'appuient sur la connaissance des densités de probabilité conditionnelle qui caractérisent  $H_0$  et  $H_1$ .

$$P_D = P(H_1_{choisie} / H_1_{vraie}) = \int_{E_0} P(z / H_0) dz$$

(IV.1)

$$P_F = P(H_1_{choisie} / H_0_{vraie}) = \int_{E_1} P(z / H_0) dz$$

(IV.2)

$$P_{ND} = P(H_0_{choisie} / H_1_{vraie}) = \int_{E_0} P(z / H_1) dz = 1 - P_D$$

(IV.3)

où :

- $P_D$  est la probabilité de détection, associée à la décision  $D_{11}$ ;
- $P_F$  est la probabilité de fausse alarme, associée à la décision  $D_{10}$ ;

- $P_{ND}$  est la probabilité de non détection, associée à la décision  $D01$ ;
- $z$  est l'espace des observations;
- $E_0$  est l'espace d'observation de l'hypothèse  $H0$ ;
- $E_1$  est l'espace d'observation de l'hypothèse  $H1$ .

Pour avoir une prise de décision optimale dans l'évaluation des résidus, il faut minimiser les probabilités de fausses alarmes et de non détection, ce qui est impossible à réaliser simultanément. Il est donc nécessaire de définir des critères de choix entre les hypothèses  $H0$  et  $H1$ . Plusieurs tests sont proposés dans la littérature pour résoudre le problème de la détection selon deux hypothèses  $H0$  et  $H1$ , à partir de l'observation de  $N$  mesures de  $z$  et de la connaissance des densités de probabilité  $P(z/H0)$  et  $P(z/H1)$ . Dans les paragraphes suivants les tests de Bayes et de Newman Pearson seront présentés.

### Test de Bayes.

Le test de Bayes consiste à minimiser la probabilité d'erreur  $P_{\mathcal{E}}$  lors d'une prise de décision.  $P_{\mathcal{E}}$  est définie comme la somme de deux probabilités [Coi92], [BLJRV90].

$$P_{\mathcal{E}} = P(H1_{choisie}, H0_{vraie}) + P(H0_{choisie}, H1_{vraie})$$

(IV.4)

En utilisant le théorème de Bayes, les deux probabilités peuvent être exprimées à partir des probabilités a priori  $H0$  ( $P0$ ) ou  $H1$  ( $P1$ ) et des probabilités conditionnelles.

$$P(AB) = P(B)P(A / B)$$

(IV.5)

$$P(H1_{choisie}, H0_{vraie}) = P0P(H1 / H0_{vraie})$$

(IV.6)

$$P(H1_{choisie}, H0_{vraie}) = P0 P_F$$

(IV.7)

$$P(H0_{choisie}, H1_{vraie}) = P1P(H0 / H1_{vraie})$$

(IV.8)

$$P(H0_{choisie}, H1_{vraie}) = P1 P_{ND}$$

(IV.9)

La probabilité  $P_{\mathcal{E}}$  s'écrit alors sous la forme suivante :

$$P_{\mathcal{E}} = P0 P_F + P1 P_{ND}$$

(IV.10)

$$P_{\mathcal{E}} = P0 + \int_{E_0} [P1P(z / H1) - P0P(z / H0)] dz$$

(IV.11)

Si l'hypothèse  $H0$  est retenue, la probabilité d'erreur associée sera minimale si la quantité sous le signe somme est négative :

$$P_1 P(z / H_1) - P_0 P(z / H_0) < 0$$

(IV.12)

$$\Lambda = \frac{P(z / H_1)}{P(z / H_0)} < \frac{P_0}{P_1}$$

(IV.13)

La quantité  $\Lambda$  est par définition le rapport de vraisemblance. Le test de Bayes consiste à tester le rapport de vraisemblance en le comparant à un seuil qui dépend des probabilités a priori  $P_0$  et  $P_1$ .

si  $\Lambda < \frac{P_0}{P_1}$ , on retient  $H_0$

si  $\Lambda > \frac{P_0}{P_1}$ , on retient  $H_1$

### Test de Newman Pearson.

Il est difficile d'affecter des valeurs convenables aux probabilités a priori, comme l'impose le test de Bayes. Un bon test est tel que la probabilité de fausse alarme soit la plus faible possible et la probabilité de détection la plus grande. Ces deux objectifs étant incompatibles, le test de Newman Pearson consiste à maximiser la probabilité de détection  $P_D$  étant donné la probabilité de fausse alarme  $P_F$  [Zwi95]. Comme  $P_D + P_{ND} = 1$ , maximiser la probabilité de détection  $P_D$  est alors équivalent à minimiser la probabilité de non détection  $P_{ND}$  sous la contrainte  $P_F = P_{F0}$ . Le critère à minimiser est alors le suivant [RDMB90] :

$$C = P_{ND} + \lambda (P_F - P_{F0})$$

(IV.14)

$$C = \lambda (1 - P_{F0}) + \int_{E_0} [P(z/H_1) - \lambda P(z/H_0)] dz$$

(IV.15)

où :

$\lambda$  est un paramètre positif appelé multiplicateur de Lagrange;

Pour que  $C$  soit minimal il faut que la quantité à intégrer soit négative.

$$P(z / H_1) - \lambda P(z/H_0) < 0$$

(IV.16)

La règle de décision est alors donnée par le rapport de vraisemblance.

si  $\Lambda < \lambda$ , on retient  $H_0$

si  $\Lambda > \lambda$ , on retient  $H_1$

Le paramètre  $\lambda$  est ajusté pour vérifier la contrainte :

$$P_F = \int_{E_1} P(z / H_0) dz = P_{F0}$$

(IV.17)

Le test de Newman Pearson correspond donc à un test sur le rapport de vraisemblance dont le seuil est défini par la contrainte  $P_{F0}$ .

### IV.2.3 Tests non statistiques de logique à seuil.

Ce test est le plus simple à mettre en œuvre. Il consiste simplement en un test sur l'amplitude du signal. Les seuls paramètres de réglage sont les amplitudes des seuils qui sont réglées en fonction des différentes hypothèses de fonctionnement et de performances désirées pour l'évaluation (cf. § II.3.3). Les tests non statistiques de logique à seuil fournissent une détection très rapide de défauts soudains. En revanche, ces tests ne sont pas bien adaptés pour la détection de défauts de faible amplitude telle que l'apparition de petits biais ou de dérives. Cependant, les tests non statistiques de logique à seuil ont prouvé leur efficacité pour le diagnostic d'un moteur de voiture [GCFKMM95 ], [GC94 ] et la détection de petits biais (5%) sur les capteurs de pression d'un système hydraulique [BJRE97]. Le choix du type de test dépend de la connaissance du système et de ses défauts. Cette connaissance joue un rôle capital dans la spécification du système de diagnostic (cf. § I.4). Dans la section suivante, l'étape d'évaluation de résidus est définie en utilisant, d'une part, les caractéristiques de la tâche, le modèle et le défaut (cf. § I.4) et, d'autre part, le modèle ontologique (cf. § III.3).

### IV.2.4 L'ontologie des résidus.

Ce paragraphe aborde le sujet de la classification des connaissances de l'étape d'évaluation. L'étape d'évaluation a pour objectif de quantifier les résidus afin de produire des symptômes [Ise94]. Les résidus contiennent l'information ou connaissance correspondant aux modèles de bon et de mauvais fonctionnement. Il faut rappeler le lien entre les tâches de diagnostic (détection et localisation) et les étapes de diagnostic (génération, évaluation et décision). Au niveau de la spécification, du dessin et de la construction, les sous tâches de détection et de localisation sont accomplies à l'aide d'une étape de génération de résidus (cf. § I.4.3). L'étape de génération de résidus doit être capable d'engendrer des indicateurs de défauts (résidus) avec des caractéristiques particulières. Par exemple, l'étape de génération de résidus doit fournir, en principe, des résidus fortement détectables et des signatures différentes (cf. § I.3.2). Dans ce contexte et au niveau de la mise en œuvre, les termes évaluation et détection sont des termes synonymes. De même, la décision et la localisation ont le même sens par rapport à la mise en œuvre. Dans le cadre du diagnostic, il n'y a pas de solution universelle car les modèles décrivent seulement une partie du système [Lei93]. Ainsi, il est nécessaire de classifier et d'organiser la connaissance la plus représentative. Le modèle ontologique (cf. § III.3) permet de classifier et d'organiser la connaissance de l'étape d'évaluation des résidus. La Figure IV.1 illustre le synoptique de l'approche proposée.

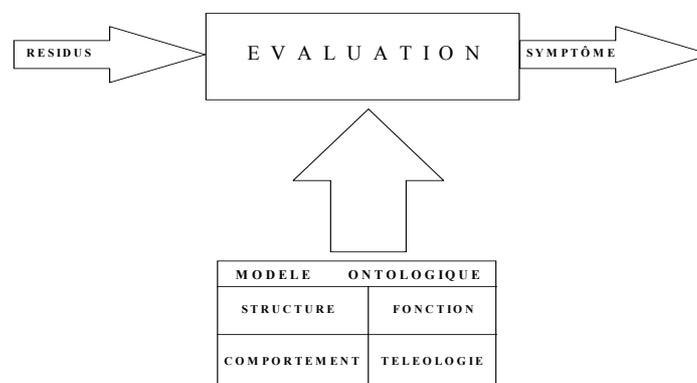


Figure IV.1 : Modèle Ontologique de l'Évaluation.

Il s'agit d'utiliser le modèle ontologique afin de définir l'étape d'évaluation des résidus. Le modèle ontologique est décrit par la structure, le comportement, la fonction et la téléologie. Le point de départ est donné par les caractéristiques des résidus. Les changements de valeur moyenne et d'écart type signalent la présence de défauts dans le système [Ise97a], [IP96]. La moyenne et l'écart type permettent de caractériser les résidus. Dans ce contexte, la connaissance contenue dans les résidus peut être utilisée afin de définir la structure et le comportement du modèle ontologique, comme montré à la Figure IV.2

C O N N A I S S A N C E		F O N D A M E N T A L E	
<b>S T R U C T U R E</b>			
<b>ENTITES</b>	:	TRANSITOIRE	
		NIVEAU	
		OSCILLATION	
<b>RELATIONS</b>	:	SEQUENCE	D'APPARITION
<b>C O M P O R T E M E N T</b>			
<b>ENTITES</b>	:	MOYENNE	
		ECART TYPE	
<b>RELATIONS</b>	:	TESTS	

Figure IV.2 : Connaissance Fondamentale dans l'Evaluation.

Dans le cadre du modèle ontologique, la structure et le comportement son décrits par les concepts d'entités et des relations. (cf. § III.3.3). L'**oscillation**, le **transitoire** et le **niveau** sont des termes qui servent à décrire les entités de la structure, tandis que la **séquence d'apparition** représente les relations. La moyenne et l'écart type définissent les entités dans le comportement des résidus, tandis que les relations sont décrites par les tests. La Figure IV.3 permet de clarifier ces idées.

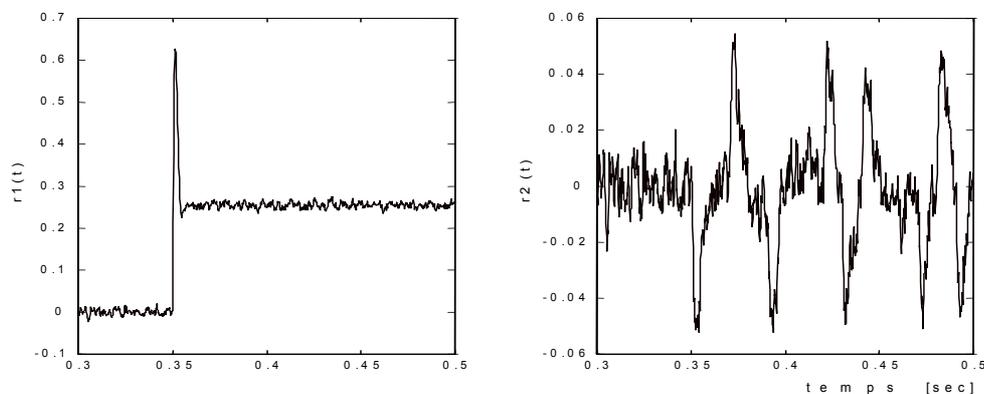


Figure IV.3 : Structure et Comportement des Résidus.

Une oscillation, un transitoire et un niveau sont les trois éléments de base qui permettent de décrire la structure des résidus. D'après Gertler et al [GCFMM95], [GC94], ces trois grandeurs peuvent être utilisées, en combinaison avec deux seuils, pour détecter les changements de la valeur moyenne et de l'écart type des résidus. Il faut signaler que les entités et les relations de la structure et du comportement des résidus peuvent être définies autrement. Par exemple, un résidu peut être caractérisé par son énergie et sa puissance [Zwi95].

Le choix des termes les plus adaptés pour décrire les entités et les relations de la structure et du comportement dépend de :

- l'objectif du modèle;
- la connaissance du bon et du mauvais fonctionnement du système.

La connaissance interprétative comporte la fonction et la téléologie. La fonction est un objectif particulier et la téléologie représente un objectif général (cf. § III.3.2). La Figure IV.4 présente les types de dysfonctionnements ainsi que leurs caractéristiques temporelles au sein de la connaissance interprétative.

CONNAISSANCE		INTERPRETATIVE	
<b>F O N C T I O N</b>			
<b>OBJECTIF PARTICULIER :</b>	DUREE		
<b>CONDITIONS :</b>	VITESSE	D'APPARITION	
<b>T E L E O L O G I E</b>			
<b>OBJECTIF GENERAL :</b>	DETECTION		
<b>CONDITIONS :</b>	TYPE DE	DYSFONCTIONNEMENT	

Figure IV.4 : Connaissance Interprétative dans l'Évaluation.

L'objectif général de l'étape d'évaluation est la détection des dysfonctionnements. Ainsi, la détection définit les entités ou objectif général de la téléologie. Le type de dysfonctionnement, c'est-à-dire *l'erreur, le défaut ou la défaillance* (cf. § I.2.2) représente les entités ou conditions de la téléologie. La fonction est définie par le comportement temporel du défaut. Les entités, ou objectif particulier, sont décrites par la durée du défaut : intermittent ou non intermittent. Les conditions ou relations de la fonction sont représentées par la vitesse d'apparition du défaut : soudain ou progressif. La fonction est une interprétation subjective qui dépend du point de vue de l'observateur. Par exemple les définitions de la Figure IV.4 peuvent être inversées. Un objectif particulier est défini par la vitesse d'apparition (soudain ou progressif) et des conditions décrites par la durée du défaut (intermittent ou non intermittent).

La Figure IV.5 représente le modèle ontologique des résidus défini à partir de leurs caractéristiques les plus représentatives pour la détection de défauts. Il s'agit en fait, d'une synthèse des résultats présentés aux Figures IV.1, IV.2 et IV.4. Les connaissances fondamentale et interprétative sont décrites en utilisant des entités et des relations. L'oscillation, le transitoire, le niveau et leur séquence d'apparition décrivent la structure, tandis que le comportement est décrit par la moyenne, l'écart type et les tests (binaires, séquentiels, logique à seuil). La fonction et la téléologie sont des interprétations subjectives de la structure et du comportement. Ainsi, la fonction est définie par les caractéristiques temporelles du défaut, tandis que la téléologie est décrite par la détection et les types de dysfonctionnements tels que le défaut ou la défaillance (cf. § I.2.2).

# ONTOLOGIE DES RESIDUS

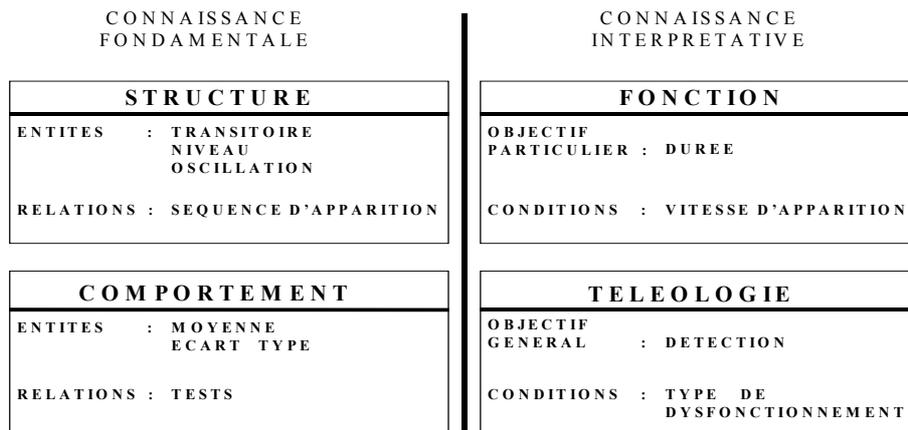


Figure IV.5 : L'Ontologie des Résidus.

Après avoir été évalués, les résidus deviennent des symptômes. Un vecteur des symptômes est une signature. L'étape de décision a pour objectif d'analyser les signatures afin de différencier les défauts. Le paragraphe suivant est consacré à l'étude de l'étape de décision dans le cadre du modèle ontologique.

## IV.3 La décision et l'ontologie.

### IV.3.1 Introduction.

Le diagnostic consiste à trouver les relations de cause à effet entre les défauts et les symptômes. D'après Isermann [Ise97a] et Zwingelstein [Zwi95] deux grandes classes de méthodes existent pour trouver les relations de cause à effet: les méthodes basées sur la classification et les méthodes basées sur le raisonnement. Dans les méthodes basées sur la classification, le lien entre les symptômes et les défauts est implicite car il n'y a pas de connaissances a priori disponibles pour exprimer le lien. Ainsi, les méthodes de classification reposent sur l'apprentissage et l'expérimentation. Tel est le cas des méthodes de classification statistique, de classification floue et de classification par réseaux de neurones. En revanche, les méthodes basées sur le raisonnement disposent d'une connaissance partielle des relations de cause à effet. Cette connaissance est issue d'un modèle mathématique qui décrit le comportement du système. Dans ce contexte, la connaissance peut être représentée par des relations causales.

Les relations causales peuvent être décrites par les tables de décision, les dictionnaires de défauts, les structures (frames) ou les réseaux de causalité. Dans ce mémoire, nous nous sommes seulement intéressés aux réseaux de causalité et plus particulièrement à l'arbre de défauts. Le réseau de causalité est composé de noeuds et de liens. Les noeuds représentent des variables ou des états et les liens décrivent les relations entre les noeuds. Le parcours du réseau constitue une stratégie de raisonnement [Dom88]. Selon le sens du parcours trois stratégies de raisonnement sont distingués (cf. § I.2.3) : le raisonnement en avant, le raisonnement en arrière et le raisonnement mixte. Isermann [Ise97a] distingue également deux types de raisonnement :

- le raisonnement certain qui utilise des informations exactes;

- le raisonnement approximatif qui utilise des informations incertaines et repose sur la théorie de Bayes et la logique floue.

L'arbre de défauts est une particularisation du réseau de causalité. L'arbre de défauts permet de structurer la connaissance du modèle du diagnostic c'est-à-dire des résidus et des signatures. Cette connaissance peut être exprimée à l'aide des règles de décision du type:

SI <condition> ALORS <conclusion>

Dans ce contexte, l'arbre de défauts est un réseau de décision qui a pour objectif de trouver le lien ou la relation de cause à effet entre les symptômes et les défauts.

### IV.3.2 L'ontologie du réseau de causalité.

L'étape de décision a pour objectif de différencier les défauts et de signaler la cause du dysfonctionnement. Les signatures contiennent l'information correspondant aux causes des défauts. Au niveau de la mise en œuvre, les termes de décision et de localisation sont des termes synonymes (cf. § I.4). L'approche fonctionnelle du diagnostic repose sur la notion de fonction [ABJ91], [Fre91b]. Le modèle ontologique permet de classifier et d'organiser la connaissance des signatures dans l'étape de décision. La Figure IV.6 illustre le synoptique de l'approche proposée.

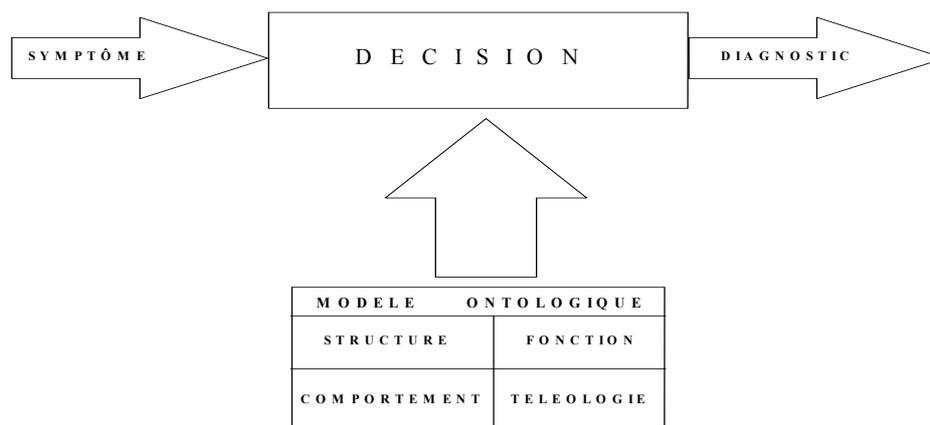


Figure IV.6 : Connaissance Fondamentale dans la Décision.

Il s'agit d'utiliser le modèle ontologique afin de choisir les termes les plus adaptés pour décrire la connaissance fondamentale et interprétative de l'étape de décision. Le point de départ est donné par la connaissance des signatures et leur interprétation, c'est-à-dire par le choix de la fonction dans la localisation de défauts. Dans les paragraphes suivants, nous étudions les connaissances fondamentale et interprétative des signatures afin de définir l'étape de décision. La Figure IV.7 illustre la connaissance fondamentale de l'étape d'évaluation.

**CONNAISSANCE                      FONDAMENTALE**

<b>S T R U C T U R E</b>	
<b>ENTITES</b>	: NOEUDS
<b>RELATIONS</b>	: CONNEXIONS

<b>C O M P O R T E M E N T</b>	
<b>ENTITES</b>	: TYPE DE NOEUD
<b>RELATIONS</b>	: STRATEGIE DE RAISONNEMENT

Figure IV.7 : Connaissance Fondamentale dans la Décision.

Dans le cadre du modèle ontologique, la structure et le comportement sont décrits par des entités et des relations. Les noeuds représentent les entités de la structure tandis que les relations sont décrites par les connexions. Le type de noeud décrit les entités du comportement et la stratégie de raisonnement (avant, arrière, mixte) représente les relations. La connaissance interprétative comporte la fonction et la téléologie. La Figure IV.8 permet d'illustrer la connaissance interprétative au sein du modèle ontologique. L'objectif général de l'étape d'évaluation est la localisation. La localisation a pour objectif de simuler un raisonnement afin de trouver la cause du défaut. Dans ce contexte, la localisation représente l'objectif général de la téléologie tandis que les conditions sont décrites par le type de raisonnement. L'objectif particulier et les conditions de la fonction sont définis par l'interprétation et le type de défaut. Par exemple, les défauts d'un moteur peuvent être interprétés par rapport aux transformations de puissance et, ainsi, les types de défauts sont classifiés en défauts électriques et mécaniques.

**CONNAISSANCE                      INTERPRETATIVE**

<b>F O N C T I O N</b>	
<b>OBJECTIF PARTICULIER</b>	: INTERPRETATION DU DEFAUT
<b>CONDITIONS</b>	: TYPE DE DEFAUT

<b>T E L E O L O G I E</b>	
<b>OBJECTIF GENERAL</b>	: LOCALISATION
<b>CONDITIONS</b>	: TYPE DE RAISONNEMENT

Figure IV.8 : Connaissance Interprétative dans l'Evaluation.

La Figure IV.9 représente le modèle ontologique du réseau de causalité. Il s'agit en fait, d'une synthèse des résultats présentés aux figures IV.6, IV.7, et IV.8.

# ONTOLOGIE DU RESEAU DE CAUSALITE

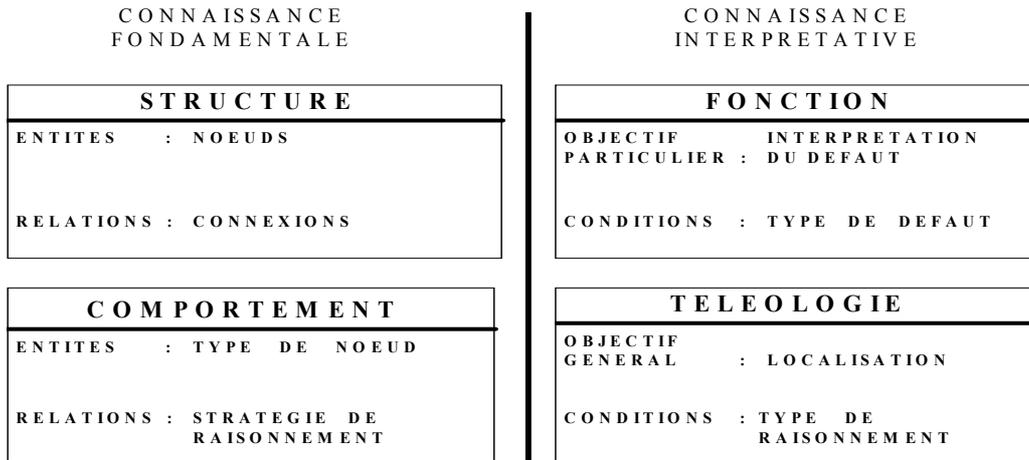


Figure IV.9 : Ontologie du Réseau de Causalité.

Le modèle ontologique du réseau de causalité, permet de classer et d'organiser la connaissance contenue dans les signatures. Les connaissances fondamentale et interprétative sont décrites en utilisant des entités et des relations. Les noeuds et leurs connexions décrivent la structure tandis que le comportement est défini par le type de noeud et la stratégie de raisonnement. La fonction et la téléologie sont des interprétations subjectives de la structure et du comportement. L'interprétation et le type de défaut permet de décrire l'objectif particulier et les conditions de la fonction, tandis que la localisation et le type de raisonnement définissent l'objectif général et les conditions de la téléologie.

## IV.4 Conclusion.

Les tests d'évaluation permettent de définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut. Le test non statistique de logique à seuil consiste simplement en un test sur l'amplitude du signal sans prendre en compte les grandeurs statistiques de celui-ci.

Les résidus décrivent le bon et le mauvais fonctionnement du système. Le modèle ontologique donne un cadre générique pour identifier les caractéristiques les plus représentatives des résidus dans l'étape d'évaluation. Le diagnostic basé sur le modèle est un processus causal. Le réseau de causalité est un outil qui permet de trouver les relations de cause (défaut) à effet (symptôme). L'étape de décision utilise la connaissance contenue dans les symptômes afin de localiser les défauts.

L'étape de décision peut être construite à l'aide d'un réseau de causalité. Le réseau a pour objectif de trouver le lien entre les symptômes et les défauts. Le modèle ontologique est un moyen de classer et d'organiser les connaissances fondamentale et interprétative utilisées dans l'étape de décision.

Le chapitre V présente l'application de l'approche fonctionnelle du diagnostic à la simulation d'un moteur à courant continu en boucle ouverte et en boucle fermée. La notion de fonction dans la localisation de défauts est utilisée dans l'espace de parité, les observateurs, l'estimation paramétrique. Les connaissances des étapes de génération, d'évaluation et de décision sont classifiées et organisées par rapport aux défauts électriques et mécaniques du moteur.

# Chapitre V

## Application à la Simulation d'un Moteur à Courant Continu

### V.1 Introduction.

Le diagnostic de défauts est un moyen de garantir la qualité de la production et la sûreté de fonctionnement. Ce chapitre présente l'application de notre travail de recherche à la simulation d'un moteur à courant continu en boucle ouverte et en boucle fermée. La boucle fermée a pour objectif de diminuer les effets des dysfonctionnements. Cependant, les sorties des régulateurs peuvent être considérée comme des indicateurs de défauts [DI92].

Le chapitre a un double objectif. Le premier objectif est de montrer les avantages de l'approche fonctionnelle du diagnostic dans la détection et la localisation de défauts qui possèdent des signatures identiques. Le deuxième objectif est de montrer que l'approche proposée est une approche générique, applicable aux méthodes de génération de résidus, aux systèmes en boucle ouverte et fermée et à l'intégration de méthodes. La fonction est utilisée notamment dans le but d'obtenir des informations additionnelles des signatures de l'espace de parité.

Le paragraphe V.2 est consacré au diagnostic de défauts sur les capteurs et sur les paramètres du moteur en boucle ouverte. Deux interprétations du modèle du moteur sont étudiées afin de montrer les avantages de notre approche. Le diagnostic des défauts de type capteur, actionneur et paramètre du moteur en boucle fermée est présenté au paragraphe V.3. Les annexes A, B, C présentent les résultats des simulations pour le moteur en boucle ouverte. Les résultats des simulations obtenues en boucle fermée sont présentés en annexes D, E et F.

### V.2 Boucle Ouverte.

#### V.2.1 Introduction.

Les méthodes de génération de résidus que nous utilisons sont l'espace de parité, l'estimation paramétrique et les observateurs, afin de détecter et de localiser les défauts de type capteur et actionneur. Ces étapes utilisent la représentation des modèles en continu. L'étape d'évaluation est construite en utilisant un test de logique à seuil, afin de détecter les changements de valeur moyenne et d'écart type des résidus.

## V.2.2 Description du système simulé.

Le système est un moteur à courant continu en boucle ouverte [HP94]. Le schéma de principe est représenté sur la Figure V.1

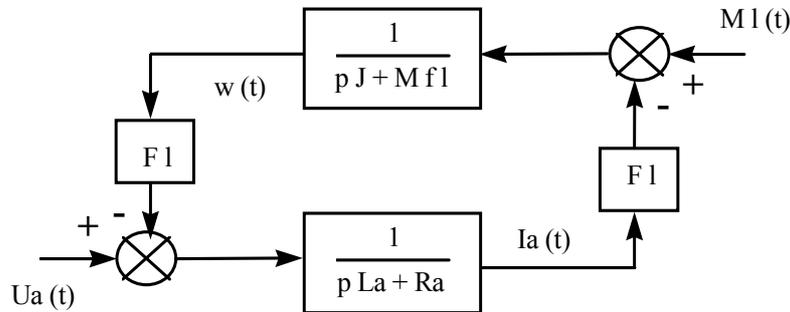


Figure V.1 : Moteur à Courant Continu.

où :

$Ra$	$= 1.64 \Omega$	est la résistance de l'inducteur;
$La$	$= 0.00676 \Omega s$	est l'inductance de l'inducteur;
$F1$	$= 0.345 V s$	est le flux magnétique;
$J$	$= 0.9335 e-3 kg m$	est la constante d'inertie;
$Mfl$	$= 1.72 e-3 N m s$	est le coefficient de frottements visqueux.

Avec les entrées suivantes :

- $Ua(t)$  est la tension de l'inducteur (V);
- $Ml(t)$  est le couple de la charge (N m);

et les sorties observées :

- $Ia(t)$  est le courant de l'inducteur (A);
- $w(t)$  est la vitesse angulaire de l'axe du moteur (rad/s).

Le modèle du système s'écrit sous forme d'état :

$$\begin{bmatrix} \dot{Ia}(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-Ra}{La} & \frac{-F1}{La} \\ \frac{F1}{J} & \frac{-Mfl}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{La} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ua(t) \\ Ml(t) \end{bmatrix}$$

(V.1)

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

(V.2)

Le système est muni de quatre capteurs afin de mesurer la valeur des entrées et des sorties.

$C_{Ua}$  est le capteur de la tension  $Ua(t)$ ;  
 $C_{Ml}$  est le capteur du couple  $Ml(t)$ ;  
 $C_{Ia}$  est le capteur du courant  $Ia(t)$ ;  
 $C_w$  est le capteur de la vitesse  $w(t)$ .

Les caractéristiques nominales du moteur sont :

Puissance 1.2 kW;  
 Vitesse ( $w$ ) 314.16 rad/s (3000 tr/min);  
 Courant ( $Ia$ ) 10 A;  
 Tension ( $Ua$ ) 110 V.

Les constantes de temps électrique ( $\tau_e$ ) et mécanique  $\tau_m$  sont :

$$\tau_e = \frac{La}{Ra} = 4.12 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (V.3)$$

$$\tau_m = \frac{J}{Mfl} = 0.542 \text{ s} \quad (V.4)$$

### V.2.3 Les conditions de simulation.

#### Le système.

Le fonctionnement du moteur a été simulé à l'aide du logiciel SIMULINK version 1.3c . Les mesures de courant et de vitesse sont bruitées par un bruit blanc gaussien  $N(0, \sigma^2 = 1e - 6)$ . Le point de fonctionnement est donné par les valeurs constantes des entrées  $Ua(t)$  et  $Ml(t)$ .

$$Ua(t)=110 \text{ V};$$

$$Ml(t)=1.4575 \text{ N m};$$

$$Ia(t)=5.6796 \text{ A};$$

$$w(t)=291.8418 \text{ rad/s};$$

#### Les défauts.

Les défauts sont modélisés par des échelons qui représentent la variation des valeurs nominales des capteurs et des paramètres. Le système de diagnostic du moteur a pour objectif la détection et la localisation de défauts de capteurs ou de composants présentant les caractéristiques suivantes :

- défauts uniques;
- défauts non intermittents;

### V.2.4 Génération de Résidus.

Dans le cadre du diagnostic, il n'y a pas de solution universelle [Lei93]. Le choix des étapes de génération, d'évaluation et de décision dépend des types de défauts à diagnostiquer. L'espace de parité, l'estimation paramétrique et les observateurs permettent de générer des résidus qui possèdent des caractéristiques particulières. Chacune de ces méthodes fournit des informations complémentaires pour la détection et la localisation de défauts [Ise94]. Dans les paragraphes suivants, la génération de résidus en continu utilisant l'espace de parité, l'estimation paramétrique et les observateurs est présentée.

### Le Filtre de Variables d'Etat (FVE).

La représentation en continu des équations qui décrivent le comportement du moteur nécessite les dérivées des signaux d'entrée et de sortie. Le Filtre de Variables d'Etat permet d'obtenir les signaux filtrés et leurs dérivées (cf. § II.2.3). La Figure V.2 montre le schéma de base du FVE utilisé pour la simulation.

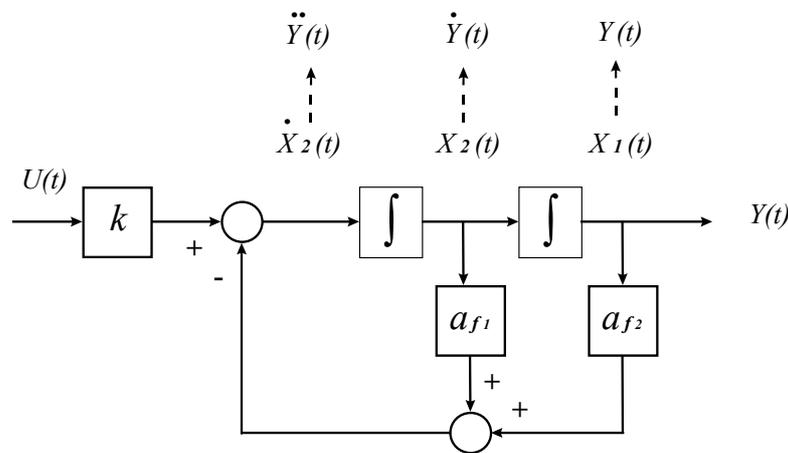


Figure V.2 : Filtre de Variables d'Etat.

Il s'agit d'un filtre Butterworth de deuxième ordre qui est décrit par l'équation suivante [Spr92], [MH72], [ILM92], [ZTF93] :

$$F(p) = \frac{k}{p^2 + a_{f1} p + a_{f2}} \quad (\text{V.5})$$

où :

$f_c$  est la bande passante du filtre en hertz;

$$k = (2\pi f_c)^2;$$

$$a_{f1} = \sqrt{2} (2\pi f_c);$$

$$a_{f2} = (2\pi f_c)^2.$$

ou encore en représentation d'état sous forme canonique commandable :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1(t) \\ \dot{X}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_{f2} & -a_{f1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k \end{bmatrix} U(t)$$

(V.6)

avec :

$$Y(t) = X_1(t);$$

$$\dot{Y}(t) = \dot{X}_1(t) = X_2(t);$$

$$\ddot{Y}(t) = \ddot{X}_1(t) = \dot{X}_2(t)$$

Ainsi, les dérivées du signal de sortie  $Y(t)$  sont obtenues à partir des états du filtre. La bande passante du FVE doit être choisie en fonction soit de la bande passante du système, soit de la constante de temps la plus rapide du système. Ainsi, la bande passante du FVE correspond à la constante de temps électrique du moteur. Cependant, il est parfois avantageux de la choisir inférieure à celle du système. Geiger, cité par Sprösser [Spr92], suggère que ce choix assure un effet lissant sur les signaux, ce qui améliore le résultat de l'estimation paramétrique. Nous avons choisi une bande passante inférieure à celle de la constante électrique. La Figure V.3 illustre le synoptique du schéma utilisé dans l'étape de génération de résidus en continu.

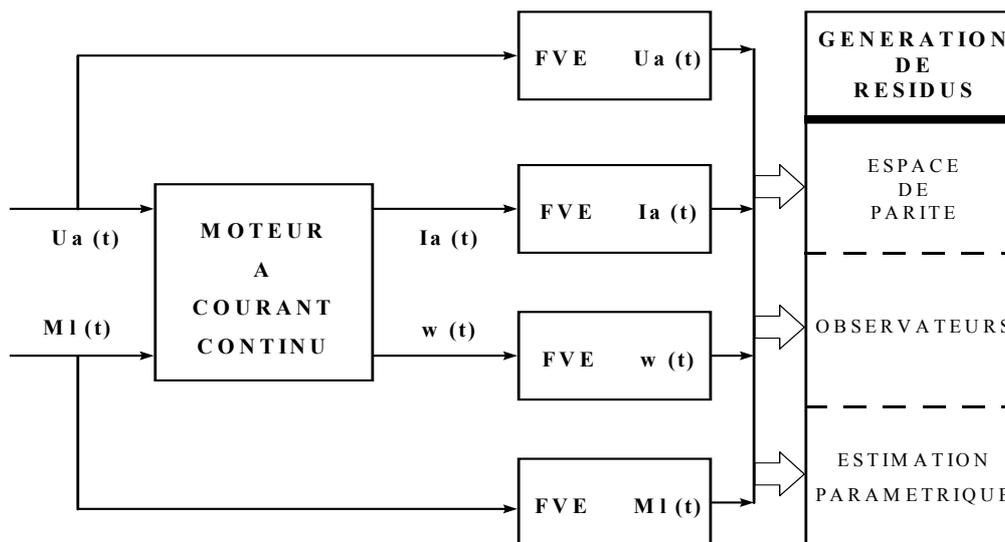


Figure V.3 : Génération de Résidus en Continu.

Chacun des signaux d'entrée et de sortie du système est filtré à l'aide des FVE qui ont la même bande passante. Ensuite, les signaux filtrés et leurs dérivées sont utilisés dans l'étape de génération de résidus.

#### V.2.4.1 L'espace de parité en continu.

La représentation en continu de l'espace de parité est obtenue à partir des équations d'état du moteur. Le rang de la matrice d'observabilité  $[C \ CA]^T$  est égal à deux. Cela veut dire qu'il est possible de générer un espace de parité d'ordre complet (cf. § II.2.4). Ainsi, les résidus de l'espace de parité sont obtenus à partir des équations V.7 et V.9.

$$\begin{bmatrix} Y(t) \\ \dot{Y}(t) \\ \ddot{Y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ CB & 0 & 0 \\ CAB & CB & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ua(t) \\ \dot{Ua}(t) \\ \ddot{Ua}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{V.7})$$

Les signaux filtrés  $Y(t)$  et  $U(t)$  sont obtenus à partir des Filtres de Variables d'Etat. L'équation V.7 devient alors:

$$Y_f(t) = T X(t) + Q U_f(t) \quad (\text{V.8})$$

)

Cette équation est utilisée pour générer les résidus de l'espace de parité, équation V.9.

$$r(t) = W Y_f(t) - W Q U_f(t) - W T X(t) \quad (\text{V.9})$$

Le choix des coefficients de la matrice  $W$  doit remplir un double objectif :

- rendre les résidus indépendants des états  $X(t)$  non mesurables ( $W T=0$ );
- générer des résidus structurés afin de permettre la localisation des défauts sur les capteurs.

Les coefficients de la matrice  $W$  sont :

$$W = \begin{bmatrix} Ra & Fl & La & 0 & 0 & 0 \\ -Fl & Mfl & 0 & J & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & \beta & JLa & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & \beta & 0 & Jla \end{bmatrix} \quad (\text{V.10})$$

où :

$$\alpha = Fl^2 + Ra Mfl$$

$$\beta = La Mfl + J Ra$$

L'équation V.9 devient alors :

$$r_1(t) = La \dot{I}a(t) + Ra Ia(t) + Fl w(t) - Ua(t) \quad (\text{V.11})$$

$$r_2(t) = J \dot{w}(t) + Mfl w(t) - Fl Ia(t) + Ml(t) \quad (\text{V.12})$$

$$r_3(t) = JLa \ddot{I}_a(t) + (La Mfl + JRa) \dot{I}_a(t) + (Fl^2 + Ra Mfl) I_a(t) + J\dot{U}_a(t) - Mfl U_a(t) - Fl Ml(t) \quad (V.13)$$

$$r_4(t) = JLa \ddot{w}(t) + (La Mfl + JRa) \dot{w}(t) + (Fl^2 + Ra Mfl) w(t) - Fl U_a(t) + La \dot{M}l(t) + Ra Ml(t) \quad (V.14)$$

Les équations V.11 à V.14 montrent que chacun des résidus est découplé de la mesure d'au moins un capteur :

- le résidu 1 est indépendant des mesures du capteur de couple ( $Ml(t)$ );
- le résidu 2 est indépendant des mesures du capteur de tension ( $U_a(t)$ );
- le résidu 3 est indépendant des mesures du capteur de vitesse ( $w(t)$ );
- le résidu 4 est indépendant des mesures du capteur de courant ( $I_a(t)$ ).

Le Tableau V.1 représente la matrice de diagnostic obtenue à partir des simulations de défauts sur les capteurs. Les défauts sont modélisés par des échelons qui représentent la variation de la valeur nominale des capteurs. Les capteurs  $C_{Ml}$  et  $C_{Ua}$  sont soumis à des variations de +10 %, tandis que les capteurs  $C_{Ia}$  et  $C_w$  sont soumis à des variations de -10 %. Chacune des signatures de la matrice de diagnostic est différente. Cela permet la détection et la localisation des défauts sur les quatre capteurs du moteur.

0 : pas de changement de la valeur moyenne du résidu  
 : changement positif de la valeur moyenne du résidu  
 : changement négatif de la valeur moyenne du résidu

	DEFAUTS		CAPTEURS	
	d $C_{Ml}$ + 10 %	d $C_{Ua}$ + 10 %	d $C_w$ - 10 %	d $C_{Ia}$ + 10 %
r1	0	0 	0 	0 
r2	0 	0	0 	0 
r3	0 	0 	0	0 
r4	0 	0 	0 	0

Tableau V.1 : Matrice de Diagnostic pour les Défauts de Capteurs.

Les défauts sur les paramètres ont une influence sur le comportement des résidus de l'espace de parité. Dans certains cas, ces défauts peuvent produire des signatures identiques à celles des capteurs. Par exemple, un défaut sur le paramètre  $Mfl$  produit la même signature qu'un défaut sur le capteur du couple  $C_{Ml}$ . Pour montrer cela, nous allons utiliser les résultats présentés au chapitre II (cf. § II.3.2) concernant la sensibilité des résidus.

La variation des résidus des équations V.11 à V.14 par rapport aux défauts sur le paramètre  $Mfl$  et sur le capteur  $C_{Ml}$  est:

Défaut  $Mfl$

Défaut  $C_{Ml}$

$$\Delta r_1 moy(t) = 0$$

$$\Delta r_2 moy(t) = -\Delta Mfl w(t)$$

$$\Delta r_3 moy(t) = -\Delta Mfl Ra Ia(t) + \Delta Mfl Ua(t)$$

$$\Delta r_3 moy(t) = -Fl \Delta Mfl w(t)$$

$$\Delta r_4 moy(t) = -\Delta Mfl Ra w(t)$$

$$\Delta r_1 moy(t) = 0$$

$$\Delta r_2 moy(t) = \Delta MI(t)$$

$$\Delta r_4 moy(t) = Ra \Delta MI(t)$$

Une variation de +10 % de la valeur nominale du paramètre  $Mfl$  produit presque les mêmes effets qu'une variation de -3 % de la valeur nominale du capteur  $C_{MI}$ . Lors de l'apparition du défaut sur le paramètre  $Mfl$ , les valeurs du courant et de la vitesse sont :  $Ia(t)=5.8214$  A,  $w(t)=291.1677$  rad/s. La valeur des résidus pour les deux défauts considérés est :

Défaut  $Mfl$

$$\Delta r_1 moy(t) = 0$$

$$\Delta r_2 moy(t) = -0.05088$$

$$\Delta r_3 moy(t) = 0.01727$$

$$\Delta r_4 moy(t) = -0.0821$$

Défaut  $C_{MI}$

$$\Delta r_1 moy(t) = 0$$

$$\Delta r_2 moy(t) = -0.0437$$

$$\Delta r_3 moy(t) = 0.01507$$

$$\Delta r_4 moy(t) = -0.0716$$

La variation des résidus est similaire en ce qui concerne les signes et les quantités numériques. Dans ce contexte, nous pouvons considérer que les signatures des deux défauts sont identiques. La Figure V.4 montre le comportement des résidus pour les défauts sur le paramètre  $Mfl$  et sur le capteur  $C_{MI}$ . En effet, les résidus réagissent de façon similaire, ce que confirme les valeurs obtenues précédemment. Le résidu  $r_1(t)$  n'est pas affecté par les défauts, en revanche les résidus  $r_2(t)$ ,  $r_4(t)$  subissent un changement négatif de leur valeur moyenne ainsi que le résidu  $r_3(t)$  un changement positif de sa valeur moyenne. Dans la suite de ce mémoire, un résidu qui est découplé des effets d'un défaut sera représenté par "0", tandis que le résidu qui est affecté par un changement positif ou négatif de sa valeur moyenne sera représenté respectivement par "M" et "-M". Ainsi, la signature des défauts sur le paramètre  $Mfl$  et sur le capteur  $C_{MI}$  est égale à [0 -M M -M].

Les résidus de l'espace de parité ont été construits afin de permettre la localisation des défauts sur les quatre capteurs du moteur. Cependant, lors de l'apparition du défaut sur le paramètre  $Mfl$ , ces résidus ne permettent que la localisation de trois défauts. Une situation similaire se produit avec les défauts sur le capteur  $C_{Ua}$  et le paramètre  $Ra$ , car ces défauts ont aussi des signatures identiques.



du défaut [CGTT93], [ABJ91]. La fonction a pour objectif de faire ressortir les caractéristiques essentielles d'un objet. Dans la suite, se présentent deux interprétations possibles des équations du moteur à courant continu.

$$Fl Ia(t) = Ml(t) + J \dot{w}(t) + Mfl w(t) \quad (V.15)$$

$$Ua(t) = Fl w(t) + La \dot{I}a(t) + Ra Ia(t) \quad (V.16)$$

Les équations V.15 et V.16 peuvent être interprétées par rapport aux composants ou aux paramètres. La Figure V. 5 permet de clarifier cette idée.

OBJET	OBSERVATEUR	ABSTRACTION	
		CONCEPT X	CONCEPT Y
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">MOTEUR A COURANT CONTINU</div> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; gap: 20px; margin: 5px 0;"> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="text-align: center;">↑</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">DIAGNOSTIC</div>	INTERPRETATION 1	COMPOSANTS DU MOTEUR	DEFAUTS CAPTEUR ET PARAMETRE
	INTERPRETATION 2	VARIABLES PHYSIQUES DU MOTEUR	DEFAUTS ELECTRIQUE ET MECANIQUE

Figure V.5 : Interprétation des défauts du Moteur.

Dans la première ligne, l'observateur considère que les caractéristiques les plus représentatives du moteur sont les composants. Dans ce contexte, les concepts de capteur et d'actionneur sont les mieux adaptés pour décrire les défauts du moteur. Dans la deuxième ligne, l'observateur est plus particulièrement intéressé par les variables physiques. Ainsi, les variables électriques et mécaniques sont les concepts les plus adaptés pour décrire les dysfonctionnements du moteur. Pour la deuxième interprétation, l'équation V.15 est associée à la variable mécanique "couple", tandis que l'équation V.16 est associée à la variable électrique "tension".

où :

$Fl Ia(t)$  représente le couple électromagnétique du moteur;

$Ml(t)$  représente le couple de la charge;

$J \dot{w}(t)$  représente le couple d'accélération;

$Mfl w(t)$  représente le couple des pertes par frottement.

$Fl w(t)$  est la force électromotrice;

$Ua(t)$  est la tension appliquée à l'inducteur du moteur;

$La \dot{I}a(t)$  est la tension dans l'inductance de l'inducteur;

$Ra I_a(t)$  est la tension dans la résistance de l'inducteur.

Dans ce contexte, les défauts du moteur peuvent être classés selon :

- les défauts électriques;
- les défauts mécaniques.

Cette interprétation des défauts est utilisée afin de définir la fonction des équations de parité par rapport aux variables du moteur. La Figure V.6 représente la fonction au sein du modèle ontologique des équations de parité (cf. § III.5.3). Ce modèle donne un cadre générique pour classifier et organiser la connaissance contenue dans les signatures du Tableau V.2

<b>FONCTION DES EQUATIONS DE PARITE</b>	
<b>OBJECTIF PARTICULIER :</b>	<b>DETECTION ET LOCALISATION PAR RAPPORT AUX VARIABLES DU MOTEUR</b>
<b>CONDITIONS :</b>	<p><b>1) TYPE DE DEFAUTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* DEFAUTS ELECTRIQUES               <ul style="list-style-type: none"> <li>- INDUCTEUR DU MOTEUR</li> <li>- FLUX ELECTROMAGNETIQUE</li> </ul> </li> <li>* DEFAUTS MECANIQUES               <ul style="list-style-type: none"> <li>- VITESSE</li> <li>- COUPLE</li> </ul> </li> </ul> <p><b>2) TYPE D'ENTREE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* ENTREE CONSTANTE (SBPA=0)</li> </ul>

Figure V.6 : Modèle Ontologique de la Fonction des Equations de Parité (SBPA=0).

Un moteur a pour objectif particulier, ou fonction, la transformation d'une variable électrique ( $U_a(t)$ ) en une variable mécanique ( $w(t)$ ). Dans ce contexte, les défauts du moteur peuvent être classés en défauts électriques et mécaniques. Les défauts électriques sont liés au flux et à l'inducteur du moteur, tandis que les défauts mécaniques sont liés à la vitesse et au couple. Le Tableau V.3 représente la matrice de diagnostic pour les défauts électriques et mécaniques du moteur.

Cinq défauts électriques peuvent apparaître dans le moteur : un défaut sur le flux et quatre défauts liés à l'inducteur du moteur.

- $d E_1 = d Fl$  défaut lié au flux électromagnétique du moteur;
- $d E_2 = d La$  défaut lié à l'inductance de l'inducteur;
- $d E_3 = d C I_a$  défaut lié au courant de l'inducteur;
- $d E_4 = d Ra$  défaut lié à la résistance de l'inducteur;
- $d E_5 = d C U_a$  défaut lié à la tension de l'inducteur.

Quatre défauts mécaniques peuvent apparaître dans le moteur : un sur la vitesse et trois sur le couple.

- $d M_1 = d C w$  défaut lié à la vitesse du moteur;
- $d M_2 = d J$  défaut lié au couple d'accélération;
- $d M_3 = d M fl$  défaut lié au couple des pertes par friction;

$d M_4 = d C_{M1}$  défaut lié au couple de la charge.

**0** : pas de changement dans la valeur du résidu

**M** : changement dans la valeur moyenne du résidu

	DEFAUTS ELECTRIQUES					DEFAUTS MECANIQUES			
	FLUX	DEFAUTS ARMATURE				VITESSE	DEFAUTS COUPLE		
	$d E_1$	$d E_2$	$d E_3$	$d E_4$	$d E_5$	$d M_1$	$d M_2$	$d M_3$	$d M_4$
<b>r1</b>	M	0	M	M	M	M	0	0	0
<b>r2</b>	M	0	M	0	0	M	0	M	M
<b>r3</b>	M	0	M	M	M	0	0	M	M
<b>r4</b>	M	0	0	M	M	M	0	M	M
	$d F_l$ + 10 %	$d L_a$ - 10 %	$d C_{1a}$ - 10 %	$d R_a$ + 10 %	$d C_{Ua}$ + 10 %	$d C_w$ - 10 %	$d J$ - 10 %	$d M_{fl}$ + 10 %	$d C_{M1}$ + 10 %

Tableau V.3 : Matrice de Diagnostic pour les Défaits Electriques et Mécaniques.

Cette classification permet d'interpréter autrement la localisation de défauts avec les résidus de l'espace de parité, même si certains défauts ont des signatures identiques. Trois remarques s'imposent:

- les défauts électriques  $d E_4$  et  $d E_5$  ont des signatures identiques, cependant ils se situent au niveau de l'inducteur du moteur;
- les défauts mécaniques  $d M_3$  et  $d M_4$  ont des signatures identiques, cependant ces défauts sont liés au couple du moteur;
- les défauts  $d E_2$  et  $d M_2$  ne peuvent pas être détectés.

Cette classification des défauts permet la détection de sept défauts et la localisation de cinq défauts: trois électriques ( $d E_1$ ,  $d E_3$ ,  $d E_4$ - $d E_5$ ) et deux mécaniques ( $d M_1$ ,  $d M_3$ - $d M_4$ ). L'interprétation des signatures par rapport aux variables électriques et mécaniques du moteur permet de percevoir autrement le problème de diagnostic, dans le but d'obtenir des informations additionnelles pour localiser les défauts. Dans ce contexte, le nombre de défauts localisés dépend du choix de la fonction, ou objectif particulier, des équations de parité.

### Localisation de défauts avec un signal d'excitation.

D'après Isermann [Ise94], l'espace de parité ne permet pas la localisation de tous les défauts paramétriques si les signaux d'entrée sont constants. Nous avons montré au chapitre II (cf. § II.3.3) que les défauts liés aux dérivées des signaux ne sont pas facilement détectables. Selon les équations des résidus de l'espace de parité (cf. § équations V.11 à V.14), les paramètres  $L_a$  et  $J$  sont liés aux dérivées des signaux mesurés. Pour détecter les défauts sur ces paramètres, nous avons excité l'entrée  $U_a(t)$  du moteur. Le signal d'excitation est une séquence binaire pseudo-aléatoire (SBPA) d'amplitude égale à  $\pm 1$  V. La SBPA a été engendrée par un registre à décalage de 7 bits. La SBPA permet de détecter les défauts sur les paramètres  $L_a$  et  $J$ .

L'écart type d'un signal quelconque est une mesure de la dispersion de celui-ci par rapport à la valeur moyenne [BH92]. Les défauts sur les paramètres  $L_a$  et  $J$  produisent un changement de l'écart

type des résidus. Les équations V.17 à V.20 décrivent la sensibilité des résidus par rapport à un défaut sur le paramètre  $J$ .

$$\Delta r_1 moy(t) = 0 \quad (V.17)$$

$$\Delta r_2 moy(t) = -\Delta J \dot{w}(t) \quad (V.18)$$

$$\Delta r_3 moy(t) = -\Delta J La \ddot{ia}(t) - \Delta J Ra \dot{ia}(t) + \Delta J \dot{Ua}(t) \quad (V.19)$$

$$\Delta r_4 moy(t) = -\Delta J La \ddot{w}(t) - \Delta J Ra \dot{w}(t) \quad (V.20)$$

Le paramètre  $J$  est lié aux dérivées des signaux  $Ua(t)$ ,  $Ia(t)$  et  $w(t)$ . La dérivée d'un signal quelconque élimine la composante continue de celui-ci. Les dérivées des signaux  $Ua(t)$ ,  $Ia(t)$  et  $w(t)$  auront une valeur moyenne égale à zéro. Cela veut dire que les résidus  $r_2(t)$ ,  $r_3(t)$ , et  $r_4(t)$  ne sont pas affectés par le changement de leur valeur moyenne. En revanche, ces résidus sont affectés par le changement de leur écart type. Ces changements sont produits par les effets de la SBPA sur les signaux  $Ua(t)$ ,  $Ia(t)$ ,  $w(t)$  et leurs dérivées. La Figure V.7 illustre le comportement des résidus filtrés et non filtrés de l'espace de parité lorsqu'un défaut apparaît sur le paramètre  $J$ .

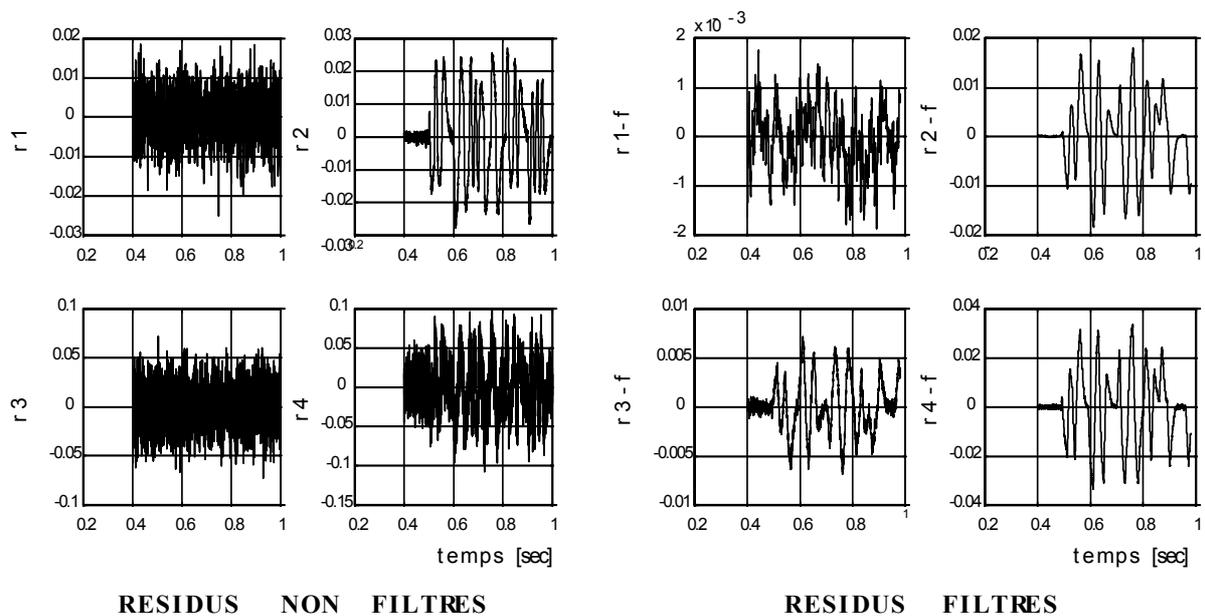


Figure V.7 : Défaut sur le Paramètre  $J$  (-8 %).

Il s'agit d'une diminution de 8 % de la valeur nominale du paramètre  $J$ , le temps d'apparition du défaut est égal à 0.5 secondes. Dans le cas des résidus non filtrés, seuls les résidus  $r_2(t)$  et  $r_4(t)$  montrent un changement d'écart type. En revanche, les résidus filtrés nous permettent de vérifier que le résidu  $r_1(t)$  est insensible aux effets du défaut et également de regarder les changements d'écart type des résidus  $r_2(t)$ ,  $r_3(t)$ , et  $r_4(t)$ . Ainsi, si le changement d'écart type est représenté par "E", la signature du défaut sur le paramètre  $J$  est [0 E E E]. Dans la suite de ce mémoire, un résidu qui est affecté par le changement de son écart type sera représenté par "E".

L'ensemble des graphiques obtenues au cours de la simulation des équation de parité avec la SBPA est présenté à l'annexe A. Le Tableau V.4 synthétise les résultats obtenus et illustre le comportement des résidus et la classification des signatures par rapport aux défauts électriques et mécaniques. Lorsque le moteur est excité par la SBPA, les résidus de l'espace de parité permettent la détection de tous les défauts (9) et la localisation de huit défauts: cinq électriques (d E 1, d E 2, d E 3, d E 4 d E 5) et trois mécaniques (d M 1, d M 2, d M 3-d M 4). La SBPA permet d'obtenir des signatures plus riches en information pour la détection et la localisation de défauts. Ainsi, les défauts d E 2 et d M 2, peuvent être détectés et localisés. Le problème des signatures identiques entre les défauts d E 4 et d E 5 n'existe plus. Les défauts d M 3 et d M 4 ont toujours la même signature, cependant ils sont localisés en tant que défauts mécaniques liés au couple du moteur.

**0** : pas de changement de valeur du résidu  
**M** : changement de la valeur moyenne du résidu  
**E** : changement de l'écart type du résidu

	DEFAUTS ELECTRIQUES					DEFAUTS MECANIQUES			
	FLUX	DEFAUTS ARMATURE				VITESSE	DEFAUTS COUPLE		
	d E 1	d E 2	d E 3	d E 4	d E 5	d M 1	d M 2	d M 3	d M 4
<b>r1</b>	M	E	M	M	M	M	0	0	0
<b>r2</b>	M	0	M	0	0	M	E	M	M
<b>r3</b>	M	E	M	E	M	0	E	M	M
<b>r4</b>	M	E	0	M	M	M	E	M	M
	d Fl + 10 %	d La - 10 %	d C Ia - 10 %	d Ra + 10 %	d C Ua + 10 %	d C w - 10 %	d J - 10 %	d Mfl + 10 %	d C Ml + 10 %

SIGNATURES IDENTIQUES

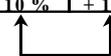


Tableau V.4 : Matrice de Diagnostic pour les Défauts Electriques et Mécaniques (SBPA ≠ 0).

Seul les résultats du Tableau V.4 seront utilisés dans les étapes d'évaluation de résidus (cf. § V.2.5) et de décision (cf. § V.2.6) concernant l'espace de parité.

### V.2.4.2 L'estimation paramétrique en continu.

La classification des dysfonctionnements du système en défauts électriques et mécaniques a permis de percevoir différemment la localisation de défauts. Même si le défaut d C Ml - Mfl a été localisé en tant que défaut couple, le système de diagnostic doit être capable de signaler plus précisément la cause du défaut. A cet effet nous allons utiliser l'estimation paramétrique. Les paramètres du vecteur  $\theta$  dépendent des coefficients physiques du moteur.

$$\theta = f(Ra, La, J, Mfl, Fl) \quad (V.21)$$

L'équation V.1 est une représentation du système qui facilite l'obtention des coefficients physiques du moteur.

$$(Ra, La, J, Mfl, Fl) = f^{-1}(\theta) \quad (V.22)$$

La paramétrisation de la partie électrique du moteur est décrite par l'équation V.23.

$$Y_e(t) = \varphi_e^T(t) \theta_e \quad (\text{V.23})$$

où :

$Y_e(t)$  est le vecteur de sortie de la partie électrique du moteur;

$$\varphi_e^T(t) = [-Ia(t) \quad -w(t) \quad Ua(t)]$$

$$\theta_e = \left[ \frac{Ra}{La} \quad \frac{Fl}{La} \quad \frac{1}{La} \right]^T$$

La paramétrisation de la partie mécanique du moteur est décrite par l'équation V.24.

$$Y_m(t) = \varphi_m^T(t) \theta_m \quad (\text{V.24})$$

où :

$Y_m(t)$  est la sortie de la partie mécanique du moteur;

$$\varphi_m^T(t) = [Ia(t) \quad -w(t) \quad Ml(t)];$$

$$\theta_m = \left[ \frac{Fl}{J} \quad \frac{Mfl}{J} \quad \frac{1}{J} \right]^T$$

Les paramètres des sous systèmes électriques et mécaniques sont obtenus à l'aide de l'algorithme de Moindres Carrés Récursifs avec un facteur d'oubli  $\lambda = 0.99$ , afin d'obtenir un effet lissant sur les paramètres estimés.

$$\hat{\theta}_j(t) = \hat{\theta}_j(t-1) + K_j(t) [Y_j(t) - \varphi_j^T(t) \hat{\theta}_j(t-1)] \quad (\text{V.25})$$

$$K_j(t) = P_j(t-1) \varphi_j(t) \left[ \lambda + \varphi_j^T(t) P_e(t-1) \varphi_j(t) \right]^{-1} \quad (\text{V.26})$$

$$P_j(t) = \frac{1}{\lambda} \left[ P_j(t-1) - K_j(t) \varphi_j^T(t) P_j(t-1) \right] \quad (\text{V.27})$$

où :

$j=[e, m]$  représente les parties électriques et mécaniques du moteur;

Les coefficients physiques du moteur sont obtenus à partir des paramètres estimés.

$$\hat{R}a = \frac{\hat{\theta}_{e1}}{\hat{\theta}_{e3}}$$

(V.28)

$$\hat{F}l = \frac{\hat{\theta}_{e2}}{\hat{\theta}_{e3}}$$

(V.29)

$$\hat{L}a = \frac{1}{\hat{\theta}_{e3}}$$

(V.30)

$$\hat{F}l = \frac{\hat{\theta}_{m1}}{\hat{\theta}_{m3}}$$

(V.31)

$$\hat{M}fl = \frac{\hat{\theta}_{m2}}{\hat{\theta}_{m3}}$$

(V.32)

$$\hat{J} = \frac{1}{\hat{\theta}_{m3}}$$

(V.33)

La Figure V.8 illustre le comportement des coefficients physiques électriques pour un défaut sur la résistance  $Ra$ .

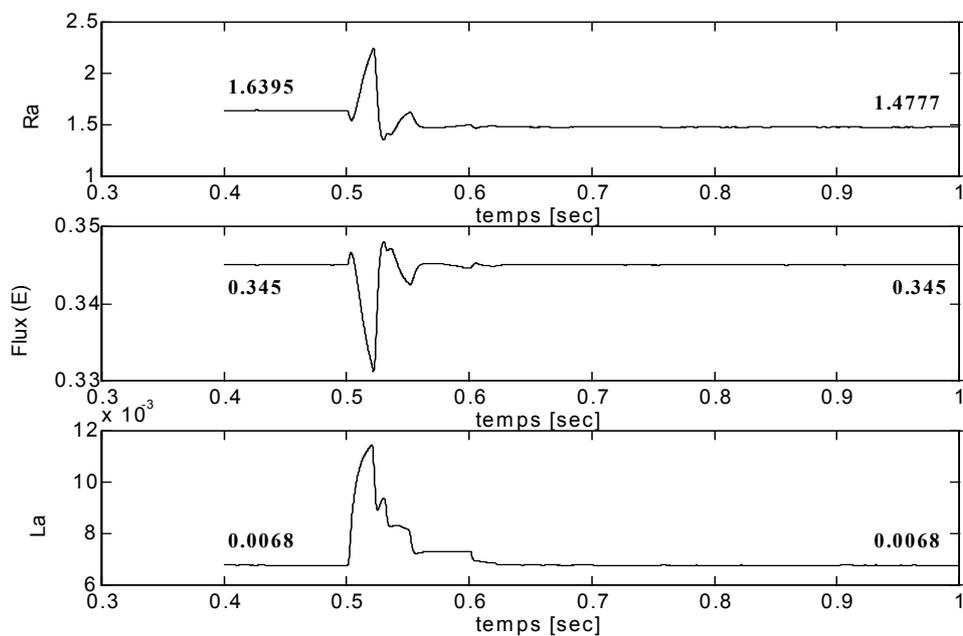


Figure V.8 : Défaut Electrique  $Ra = - 10 \%$ .

Il s'agit d'une diminution (-10 %) de la valeur nominale de la résistance. Le défaut apparaît à  $t=0.5$  s. Après le transitoire et la convergence des paramètres, le flux ( $Fl$ ) et l'inductance ( $La$ ) ont la

même valeur avant et après défaut. En revanche, la valeur de la résistance change de 1.6395 à 1.4777, ce qui représente une diminution de -9.868 %.

Le Tableau V.5 représente les signatures de la matrice de diagnostic obtenue par simulation à partir de l'estimation paramétrique. L'ensemble des résultats est présenté dans l'annexe B. Les signatures des parties électrique et mécanique sont obtenues en utilisant les équations V.25 à V.27. Les résidus  $r_{1e}$ ,  $r_{2e}$ ,  $r_{3e}$  représentent l'erreur entre les coefficients physiques estimés et les coefficients réels de la partie électrique.

$$r_{1e}(t) = \hat{R}a - Ra \quad (\text{V.34})$$

$$r_{2e}(t) = \hat{F}l - Fl \quad (\text{V.35})$$

$$r_{3e}(t) = \hat{L}a - La \quad (\text{V.36})$$

Pour la partie mécanique, les résidus sont définis de la façon suivante :

$$r_{1m}(t) = \hat{F}l - Fl \quad (\text{V.37})$$

$$r_{2m}(t) = \hat{M}fl - Mfl \quad (\text{V.38})$$

$$r_{3m}(t) = \hat{J} - J \quad (\text{V.39})$$

P A R T I E E L E C T R I Q U E									
	D E F A U T S E L E C T R I Q U E S					D E F A U T S M E C A N I Q U E S			
	d E 1	d E 2	d E 3	d E 4	d E 5	d M 1	d M 2	d M 3	d M 4
r 1 e	0	0	M	M	M	0	0	0	0
r 2 e	M	0	0	0	M	M	0	0	0
r 3 e	0	M	M	0	M	0	0	0	0
	d F l	d L a	d C 1 a	d R a	d C U a	d C w	d J	d M fl	d C M l
P A R T I E M E C A N I Q U E									
	D E F A U T S E L E C T R I Q U E S					D E F A U T S M E C A N I Q U E S			
	d E 1	d E 2	d E 3	d E 4	d E 5	d M 1	d M 2	d M 3	d M 4
r 1 m	M	0	M	0	0	0	0	0	M
r 2 m	0	0	0	0	0	M	0	M	M
r 3 m	0	0	0	0	0	M	M	0	M

Tableau V.5 : Matrice de Diagnostic pour l'Estimation Paramétrique.

Toutes les signatures de la matrice de diagnostic sont différentes, cela permet la détection et la localisation des neuf défauts: cinq électriques et quatre mécaniques. Les signatures des défauts liés aux coefficients physiques sont affectées seulement par la variation de la valeur nominale de ces coefficients. Cependant, les signatures des défauts liés aux capteurs sont affectées par la variation de plusieurs coefficients physiques. Par exemple, le défaut électrique d E 4 (d R a) affecte seulement le résidu  $r_{e1}$  de la partie électrique. Ce résidu correspond à une variation de la valeur de la résistance Ra. En revanche, le défaut électrique d E 3 (d C 1 a) produit un changement de la valeur de deux résidus ( $r_{e1}$ ,  $r_{e3}$ ) de la partie électrique et d'un résidu ( $r_{m1}$ ) de la partie mécanique.

### V.2.4.3 Les observateurs.

Les observateurs sont une méthode de diagnostic bien adaptée pour la détection et la localisation de défauts sur les capteurs [Ise94]. De même que l'espace de parité, les observateurs ne permettent pas la détection de tous les défauts paramétriques si les signaux d'entrée sont constants. Pour la génération de résidus, nous avons utilisé un seul observateur de Luenberger d'ordre complet (cf. § II.2.5). L'entrée  $Ua(t)$  est excitée par une SBPA afin de permettre la détection de tous les défauts sur les paramètres. La Figure V.9 illustre le schéma de principe pour la génération de résidus à partir de l'observateur.

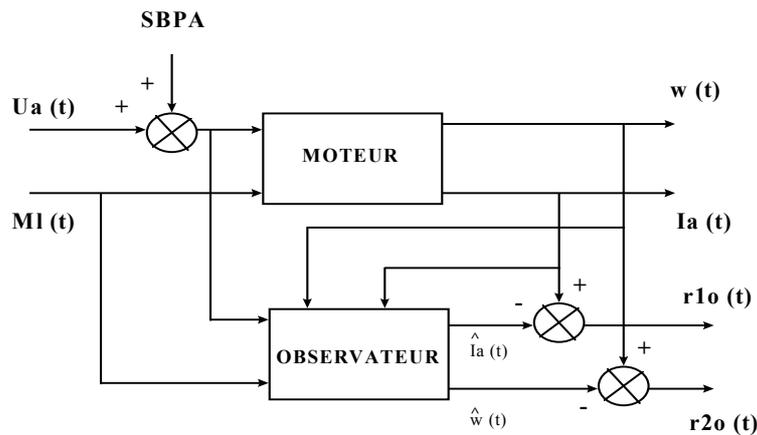


Figure V.9 : Génération de Résidus à partir de l'Observateur.

Les résidus  $r_{1o}(t)$  et  $r_{2o}(t)$  sont obtenus par la comparaison des valeurs mesurées et des valeurs estimées des variables  $Ia(t)$  et  $w(t)$ .

$$r_{1o}(t) = Ia(t) - \hat{I}a(t) \quad (V.40)$$

$$r_{2o}(t) = w(t) - \hat{w}(t) \quad (V.41)$$

L'ensemble des graphiques obtenues par simulation de l'observateur avec une SBPA est donné dans l'annexe C. Le Tableau V.6 synthétise les résultats et illustre la classification des signatures par rapport aux défauts électriques et mécaniques.

**0** : pas de changement de la valeur du résidu  
**M** : changement de la valeur moyenne du résidu  
**E** : changement de l'écart type du résidu

	DEFAUTS ELECTRIQUES					DEFAUTS MECANIKES			
	d E 1	d E 2	d E 3	d E 4	d E 5	d M 1	d M 2	d M 3	d M 4
<b>r1o</b>	-M	E	-M	-M	-M	-M	E	-M	M
<b>r2o</b>	M	E	M	M	M	M	E	-M	M
	d F1 + 10 %	d La - 10 %	d C 1a - 10 %	d Ra + 10 %	d C Ua + 10 %	d C w - 10 %	d J - 10 %	d M fl + 10 %	d C M1 + 10 %

DEFAUTS LOCALISES ↑ ↑

Tableau V.6 : Matrice de Diagnostic pour l'Observateur (SBPA ≠ 0).

Les résidus générés à partir de l'observateur permettent la détection de neuf défauts. Par rapport à la valeur moyenne ou à l'écart type, toutes les signatures sont identiques. Seuls les défauts dM3 et dM4 peuvent être localisés au niveau du couple moteur. Le signe est la grandeur qui permet de différencier les défauts dM3 et dM4 des autres. Le produit  $[r_{1o}(t)][r_{2o}(t)]$  est toujours positif pour les défauts dM3 et dM4. En revanche, ce produit est toujours négatif pour les défauts dE1, dE3, dE4, dE5, et dM1.

Nous avons étudié la génération de résidus à partir des modèles continus utilisant l'espace de parité, l'estimation paramétrique et les observateurs. Pour résoudre le problème de la localisation de défauts qui possèdent des signatures identiques, nous avons utilisé la fonction au sein du modèle ontologique pour classifier les défauts en électriques et mécaniques. Le fait d'exciter l'entrée  $Ua(t)$  du moteur permet d'obtenir des signatures plus riches en information pour le diagnostic, car l'excitation de l'entrée  $Ua(t)$  permet la détection des défauts  $La$  et  $J$ . Les résultats des Tableaux V.4, V.5 montrent que l'espace de parité et l'estimation paramétrique permettent la localisation de huit et neuf défauts. L'observateur permet seulement la localisation d'un défaut (Tableau V.6). Dans la suite de ce chapitre, seul l'espace de parité et l'estimation paramétrique seront utilisés pour la détection et la localisation des défauts du moteur.

## V.2.5 Evaluation des résidus.

Le modèle ontologique des résidus, défini et spécifié au chapitre IV (cf. § IV.2) sera utilisé pour classifier et organiser la connaissance de l'étape d'évaluation. L'interprétation des informations issues des résidus de l'espace de parité et de l'estimation paramétrique est utilisée pour identifier les caractéristiques les plus représentatives des défauts. Dans les paragraphes suivants, nous étudions ces caractéristiques.

Les résidus issus de l'espace de parité et de l'estimation paramétrique sont évalués à l'aide d'un test non statistique de logique à seuil. L'application de ce test est possible seulement si le résidu dépasse nettement le seuil. Les effets du bruit sur le résidu sont la principale contrainte dans l'utilisation de ce test. Pour diminuer les effets du bruit, nous avons utilisé un filtre moyenneur sur une fenêtre glissante.

Il est à noter que le filtre moyenneur introduit un retard à la détection, comme montré à la Figure V.10. En effet la réponse transitoire du résidu filtré est plus lente que celle du résidu non filtré. Cela se traduit par un retard à la détection. Le défaut qui possède le temps de détection le plus long pour l'espace de parité est celui du paramètre  $J$  (cf. annexe A). Le temps de détection de ce défaut est égal à 0.008 secondes. Ce temps est cinq fois inférieur à la constante de temps électrique du moteur (cf. § V.2.2). Ainsi, dans le cadre de notre application, le retard à la détection introduit par le filtre moyenneur n'a pas d'effets significatifs sur la détection.

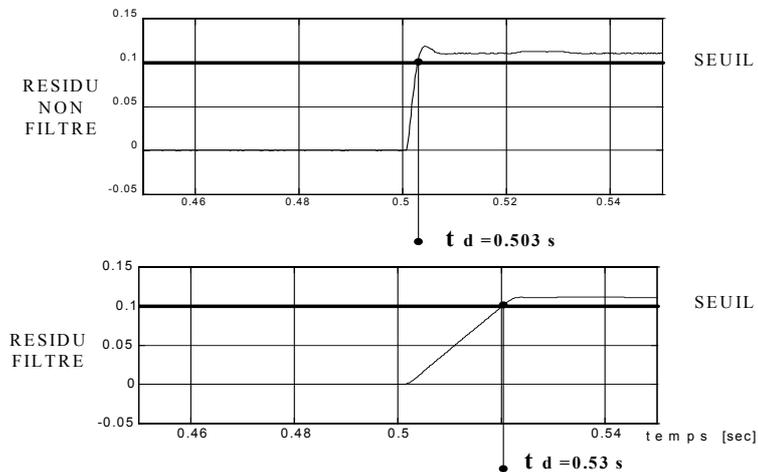


Figure V.10 : Evaluation des Résidus par une Logique à Seuil.

La Figure V.11 montre les résidus filtrés sans défaut obtenus à partir de l'espace de parité. Le choix des seuils, positif (S+) et négatif (S-), dépend des effets du bruit sur les résidus (cf. § II.3.3). Par exemple, le seuil du résidu  $r_{4-f}$  peut être fixé à  $\pm 1.5 \cdot 10^{-3}$

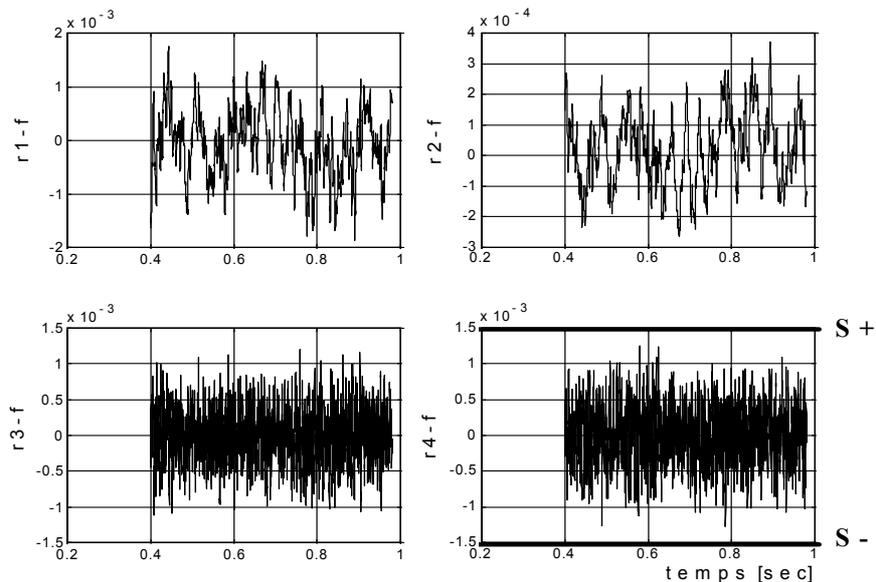


Figure V.11 : Evaluation des Résidus par une Logique à Seuil.

Les résidus évalués deviennent des symptômes. Selon les résultats présentés aux Tableaux V.4 et V.5, les trois grandeurs utilisées pour la quantification des résidus sont :

- 0 : pas de changement de valeur du résidu;

- M : changement de valeur moyenne du résidu;
- E : changement d'écart type du résidu.

D'après Gertler et al. [GCFKMM95], [GC94] deux seuils peuvent être utilisés pour l'évaluation des changements de valeur moyenne et d'écart type des résidus. Si le résidu dépasse seulement un seuil, cela veut dire un changement de valeur moyenne. Si le résidu dépasse les deux seuils, alors il s'agit d'un changement d'écart type du résidu. Le Tableau V.7 présente les seuils choisis pour les quatre résidus filtrés de l'espace de parité et pour les six résidus filtrés de l'estimation paramétrique. Les seuils ont été fixés à partir des résultats des simulations présentées en annexes A et B.

ESTIMATION PARAMETRIQUE	
$r_{ie-f}$	SEUILS ( $t_{rie-f}$ )
$r_{1e-f}$	+ 2 e - 3
	- 2 e - 3
$r_{2e-f}$	+ 5 e - 5
	- 5 e - 5
$r_{3e-f}$	+ 1 e - 5
	- 2 e - 3
$r_{im-f}$	SEUILS ( $t_{rim-f}$ )
$r_{1m-f}$	+ 1 e - 2
	- 2 e - 2
$r_{2m-f}$	+ 2 e - 4
	- 4 e - 4
$r_{3m-f}$	+ 2 e - 5
	- 4 e - 5

ESPACE DE PARITE	
$r_{i-f}$	SEUILS ( $t_{ri-f}$ )
$r_{1-f}$	+ 2 e - 3
	- 2 e - 3
$r_{2-f}$	+ 4 e - 4
	- 4 e - 4
$r_{3-f}$	+ 1.5 e - 3
	- 1.5 e - 3
$r_{4-f}$	+ 1.5 e - 3
	- 1.5 e - 3

Tableau V.7 : Seuils des Résidus Filtrés.

Le comportement temporel des résidus doit être considéré dans l'étape d'évaluation afin d'éviter une mauvaise assignation des valeurs M et E. Nous considérons le temps du transitoire ( $t_t$ ), le temps des oscillations ( $t_o$ ) et le temps d'analyse ( $t_a$ ). La Figure V.12 permet d'illustrer les effets du transitoire et des oscillations dans l'assignation des valeurs M et E.

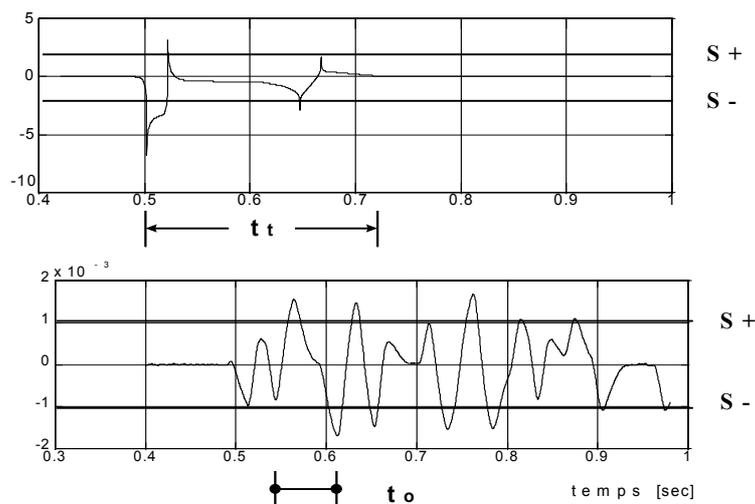


Figure V.12 : Caractérisation du Transitoire et des Oscillations.

Le premier graphique montre le comportement temporel d'un résidu quelconque affecté par un défaut à l'instant  $t=0.5$  seconds. Ce graphique permet d'illustrer l'utilisation de deux seuils pour

détecter les changements d'écart type. Si la valeur du résidu est analysée immédiatement après le dépassement du seuil négatif, la valeur assignée au résidu sera égale à E car pendant le transitoire le résidu dépasse les seuils positif et négatif. Le deuxième graphique montre un changement de l'écart type du résidu. Le temps d'analyse  $t_a$  doit être supérieur ou égal au temps des oscillations  $t_o$ , afin de permettre le dépassement des deux seuils, si non la valeur assignée au résidu sera égale à M.

La Figure V.13 illustre le schéma de base utilisé dans l'étape d'évaluation des résidus. D'abord, les résidus filtrés sont comparés aux seuils, si un seuil est dépassé, le temps  $t_d$  est assigné. Ensuite, le temps  $t$  est comparé à la somme des temps  $t_d$  et  $t_t$ . Si  $t > t_d + t_t$  alors l'analyse des résidus commence. Cette analyse est effectuée tant que  $t < t_d + t_t + t_a$ . Finalement, lorsque cette condition est satisfaite, les valeurs 0, M ou E sont assignées aux résidus et les symptômes sont obtenus.

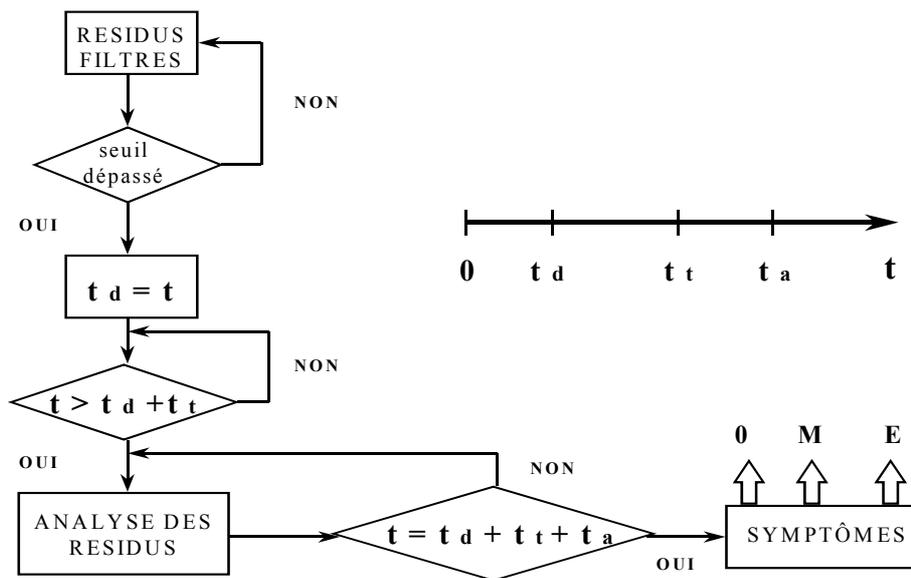


Figure V.13 : Algorithme d'Evaluation des Résidus.

Les symptômes sont utilisés par l'étape de décision afin de trouver la cause du défaut. Dans les paragraphes suivants se présente l'étape de décision construite à partir des symptômes engendrés par les informations issues de l'espace de parité et de l'estimation paramétrique.

## V.2.6 Décision.

L'étape de décision a été construite à l'aide d'un arbre de défauts de deux niveaux. Le premier niveau utilise les signatures ( $s_1, s_2, s_3, s_4$ ) engendrées à partir des résidus filtrés ( $r_{1-f}, r_{2-f}, r_{3-f}, r_{4-f}$ ) de l'espace de parité. La Figure V.14 illustre la structure générale de l'arbre de défauts. L'arbre est composé de neuf portes ET ( $P_{10}$  à  $P_{18}$ ) qui correspondent aux huit défauts localisés et à la condition d'opération normale du moteur. Les règles de décision des portes sont données par les signatures du Tableau V.4. Par exemple, la signature du défaut  $d_{E_1}$  est égale à  $[M M M M]$ . Alors, sa règle de décision est:

SI ( $s_1=M$ ) ET ( $s_2=M$ ) ET ( $s_3=M$ ) ET ( $s_4=M$ ) ALORS  $d_{E_1}$ .

La sortie de chacune des portes est caractérisée par deux grandeurs.

- le temps de la détection;
  - $t_d$ ;
- l'état de la sortie de la porte;
  - 0 opération normale;
  - 1 défaut;

L'état de la sortie des portes sera considéré comme un symptôme dans le deuxième niveau de décision.

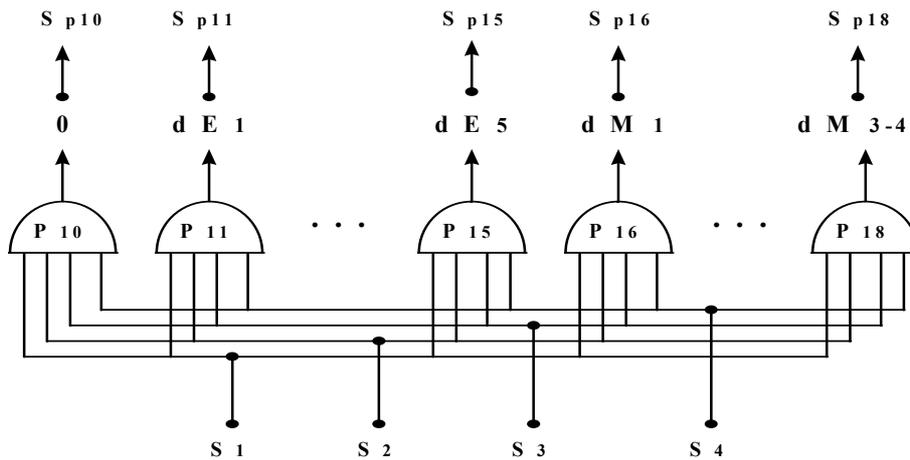


Figure V.14 : Arbre de Défauts pour l'Espace de Parité.

Le deuxième niveau de décision permet de différencier les défauts  $dM_3$  et  $dM_4$ . La Figure V.15 présente le synoptique de ce niveau. L'arbre est composé de dix portes ET ( $P_{20}$  à  $P_{29}$ ) de sept entrées. Les entrées correspondent aux six symptômes ( $s_5$  à  $s_{10}$ ) engendrés par les résidus filtrés de l'estimation paramétrique ( $r_{1e}$ ,  $r_{2e}$ ,  $r_{3e}$ ,  $r_{1m}$ ,  $r_{2m}$ ,  $r_{3m}$ ) et au symptôme généré par le défaut du premier niveau. Les règles de décision des portes du deuxième niveau sont obtenues à partir des signatures du Tableau V.5. Par exemple, le défaut électrique  $dE_1$  engendre le symptôme  $s_{p11}$ , ce symptôme et les symptômes  $s_5$  à  $s_{10}$  correspondent aux sept entrées de la porte  $P_{21}$ . Ainsi, la règle de décision de la porte  $P_{21}$  est :

SI ( $s_{p11}=1$ ) ET ( $s_5=0$ ) ET ( $s_6=M$ ) ET ( $s_7=0$ ) ( $s_8=M$ ) ET ( $s_9=0$ ) ET ( $s_{10}=0$ ) ALORS  $dE_1$

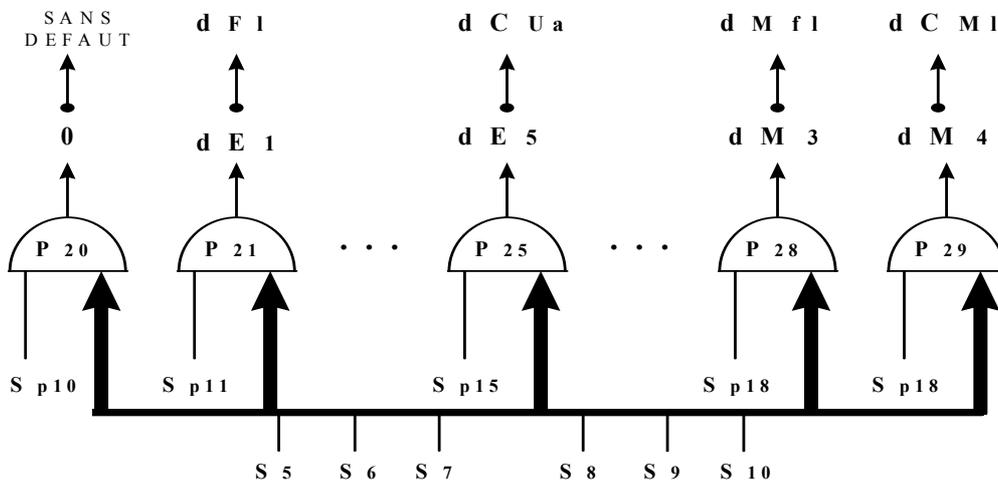


Figure V.15 : Arbre de Défauts pour l'Estimation Paramétrique.

## V.2.7 Conclusion.

L'approche fonctionnelle du diagnostic repose sur la notion de fonction. La fonction a pour objectif d'identifier les caractéristiques les plus représentatives pour décrire les défauts du système. Ainsi, le nombre de défauts localisés dépend de la fonction choisie. Le modèle ontologique donne un cadre générique pour définir la fonction de l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique pour la localisation de défauts. La fonction au sein du modèle ontologique permet d'interpréter autrement les défauts du système. Les informations contenues dans les signatures sont indépendantes de la fonction. Cependant nous avons montré que l'interprétation des défauts par rapport aux variables électriques et mécaniques s'avère plus adaptée que l'interprétation de défauts par rapport aux composants. Dans ce contexte, la fonction permet d'obtenir des informations additionnelles des signatures. Cela nous permet d'utiliser l'espace de parité pour la localisation et plus seulement pour la détection de défauts.

## V.3 Boucle Fermée.

### V.3.1 Introduction.

Les systèmes en boucle fermée et le diagnostic sont conçus avec des objectifs différents. La boucle fermée est utilisée afin de diminuer les effets des variations des paramètres et le mauvais fonctionnement des composants. En revanche, le diagnostic cherche à engendrer des indicateurs de défauts capables de détecter et de localiser les variations des paramètres et les dysfonctionnements des capteurs et des actionneurs. Deibert et al. [DI92] proposent d'utiliser les signaux des régulateurs comme des indicateurs de défauts, car lors de l'apparition d'un défaut, ces signaux changent afin de maintenir le bon fonctionnement du système. Nous avons utilisé cette stratégie dans le cadre de l'approche fonctionnelle du diagnostic.

Ce paragraphe présente la simulation d'un moteur à courant continu en boucle fermée. Les étapes de génération de résidus utilisées sont l'espace de parité et l'estimation paramétrique afin de détecter et de localiser les défauts de type capteur, actionneur et paramètre. L'interprétation des signatures repose sur la notion de fonction. La fonction est choisie afin de différencier les effets entre les défauts additifs et multiplicatifs. L'étape d'évaluation est construite en utilisant un test non statistique de logique à seuil, afin de détecter les changements de valeur moyenne et d'écart type des résidus. Comme dans le paragraphe précédent, l'étape de décision est composée de deux niveaux qui sont organisés par rapport aux défauts électriques et mécaniques du moteur. Ces deux niveaux utilisent les informations fournies par l'espace de parité et par l'estimation paramétrique.

### V.3.2 Description du système simulé.

Le système est un moteur à courant continu en boucle fermée. Le schéma de principe est représenté sur la Figure V.16. Il est composé de deux régulateurs PI, un actionneur et deux boucles de régulation. L'actionneur est un redresseur modélisé par le gain  $U_c$ .

Le système a deux entrées  $w_{ref}(t)$ ,  $Ml(t)$  et deux sorties  $Ia(t)$  et  $w(t)$ .

$w_{ref}(t)$  est la référence en vitesse (V);  
 $Ml(t)$  est le couple de la charge (N m);  
 $Ia(t)$  est le courant de l'inducteur (A);  
 $w(t)$  est la vitesse angulaire de l'axe du moteur (rad/s).

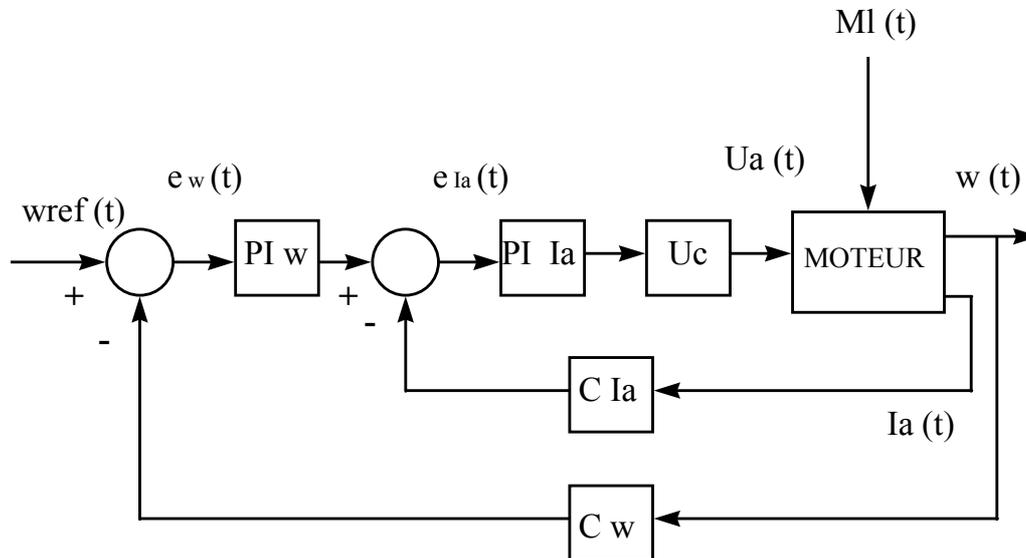


Figure V.16 : Moteur à Courant Continu en Boucle Fermée.

Les régulateurs en courant et en vitesse sont des régulateurs PI décrits par les équations V.42 et V.43.

$$PI w(t) = kp_w \left( e_w(t) + \frac{1}{T_{i_w}} \int e_w(t) d(t) \right) \quad (V.42)$$

$$PI Ia(t) = kp_{Ia} \left( e_{Ia}(t) + \frac{1}{T_{i_{Ia}}} \int e_{Ia}(t) d(t) \right) \quad (V.43)$$

où :

$kp_w, T_{i_w}$  sont les paramètres du PI en vitesse;  
 $e_w(t)$  représente l'erreur en vitesse;  
 $kp_{Ia}, T_{i_{Ia}}$  sont les paramètres du PI en courant;  
 $e_{Ia}(t)$  représente l'erreur en courant.

Le système est muni de quatre capteurs afin de mesurer la valeur des entrées et des sorties du moteur.

- C<sub>Ua</sub> est le capteur de la tension  $Ua(t)$ ;
- C<sub>Ml</sub> est le capteur du couple  $Ml(t)$ ;
- C<sub>Ia</sub> est le capteur du courant  $Ia(t)$ ;
- C<sub>w</sub> est le capteur de la vitesse  $w(t)$ .

Les caractéristiques nominales du moteur et les équations qui décrivent son comportement, ont été présentées au paragraphe V.2.

### V.3.3 Les conditions de simulation.

#### Le système.

Le point de fonctionnement est donné par les valeurs constantes des entrées  $w_{ref}(t)$  et  $Ml(t)$ .  
 $w_{ref}(t)=5$  V;  
 $Ml(t)=1.4575$  N m;  
 $Ia(t)=5.7199$  A;  
 $w(t)=300.0265$  rad/s;

Les défauts sont modélisés par des échelons qui représentent une variation des valeurs nominales des capteurs, des paramètres et de l'actionneur.

### V.3.4 Génération de Résidus.

#### V.3.4.1 L'espace de parité en continu.

L'espace de parité en boucle ouverte consiste à utiliser les mesures  $Ua(t)$ ,  $Ml(t)$ ,  $Ia(t)$  et  $w(t)$ . Cela ne permet pas la détection et la localisation de défauts sur l'actionneur  $Uc$ . Pour détecter ces défauts, nous utiliserons le modèle du moteur en boucle fermée décrit par les équations V.44 et V.45.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}(t) \\ \dot{U}(t) \\ \dot{Ia}(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{-C_w k_{pw}}{T_{iw}} \\ \frac{k_{pla}}{T_{ila}} & 0 & \frac{-k_{pla} C_{Ia}}{T_{ila}} & \frac{-k_{pla} k_{pw} C_w}{T_{ila}} \\ \frac{U_c k_{pla}}{L_a} & \frac{U_c}{L_a} & \frac{-(U_c k_{pla} C_{Ia} + R_a)}{L_a} & \frac{-(U_c k_{pw} k_{pla} C_w + Fl)}{L_a} \\ 0 & 0 & \frac{Fl}{J} & \frac{-Mfl}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(t) \\ U(t) \\ Ia(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_{pw}}{T_{iw}} & 0 \\ \frac{-k_{pla} k_{pw}}{T_{ila}} & 0 \\ \frac{U_c k_{pw} k_{pi}}{L_a} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{ref}(t) \\ Ml(t) \end{bmatrix}$$

(V.44)

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \\ Y_3(t) \\ Y_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(t) \\ U(t) \\ I_a(t) \\ w(t) \end{bmatrix}$$

(V.45)

$$Y(t) = CX(t)$$

où :

$I(t)$  est l'état du régulateur en vitesse;  
 $U(t)$  est l'état du régulateur en courant.

A partir des équations V.44 et V.45, quatre résidus sont générés.

$$\begin{bmatrix} I(t) \\ U(t) \\ I_a(t) \\ w(t) \\ \dot{I}(t) \\ \dot{U}(t) \\ \dot{I}_a(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a_{14} \\ a_{21} & 0 & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(t) \\ U(t) \\ I_a(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{11} & 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & 0 & 0 & 0 \\ b_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{ref}(t) \\ Ml(t) \\ \dot{w}_{ref}(t) \\ \dot{M}l(t) \end{bmatrix}$$

(V.46)

$$Y_f(t) = TX(t) + Q U_f(t)$$

$$r(t) = W Y_f(t) - WQ U_f(t)$$

(V.47)

Les coefficients de la matrice  $W$  sont :

$$W = \begin{bmatrix} -a_{31} & -a_{32} & -a_{33} & -a_{34} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -(a_{21}+a_{31}) & -a_{32} & -(a_{23}+a_{34}+a_{43}) & -(a_{24}+a_{34}+a_{44}+a_{14}) & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -a_{43} & -(a_{14}+a_{44}) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{43}+a_{33} & a_{34}+a_{44} & 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

(V.4)

8)

L'équation V.47 devient alors :

$$r_1(t) = w_{11} I(t) + w_{12} U(t) + w_{13} I_a(t) + w_{14} w(t) + w_{17} \dot{I}_a(t) - (w_{17} b_{31}) w_{ref}(t)$$

(V.49)

$$r_2(t) = w_{21} I(t) + w_{22} U(t) + w_{23} Ia(t) + w_{24} w(t) + w_{25} \dot{I}(t) + w_{26} \dot{U}(t) + w_{27} \dot{Ia}(t) + w_{28} \dot{w}(t) - (w_{25} b_{11} + w_{26} b_{21} + w_{27} b_{31}) w_{ref}(t) - (w_{28} b_{42}) Ml(t)$$

(V.50)

$$r_3(t) = w_{33} Ia(t) + w_{34} w(t) + w_{35} \dot{I}(t) + w_{38} \dot{w}(t) - (w_{35} b_{11}) w_{ref}(t) + (w_{38} b_{42}) Ml(t)$$

(V.51)

$$r_4(t) = w_{41} I(t) + w_{42} U(t) + w_{43} Ia(t) + w_{44} w(t) + w_{47} \dot{Ia}(t) + w_{48} \dot{w}(t) - (w_{47} b_{31}) w_{ref}(t) - (w_{48} b_{42}) Ml(t)$$

(V.52)

où :

$w_{il}$  sont les coefficients de la matrice  $W$ ;  
 $l=1, \dots, 8$ .

Le Tableau V.8 représente la matrice de diagnostic obtenue à partir des équations V.49 à V.52. Le signal d'entrée  $w_{ref}(t)$  est perturbé par un signal d'excitation afin de permettre la détection des paramètres  $La$  et  $J$ . Le signal d'excitation est une séquence binaire pseudo-aléatoire (SBPA) d'amplitude égale à  $\pm 0.07$  V. La SBPA a été engendrée par un registre à décalage de 7 bits. Les défauts ont été classifiés par rapport aux variables électriques et mécaniques afin de localiser ceux qui possèdent des signatures identiques. Cette classification permet de localiser les défauts sur l'actionneur  $Uc$  et sur le paramètre  $Ra$  dans l'inducteur du moteur. De même, les défauts sur le paramètre  $Mfl$  et sur le capteur  $C_{MI}$  sont considérés en tant que défauts mécaniques liés au couple du moteur.

0 : pas de changement de la valeur du résidu                      M : changement positif de la valeur moyenne du résidu  
E : changement de l'écart type du résidu                      - M : changement négatif de la valeur moyenne du résidu

	DEFAUTS ELECTRIQUES					DEFAUTS MECANIQUES			
	DEFAUTS ARMATURE				FLUX	VITESSE	DEFAUTS COUPLE		
	d E 1	d E 2	d E 3	d E 4	d E 5	d M 1	d M 2	d M 3	d M 4
<b>r 1</b>	M	M	-M	E	-M	-M	0	0	0
<b>r 2</b>	M	M	M	E	-M	-M	E	-M	-M
<b>r 3</b>	0	0	M	0	M	-M	E	-M	-M
<b>r 4</b>	-M	-M	-M	E	M	M	E	M	M
	d Uc + 10 %	d Ra - 10 %	d C Ia - 10 %	d La - 10 %	d F1 + 10 %	d C w - 10 %	d J - 10 %	d Mfl + 10 %	d C MI - 10 %

↑                      ↑                      ↑                      ↑                      ↑                      ↑                      ↑

SIGNATURES IDENTIQUES

Tableau V.8 : Matrice de Diagnostic pour le Moteur en Boucle Fermée.

Deux remarques s'imposent :

- la classification des défauts de type capteur, actionneur et paramètre permet la localisation de cinq défauts: deux défauts de type capteur ( $d C_{Ia}$ ,  $d C_w$ ) et trois défauts de type paramètre ( $d La$ ,  $d Fl$ ,  $d J$ ). Le défaut sur l'actionneur ne peut pas être localisé;
- la classification des défauts de type électrique et mécanique permet la localisation de sept défauts: quatre défauts électriques ( $d E_1$ - $d E_2$ ,  $d E_3$ ,  $d E_4$ ,  $d E_5$ ) et trois défauts mécaniques ( $d M_1$ ,  $d M_2$ ,  $d M_3$ - $d M_4$ ).

Bien que le rang de la matrice  $W$  soit égal à quatre, les résultats des simulations montrent que  $r_2 = -r_4$ . Alors, seuls les résidus  $r_1$ ,  $r_2$  et  $r_3$  seront retenus pour les étapes d'évaluation de résidus et de décision.

### V.3.4.2 L'estimation paramétrique en continu.

Les paramètres électriques et mécaniques du moteur sont estimés en boucle ouverte. La Figure V.17 montre le schéma de principe.

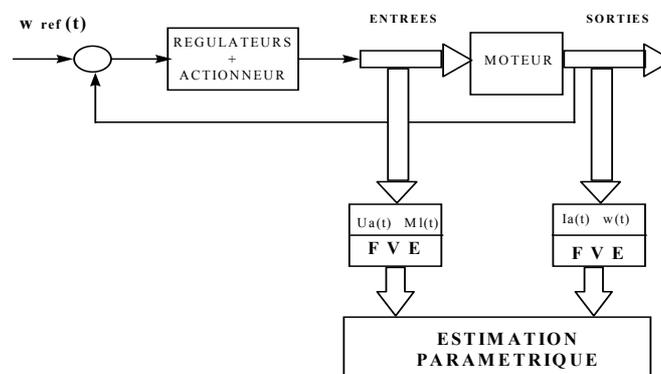


Figure V.17 : Estimation des Paramètres du Moteur.

Les entrées ( $Ua(t)$ ,  $Ml(t)$ ) et les sorties ( $Ia(t)$ ,  $w(t)$ ) du moteur sont filtrées par des Filtres de Variables d'Etat qui ont une bande passante identique (159 Hz.). Les signaux filtrés et leurs dérivées sont utilisés pour estimer les paramètres liés aux coefficients physiques ( $Ra$ ,  $La$ ,  $Fl$ ,  $J$ ,  $Mfl$ ) du moteur. Ainsi, les équations et les résultats présentés à la section V.2.4.2 sont aussi valables pour la boucle ouverte que pour la boucle fermée. Cependant dans un souci de clarté, nous présentons à nouveau la matrice de diagnostic pour l'estimation paramétrique.

M : représente un changement dans la valeur moyenne du résidu

PARTIE ELECTRIQUE									
	DEFAUTS ELECTRIQUES					DEFAUTS MECANIQUES			
	d E 1	d E 2	d E 3	d E 4	d E 5	d M 1	d M 2	d M 3	d M 4
r e 1	0	M	M	0	0	0	0	0	0
r e 2	0	0	0	0	M	M	0	0	0
r e 3	0	0	M	M	0	0	0	0	0
	d U c	d R a	d C I a	d L a	d F I	d C w	d J	d M f l	d C M l

PARTIE MECANIQUE									
	DEFAUTS ELECTRIQUES					DEFAUTS MECANIQUES			
	d E 1	d E 2	d E 3	d E 4	d E 5	d M 1	d M 2	d M 3	d M 4
r m 1	0	0	M	0	M	0	0	0	M
r m 2	0	0	0	0	0	M	0	M	M
r m 3	0	0	0	0	0	M	M	0	M

Tableau V.9 : Matrice de Diagnostic pour l'Estimation Paramétrique.

Les étapes d'évaluation et de décision pour le moteur en boucle fermée reposent sur les mêmes principes et algorithmes que ceux présentés dans l'étude de la boucle ouverte. Afin d'utiliser les informations issues de l'espace de parité et de l'estimation paramétrique, il faut prendre en compte le filtrage des résidus, les caractéristiques transitoires des résidus et la construction de l'arbre de défauts de deux niveaux. Toutefois, nous présentons les orientations générales et les points les plus importants considérés dans les étapes d'évaluation et de décision pour la boucle fermée. De même que pour la boucle ouverte, l'espace de parité et l'estimation paramétrique fournissent de meilleures signatures que le schéma d'un seul observateur de Luenberger. Pour cette raison, nous ne présentons pas celui-ci. Toutefois, l'annexe F présente les résultats obtenus par les simulations.

### V.3.5 Evaluation des résidus.

Les trois grandeurs utilisées dans l'évaluation des résidus sont la moyenne, le signe et l'écart type des résidus. La Figure V.18 illustre le synoptique du schéma utilisé dans l'étape d'évaluation des résidus.

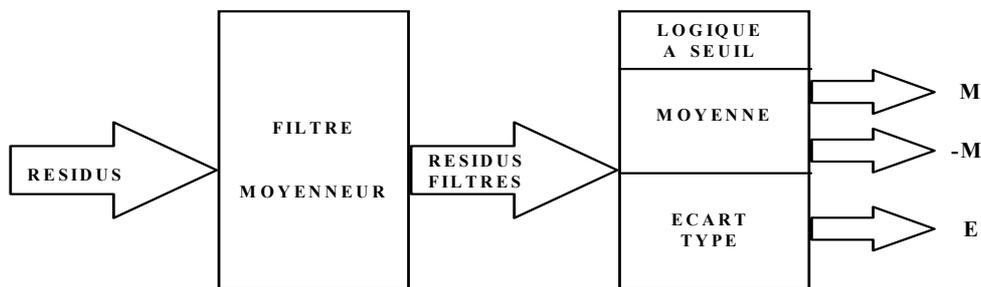


Figure V.18 : Evaluation des Résidus par un Test de Logique à Seuil.

Les résidus sont évalués par l'intermédiaire d'une logique à seuil. Le filtre moyenneur a pour objectif de réduire les effets du bruit. La logique à seuil permet d'évaluer les changements positifs (M) et négatifs (-M) ainsi que l'écart type (E) des résidus. Le Tableau V.10 montre la valeur des seuils fixés pour l'espace de parité et l'estimation paramétrique. Ces seuils ont été fixés par rapport aux effets du bruit sur les résidus filtrés.

ESTIMATION PARAMETRIQUE		ESPACE DE PARITE	
<b>r</b>	SEUILS ( <b>t r ei</b> )	<b>r</b>	SEUILS ( <b>t r pi</b> )
<b>r e1</b>	+ 8 e - 3	<b>r p1</b>	+ 4 e - 1
	- 5 e - 3		- 4 e - 1
<b>r e2</b>	+ 1 e - 4	<b>r p2</b>	+ 4 e - 1
	- 1.5 e - 4		- 4 e - 1
<b>r e3</b>	+ 5 e - 5	<b>r p3</b>	+ 5 e - 1
	- 3 e - 5		- 5 e - 1
<b>r m1</b>	+ 3 e - 2	<b>r p1</b>	+ 4 e - 1
	- 4 e - 2		- 4 e - 1
<b>r m2</b>	+ 5 e - 4		
	- 6 e - 4		
<b>r m3</b>	+ 8 e - 5		
	- 9 e - 5		

Tableau V.10 : Seuils pour les Résidus du Moteur en Boucle Fermée.

### V.3.6 Décision.

Pour l'espace de parité, les signatures des défauts d E 3, d E 5 et d M 1 sont identiques par rapport à la valeur moyenne (cf. Tableau V.8). Le signe est la grandeur qui permet de différencier ces trois défauts. Les trois règles de décision utilisées sont:

SI  $[r_2(t)]*[r_3(t)]>0$  ET  $[r_1(t)]*[r_2(t)]<0$  ALORS d E 3

SI  $[r_2(t)]*[r_3(t)]<0$  ALORS d E 5

SI  $[r_2(t)]*[r_3(t)]>0$  ET  $[r_1(t)]*[r_2(t)]>0$  ALORS d M 1

Les autres défauts du Tableau V.8 ne nécessitent pas la prise en compte du signe du résidu pour être localisés. La Figure V.19 montre le schéma de base utilisé dans l'arbre de défauts. L'arbre est composé de deux niveaux de décision. Le premier niveau utilise les informations issues de l'espace de parité. Le deuxième niveau utilise les informations fournies par l'estimation paramétrique. L'espace de parité utilise huit portes ET de trois entrées. Ces huit portes correspondent aux sept défauts localisés et à la condition d'opération normale. La logique de décision des portes est donnée par le Tableau V.8. L'estimation paramétrique utilise dix portes ET de sept entrées. La logique de décision de l'estimation paramétrique est définie par la matrice de diagnostic présentée au Tableau V.9

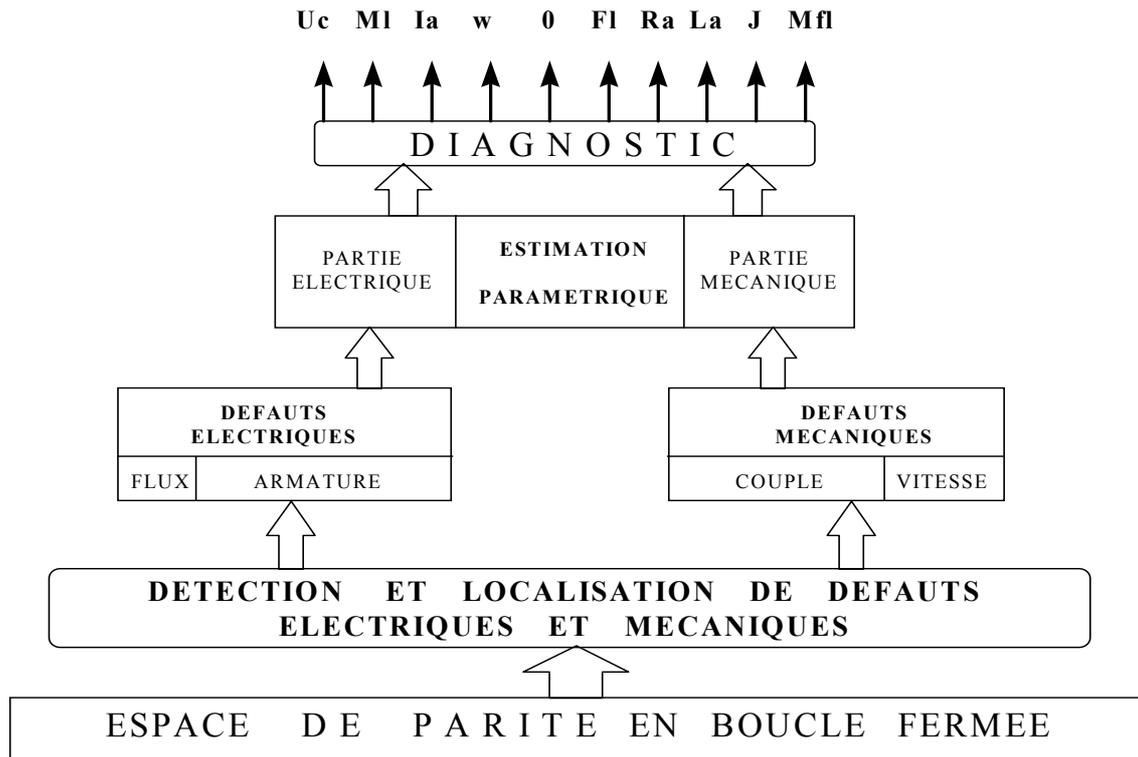


Figure V.19 : Diagnostic Basé sur la Fonction.

### V.3.7 Conclusion.

Les défauts de type capteur, actionneur et paramètre ont été détectés et localisés dans le cadre de l'approche fonctionnelle du diagnostic. La prise en compte explicite de la fonction a permis de concevoir autrement le problème de diagnostic en boucle fermée.

Notre approche utilise les variables d'état du moteur et des régulateurs pour générer des résidus à partir de l'espace de parité. Cela nous permet de localiser les défauts sur l'actionneur. L'estimation paramétrique fournit des informations plus précises pour la localisation de défauts. Nous avons construit un arbre à deux niveaux afin d'intégrer les informations de ces deux méthodes de diagnostic. La structure de l'arbre de défauts est définie par rapport aux défauts électriques et mécaniques du moteur.

## V.4 Conclusion.

La simulation d'un moteur à courant continu a été utilisée afin de montrer les avantages de notre travail de recherche. Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie aborde le problème du diagnostic de défauts sur les capteurs et les paramètres du moteur en boucle ouverte. La deuxième partie est consacrée au diagnostic des défauts de type capteur, actionneur et paramètre du moteur en boucle fermée. Dans les deux cas, les résultats des simulations montrent que l'approche fonctionnelle permet de choisir la représentation la plus convenable pour la localisation de défauts.

Les signatures identiques sont un problème majeur dans la localisation de défauts. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé la notion de fonction dans le cadre d'un modèle ontologique. Les défauts de type capteur, actionneur et paramètre sont détectés et localisés à l'aide de l'espace de parité et de l'estimation paramétrique. Nous avons utilisé des modèles continus afin de faciliter l'interprétation des signatures. Notre approche emploie le modèle ontologique de la fonction afin de classifier et d'organiser la connaissance de diagnostic contenue dans les signatures.

Il s'agit d'un cadre générique pour interpréter autrement les défauts du système, dans le but d'obtenir des informations additionnelles des signatures. La fonction permet d'identifier les caractéristiques les plus représentatives des résidus et des signatures. Le nombre de défauts localisés dépend de la fonction choisie. Les résultats des simulations montrent que l'approche fonctionnelle du diagnostic apporte une solution au problème de la localisation de défauts qui possèdent des signatures identiques.

Notre travail se focalise notamment sur l'interprétation des signatures générées à partir de l'espace de parité, car l'espace de parité possède un temps de détection court et une complexité moyenne de calcul. Cependant l'approche proposée peut-être utilisée en combinaison avec l'estimation paramétrique. Cette combinaison est illustrée dans la construction de l'arbre de défauts dans l'étape de décision. Ainsi, l'approche proposée est aussi applicable dans le cadre de l'intégration de méthodes, ce qui permet de renforcer la décision finale du diagnostic.

# CONCLUSION

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic de défauts qui possèdent des signatures identiques.

La première partie tend à préciser l'importance de la classification et de l'organisation de la connaissance pour la localisation de défauts et présente les notions de base de l'approche fonctionnelle du diagnostic afin d'améliorer la localisation. Cette approche consiste à interpréter autrement la connaissance contenue dans les signatures de la matrice de diagnostic. La notion de fonction au sein du modèle ontologique de la détection et la localisation de défauts constitue le noyau et le principal apport de notre travail de recherche.

Les approches les plus classiques présentées dans la littérature ne prennent pas en compte, de façon explicite, la fonction dans la localisation de défauts. Ces approches interprètent le problème de diagnostic par rapport aux défauts du type capteur, actionneur ou composant. Ainsi, en présence de signatures identiques, les défauts ne peuvent pas être interprétés, classifiés et localisés. Cette conception du problème du diagnostic implique que les informations issues de l'espace de parité soient seulement utiles pour la détection de défauts. En revanche, notre approche considère que la localisation est possible à condition d'interpréter autrement les défauts. Un défaut peut être interprété de différentes façons, chaque interprétation représente une fonction.

Le choix de la fonction nécessite un cadre générique pour déterminer les caractéristiques les plus représentatives du défaut. Ce cadre générique, dénommé modèle ontologique, a fait l'objet de la deuxième partie de ce mémoire. Nous avons montré que la fonction, au sein du modèle ontologique, apporte une solution au problème de la localisation de défauts en présence de signatures identiques. Contrairement aux approches plus classiques fondées sur l'espace de parité pour la détection et l'estimation paramétrique pour la localisation, notre approche utilise l'espace de parité pour la détection et la localisation de défauts. Dans notre approche, la localisation dépend de la fonction choisie pour l'interprétation des défauts.

L'interprétation du défaut, choisie par rapport à la fonction, nécessite la mise en œuvre des étapes d'évaluation de résidus et de décision. Les connaissances fondamentale et interprétative de l'étape d'évaluation de résidus est classifiée et organisée à l'aide du modèle ontologique des résidus. Cependant, l'intégration des méthodes de diagnostic (espace de parité, observateurs, estimation paramétrique) est nécessaire pour localiser tous les défauts. Cette intégration est illustrée par la construction d'un arbre de défauts à deux niveaux. Le modèle ontologique du réseau de causalité a été utilisé afin de classifier et d'organiser la connaissance fondamentale et interprétative de l'arbre de défauts dans l'étape de décision.

Grâce à la simulation d'un moteur à courant continu utilisé comme exemple d'application, nous sommes aperçus que le nombre de défauts localisés dépend de l'interprétation du défaut. Les résultats des simulations montrent que l'approche fonctionnelle s'avère très utile dans la détection et la localisation de défauts de types capteur, actionneur et paramètre en présence de signatures identiques. Ainsi, notre travail de recherche montre l'importance et les avantages propres à l'élaboration d'une approche fonctionnelle du diagnostic. Cette approche représente un cadre générique qui peut être utilisé pour le diagnostic de défauts des systèmes en boucle ouverte, en boucle fermée ainsi que dans

l'intégration des informations issues de l'espace de parité, des observateurs et de l'estimation paramétrique.

Dans le cadre de notre travail de recherche, il nous semble intéressant d'explorer la combinaison des concepts de fonction et d'ontologie avec la théorie des bond-graph. Cette approche repose essentiellement sur la caractérisation des phénomènes d'échanges de puissance et d'énergie au sein du système. La caractérisation de ces phénomènes utilise les variables du système. Ainsi, pour les systèmes électriques, la puissance est représentée par le produit des variables "tension" et "courant". Ces variables sont utilisées pour exprimer la dissipation de l'énergie dans une résistance ou le stockage de l'énergie dans un condensateur ou dans une inductance.

Nous avons montré dans ce mémoire que l'interprétation des signatures par rapport aux variables du système s'avère très utile dans la localisation de défauts en présence de signatures identiques. Il serait par conséquent souhaitable de concevoir le diagnostic en considérant une approche basée sur la fonction, l'ontologie et le bond-graph. Cette approche pourrait comporter les étapes suivantes:

- la modélisation du système par rapport aux variables utilisant le bond-graph;
- la génération de résidus à partir des états qui représentent la puissance et l'énergie des variables propres au système;
- l'interprétation de défauts vis-à-vis des variables du système;
- la construction du réseau de causalité considérant les défauts liés aux variables et/ou aux transformations de puissance et d'énergie.

## Bibliographie

- [AB90] Abu-Hanna (A.) et Benjamins (R.).- «Knowledge Classification of Models in Model Based Diagnosis». *In : 10ème. Journées Internationales. Les Systèmes Experts et Leurs Applications*, vol. 3, pp. 97-110. Avignon, France, Mai 1990.
- [ABJ91] Abu-Hanna (A.), Benjamins (R.) et Janswiejer (W.).- «Device Understanding and Modeling for Diagnosis». *IEEE Expert*, vol. 6, n° 2, April 1991, pp. 26-32.
- [AF96] Alcorta Garcia (E.) et Frank (P. M.).- «On the Relationship Between Observer and Parameter Identification Based Approaches to Fault Detection». *In : 13th. World Congress of IFAC*, vol. N, pp. 25-29.- San Francisco C.A., USA, June 1996.
- [AF97] Alcorta Garcia (E.) et Frank (P. M.).-«Mixed Approach to Fault Diagnosis in Linear Systems». *In : IFAC SAFEPROCESS'97*, vol. 1, pp. 127-132.- Kingston Upon Hull, U.K., August 1997.
- [Ast91] Aström (K. J.).- «Intelligent Control». *In : European Control Conference ECC'91*, vol. 3, pp. 2328-2339.- Grenoble, France, July 1991.
- [AW89] Aström (K. J.) et Wittenmark (B.).- «*Adaptive Control*».-U.S.A., Addison-Wesley Publishing Company, 1989, chap. 3, pp. 58-104.
- [BBJP95] Blanke (R.), Borg (S. A.), Jorgensen (R. B.) et Patton (R. J.).- «Fault Detection for a Diesel Engine Actuator - A Benchmark for FDI». *Control Eng. Practice*, vol. 3, n° 12, 1995, pp. 1731-1740.
- [BCCS94] Berendsen (C. S.), Cassar (J. P.), Champeonis (G.) et Staroswieki (M.).- «Structured Generation of Analytical Redundancy Relations for the Detection of Control Loop Failures». *In : IFAC SAFEPROCESS'94*, vol. 2, pp. 708-713.- Espoo, Finland, June 1994.
- [BFFI97] Ballé (P.), Fischer (M.), Füssel (D.) et Isermann (R.).- «Integrated Control, Diagnosis and Reconfiguration of a Heat Exchanger». *In : Proceedings of the American Control Conference*, vol. 2, pp. 922-926.- Albuquerque, New Mexico., USA, June 1997.
- [BFH97] Ballé (P.), Füssel (D.) et Hecker (O.).- «Detection and Isolation of Sensor Faults on Nonlinear Process Based on Local Linear Models». *In : Proceedings of the American Control Conference*, vol. 1, pp. 468-472.- Albuquerque, New Mexico., USA, June 1997.

- [BH92] Brown (P. G.), Hwang (P. Y. C.) et Hecker (O.).- «*Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*».-U.S.A, John Wiley & Sons, Inc., 1992, chap. 1, pp. 1-77.
- [BJRE97] Ballé (P.), Juricic (D.), Rakar (A.) et Ernst (S.).- «Identification of Nonlinear Processes and Model Based Fault Isolation Using Linear Local Models». *In : Proceedings of the American Control Conference*, vol. 1, pp. 47-51.- Albuquerque, New Mexico., USA, June 1997.
- [BLJRV90] Brunet (J.), Laberrère (M.), Jaume (J.), Rault (A.) et Vergé (M.).- «*Détection et Diagnostic de Pannes : Approche par Modélisation*».-Paris, Hermes, 1990, chap. 6, 7, 8, 9.
- [BNF97] Ballé (P.), Nelles (O.) et Füssel (D.).-«Fault Detection for Nonlinear Processes Based on Local Linear Fuzzy Models In Parallel and Series-Parallel Mode». *In : IFAC SAFEPROCESS'97*, vol. 2, pp. 1138-1143.- Kingston Upon Hull, U.K., August 1997.
- [Boo94] Booch (G.).- «*Analyse & Conception Orientées Objets*».-France , Addison-Wesley , 1994, chap. 6.
- [Bos96] Bos (C.).- «A Graph-based Approach of Knowledge Modeling for Simulation Systems». *In : CESA '96 IMACS*, vol. 2, pp. 688-693.- Lille, France, July 1996.
- [BTR93] Belmeguenai (Y.), Tomasena (M.) et Robles (J. P.).- «Hierarchical Diagnosis of Continuous Processes». *In : International Conference on Fault Diagnosis - TOOLDIAG'93*, vol. 3, pp. 1037-1043.- Toulouse France, April 1993.
- [BY91] Bradshaw (J. A.) et Young (R. M.).- «Evaluating Design Using Knowledge of Purpose and Knowledge of Structure». *IEEE Expert*, vol. 6, n° 2, April 1991, pp. 33-40.
- [CCGTT89] Chitaro (L.), Constantini (C.), Guida (G.), Tasso (C.) et Toppano (E.).- «Diagnosis Based in Cooperation of Multiple Knowledge Sources». *In : 9ème. Journées Internationales. Les Systemès Experts et Leurs Applications. Concèrence Spécialisée: Systèmes Experts de Seconde Génération*, pp. 19-33. Avignon, France, 1989.
- [CGTT93] Chitaro (L.), Guida (G.), Tasso (C.) et Toppano (E.).- «Functional and Teleological Knowledge in the Multimodeling Approach for Reasoning about Physical Systems : A Case Study in Diagnosis». *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 23, n° 6, 1993, pp. 1718-1751.
- [CGTT92] Chittaro (L.), Giovani (G.), Tasso (C.) et Toppano (E.).-«Developing Diagnosis Applications Using Multiple Models : The Role of Interpretative Knowledge». *In : Industrial Applications of Knowledge-Based Diagnosis*, ed. by Guida G., et Stefanini A., pp 219-263.- Elsevier Science Publisher B. V., 1992.
- [Che84] Chen (C. T.).- «*Linear Systems Theory and Design*».-U.S.A, Holt Rinehart and Winston Inc., 1984, chap. 7, pp. 324-383.
- [CLCS94] Cassar (J. P.), Litwak (R. G.), Crocquempot (V.) et Staroswiecki (M.).- «Approche Structurelle de la Conception de Systèmes de Surveillance pour des Procédés Industriels Complexes». *Revue Européene de Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement*, vol. 4, n° 22, 1994, pp. 179-202.
- [Coi92] Coirault (P.).- «*Moments Temporels Partiels et Détection de Défaut des Systèmes à Temps Continu. Application à la Machine à Courant Continu*».- Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1992.

- [CP94] Chen (J.) et Patton (R. J.).- «A Re-Examination of Fault Detectability and Isolability in Linear Dynamics Systems». *In : IFAC SAFEPROCESS'94*, vol. 2, pp. 590-596.- Espoo, Finland, June 1994.
- [CW84] Chow (E. Y.) et Willsky (A. S.).- «Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems». *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 29, n° 7, 1984, pp. 603-614.
- [DCG97] Da Cunha (J.P.), Champeonis (G.) and Gabano (J.D.).-«Thermal Diagnosis on a D.C. Motor Working with Variable Speed». *In : IFAC SAFEPROCESS'97*, vol. 1, pp. 450-455.- Kingston Upon Hull, U.K., August 1997.
- [DCS94a] Delmaire (G.), Cassar (J. P) et Staroswiecki (M.).- «Comparison of Identification and Parity Space Approaches for Failure Detection in Single Input Single Output». *In : 3th IEEE Conference on Control Applications*, vol. 2, pp. 865-870.- Glasgow, U.K., August 1994.
- [DCS94b] Delmaire (G.), Cassar (J. P) et Staroswiecki (M.).- «Identification and Parity Space Techniques for Failure Detection in SISO Systems Including Modeling Errors». *In : 33rd Conference in Decision and Control*, vol. 3, pp. 2279-2285.- Lake Buena Vista FL., USA, December 1994.
- [DH95] D'Azzo (J. J.) et Houpis (C. H.).- «*Linear Control System Analysis and Design: Conventional and Modern*».- U.S.A., McGraw-Hill, Inc. Fourth Edition, 1995, chap.6, pp. 176-199.
- [DI92] Deibert (R.) et Iserman (R.).- «Examples for Fault Detection in Closed Loops». *In : IFAC Artificial Intelligence in Real-Time*, pp. 235-240.- Delf, The Netherlands, 1992.
- [DJ96] Danai (K.) et Jammu (V. B.).- «Robust Residual Generation for Fault Diagnosis Thru Pattern Classification». *In : 13th. World Congress of IFAC*, vol. N, pp. 193-198.- San Francisco C.A., USA, June 1996.
- [Dom88] Dominé (C. H.).- «*Techniques de l'Intelligence Artificielle : un guide structuré*».- France, BO-PRE., 1988, chap.4, pp 49-76.
- [Dor92] Dorf (R. C.).- «*Modern Control Systems*».-U.S.A., Addison-Wesley. Sixth Edition, 1992, chap.5, pp. 207-234
- [DR95] Deloule (F.) et Roche (C.).- «Ontologies & Knowledge Representation». *In : IEEE-ICSMC*, vol. 5, pp. 3857-3862.- Vancouver, Canada, October 1995.
- [FKW91] Frank (P. M.), Köppen (B.) et Wünnenberg (J.).- «General Solution of thr Robustness Problem in Linear Fault Detection Filters». *In : European Control Conference ECC'91*, vol. 2, pp.1407-1412.- Grenoble, France, July 1991.
- [FL87] Fink (P. K.) et Lustch (J. C.).- «Expert System and Diagnostic Expertise in The Mechanical and Electrical Domains». *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 17, n° 3, 1987, pp. 340-349.
- [Fra93] Frank (P. M.).- «Advances in Observer-Based Fault Diagnosis». *In : International Conference on Fault Diagnosis - TOOLDIAG'93*, vol. 3, pp. 817-836.- Toulouse France, April 1993.

- [Fra91a] Frank (P. M.).- «Enhancement of Robustness in Observer-Based Fault Detection». *In : IFAC SAFEPROCESS'91*, vol. 1, pp. 275-287.- Baden Baden, Germany, September 1991.
- [Fra91b] Franke (D. W.).- «Deriving and Using Descriptions of Purpose». *IEEE Expert*, vol. 6, n° 2, April 1991, pp. 41-47.
- [Fra90] Frank (P. M.).- «Fault Diagnosis in Dynamic System Using Analytical and Knowledge-based Redundancy - a Survey and Some News Results». *Automatica*, vol. 26, n° 3, 1990, pp. 459-474.
- [Fra89] Frank (P. M.).-«Evaluation of Analytical Redundancy for Fault Diagnosis in Dynamic Systems». *In : IFAC AIPAC'89*, vol. 1, pp. 7-18.- Nancy, France, July 1989.
- [Fra86] Frank (P. M.).- «Fault Diagnosis in Dynamic Systems via State Estimation: A Survey». *In : System Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge-Based Approaches*, ed. by Tzafestas (S.), Singh (M.) et Schmidt (G.), vol. 1, part 1, pp. 35-98.- D. Reidel Publishing Company, 1986.
- [Fre91] Freyermuth (B.).- «Knowledge Based Incipient Fault Diagnosis of Industrial Robots». *In : IFAC SAFEPROCESS'91*, vol. 2, pp. 31-37.- Baden Baden, Germany, September 1991.
- [FW89] Frank (P. M.) et Wünnenberg (J.).- «Robust Fault Diagnosis Using Unknown Input Observer Schemes». *In : Fault Diagnosis in Dynamic Systems : Theory and Applications*, ed. Patton (R.), Frank (P. M.) et Clark (R.), chap. 3, pp. 47-88.- Prentice Hall International Ltd., 1989.
- [GA92] Gertler (J.) et Anderson (K. C.).- «An Evidential Reasoning Extension to Quantitative Model-Based Failure Diagnosis». *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 22, n° 2, 1992, pp. 275-289.
- [Gar95] Garnier (H.).- «Identification de Modèles Paramétriques Continus par Moments de Poisson». - CRAN, Thèse de doctorat, Université de Nancy I, 1995.
- [GC94] Gertler (J.) et Costin (M.).- «Model Based Diagnosis of Automotive Engines». *In : IFAC SAFEPROCESS'94*, vol. 2, pp. 421-430.- Espoo, Finland, June 1994.
- [GCFKMM95] Gertler (J.), Costin (M.), Fang (X.), Kowalczyk (M.), Kunwer (M.) et Monajemy (R.).- «Model Based Diagnosis for Automotive Engines - Algorithm Development and Testing on a Production Vehicle». *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 3, n° 1, 1995, pp. 61-69.
- [GCFL94] Gertler (G.), Costin (M.), Fang (X.) et Luo (Q.).- «Direct Identification of Structured Parity Equations». *In : 10th. IFAC SYSYD'94*, vol. 3, pp. 95-100.- Copenhagen., Denmark, July 1994.
- [GD97] Gertler (J.) et DiPierro (G.).-«On The Relationship Between Parity Relations and Parameter Estimation». *In : IFAC SAFEPROCESS'97*, vol. 1, pp. 468-472.- Kingston Upon Hull, U.K., August 1997.
- [Ger97a] Gertler (J.).- «Fault Detection and Isolation Using Parity Relations». *Control Eng. Practice*, vol. 5, n° 5, 1997, pp. 653-661.

- [Ger97b] Gertler (J.).- «A Cautions Look at Robustness in Residual Generation». *In : IFAC SAFEPROCESS'97*, vol. 1, pp. 133-139.- Kingston Upon Hull, U.K., August 1997.
- [Ger91] Gertler (J.).- «Analytical Redundancy Methods in Fault Detection and Isolation : Survey and Synthesis». *In : IFAC SAFEPROCESS'91*, vol. 1, pp. 9-12.- Baden Baden, Germany, September 1991.
- [GG94] Guan (J.) et Graham (J. H.).- «Diagnostic Reasoning with Fault Propagation Digraph and Sequential Testing». *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 24, n° 10, 1994, pp. 1552-1558.
- [GK93] Gertler (J.) et Kunwer (M. M.).- «Optimal Residual Decoupling for Robust Fault Diagnosis». *In : International Conference on Fault Diagnosis - TOOLDIAG'93*, vol. 2, pp. 436-452.- Toulouse France, April 1993.
- [GS90] Gertler (J.) et Singer (D.).- «A New Structural Framework for Parity Equation-Based Failure Detection and Isolation». *Automatica*, vol. 6, n° 2, 1990, pp. 381-388.
- [GT87] Gross ( J. L.) et Tucker (T. W.).- «*Topological Graph Theory*».-U.S.A., John Wiley & Sons, 1987, chap. 1, pp. 1-55.
- [Hau92] Hautamäki (A.).- «A Conceptual Space Approach to Semantic Networks». *Computers Math. Applic*, vol 23, n° 6-9, 1992, pp. 517-525.
- [HI96] Höfling (T.) et Isermann (R.).- «Fault Detection on Adaptive Parity Equations and Single-Parameter Tracking». *Control Eng. Practice*, vol. 4, n° 10, 1996, pp. 1361-1369.
- [Höf95] Höfling (T.).- «Tracking of Single Parameters Based on Adaptive Parity Equations for Fault Detection». *In : European Control Conference ECC'95*, vol. 3, pp. 1993-1998.- Rome, Italy, September 1995.
- [Hou95] Houriez (B.).- «La Structuration des Connaissances dans le Contexte des Sciences pour l'Ingénieur». *Revue Européenne de Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement*, vol. 5, n° 2, 1995, pp. 201-218.
- [HP94] Höfling (T.) et Pfeufer (T.).- «Detection of Additive and Multiplicative Faults - Parity Space vs. Parameter Estimation». *In : IFAC SAFEPROCESS'94*, vol. 2, pp. 539-544.- Espoo, Finland, June 1994.
- [IB97] Isermann (R.) et Ballé (P.).- «Trends in the Application of Model-Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes». *Control Eng. Practice*, vol. 5, n° 5, 1997, pp. 709-719.
- [IB96] Isermann (R.) et Ballé (P.).- «Trends in the Application of Model Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes». *In : 13th. World Congress of IFAC*, vol. N, pp. 1-12.- San Francisco C.A., USA, June 1996.
- [ILM92] Isermann (R.), Lachmann (L.) et Matko (D.).- «*Adaptive Control Systems*».- U.K., Prentice-Hall International Ltd., 1992, chap 9, pp. 301-323 .
- [IP96] Isermann (R.) et Pfeufer (T.).- «Integrated Model Based Fault Detection and Diagnosis with Application to Electromechanical Drives». *In : 13th. World Congress of IFAC*, vol. N, pp. 85-90.-San Francisco C.A., USA, June 1996.
- [Ise97a] Isermann (R.).- «Supervision, Fault-Detection and Fault-Diagnosis Methods : An Introduction». *Control Eng. Practice*, vol. 5, n° 5, 1997, pp. 639-652.

- [Ise97b] Isermann (R.).- «Mechetronic System : A Challenge for Control Engineering». *In : Proceedings of the American Control Conference*, vol. 5, pp. 2617-2632.- Albuquerque, New Mexico., USA, June 1997.
- [Ise94] Isermann (R.).- «Integration of Fault Detection and Diagnosis Methods». *In : IFAC SAFEPROCESS'94*, vol. 2, pp. 597-612.- Espoo, Finland, June 1994.
- [Ise93] Isermann (R.).- Fault Diagnosis of Machines via Parameter Estimation and Knowledge Processing : Tutorial Paper». *Automatica*, vol. 29, n° 4, 1990, pp. 815-835.
- [Ise84] Isermann (R.).- «Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods - A Survey». *Automatica*, vol. 20, n° 4, 1984, pp. 387-404.
- [IU93] Isermann (R.) et Ulieru (M.).- «Integrated Fault Detection and Diagnosis». *In : IEEE-ICSMC*, vol. 1, pp. 743-748.- Le Touquet, October 1993.
- [JAB93] Jansweijer (W.), Abu-Hanna (A.) et Benjamins (R.).- «Configuration of Diagnostic Applications». *In : International Conference on Fault Diagnosis - TOOLDIAG'93*, vol. 2, pp. 531-540.- Toulouse France, April 1993.
- [JB86] Jones (A. H.) et Burge (S. E.).- «An Expert System Design Using Cause-Effect Representations and Simulation for Fault Detection». *In : System Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge-Based Approaches*, ed. by Tzafestas S., Singh M. et Schmidt G., vol. 2, pp 71-80.- D. Reidel Publishing Company, 1986.
- [JJ93] Jia (F.) et Jiang (J.).- «Fault Diagnosis in DC Servo Systems : A Comparative Study of Three Fault Diagnosis Schemes». *In : International Conference on Fault Diagnosis - TOOLDIAG'93*, vol. 2, pp. 573-581.- Toulouse France, April 1993.
- [Keu91] Keuneke (A. M.).- «Device Representation : The Significance of Functional Knowledge». *IEEE Expert*, vol 6, n° 2, April 1991, pp. 22-25.
- [KMR90] Karnopp (D.C), Margolis (L.) and Rosenberg (L. C.).- «*Systems Dynamics: A Unified Approach*».- U.S.A., John Wiley & Sons, Inc. Second Edition, 1990, chap. 2, pp 12-30
- [KNC97] Koenig (D.), Nowakowski (S.) and Cecchin (T.).-«An Original Approach for Actuator and Component Fault Detection and Isolation». *In : IFAC SAFEPROCESS'97*, vol. 1, pp. 95-105.- Kingston Upon Hull, U.K., August 1997.
- [Kos95] Koscielny (J. M.).- «Fault Isolation in Industrial Processes by the Dynamic Table of States Method». *Automatica*, vol. 31, n° 5, 1995, pp. 747-753.
- [KSS94] Koscielny (J. M.), Sedziak (D.) et Sikora (A.).- «The DIAG System for Fault Detection and Isolation in Industrial Processes». *In : IFAC SAFEPROCESS'94*, vol. 2, pp. 790-795.- Espoo, Finland, June 1994.
- [Lan93] Landau (I. D.).- «Identification et Commande des Systèmes». France, Hermes, 2ém edition, 1993, chap. 5, pp. 261-314.
- [Lan79] Landau (I. D.).- «*Adaptive Control : The Model Reference Approach*».- Marcel Dekker, 1979.
- [LA97] Leonhardt (L.) et Ayoubi (M.).- «Methods of Fault Diagnosis». *Control Eng. Practice*, vol. 5, n° 5, 1997, pp. 683-692.

- [Leh92] Lehman (F.)- «Semantic Networks». *Computers Math. Applic*, vol 23, n° 2-5, 1992, pp. 1-50.
- [Lei93] Leitch (R.)- «Engineering Diagnosis : Matching Problems to Solutions». *In : International Conference on Fault Diagnosis - TOOLDIAG'93*, vol. 3, pp. 837-845.- Toulouse France, April 1993.
- [Lei92] Leitch (R.)- «Artificial Intelligence in Control : Some Myths, some Fears but Plenty Prospects». *Computing & Control Engineering Journal*, July 1992, pp. 1-11.
- [LG92] Leitch (R.) et Galanti (M.)- «Task Classification for Knowledge-Based Systems in Industrial Automation». *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 22, n° 1, 1992, pp. 142-152.
- [LS87] Lappus (G.) et Schmidt (G.)- «Critical Assessment of Various Leak Detection Techniques for Gas Pipeline Networks ». *In Fault Detection & Reliability Knowledge Based & others Approaches*, vol. n° 9, ed. by Singh (M. G.), Hindi (K. S.), Schmidt (G.) et Tzafestas (S.), pp 105-112.- Pergamon Press, 1987.
- [Mag95] Magni (J. F.)- «On Continuous-Time Parameter Identification by Observers». *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, n° 10, 1995, pp. 1789-1792.
- [MH72] Millman (J.) et Halkias (C.)- «*Integrated Electronics : Analog and Digital Circuits and Systems*».-U.S.A., Mc Graw-Hill Inc., 1972, chap. 16, pp 501-592.
- [Mil87] Milne (R.)- «Strategies for Diagnosis». *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 17, n° 3, 1987, pp. 333-339.
- [ML94] Montmain (J.) et Leyval (L.)- «Causal Graphs for Model Based Diagnosis». *In : IFAC SAFEPROCESS'94*, vol. 1, pp. 347-355.- Espoo, Finland, June 1994.
- [MM94] Magni (J. F.) et Mouyon (P.)- «On Residual Generation by Observer and Parity Space Approaches». *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, n° 2, 1994, pp. 441-447.
- [Oga87] Ogata (K.)- «*Dinamica de Sistemas*».-México, Prentice Hall Hispanoamericana S. A., 1987, chap. 7, pp. 363-493.
- [Pat97] Patton (R. J.)-«Fault-Tolerant Control : The 1997 Situation». *In : IFAC SAFEPROCESS'97*, vol. 2, pp. 1033-1055.- Kingston Upon Hull, U.K., August 1997.
- [Pat94] Patton (R. J.)- «Robust Model-Based Fault Diagnosis : The State of the Art». *In : IFAC SAFEPROCESS'94*, vol. 1, pp. 1-24.- Espoo, Finland, June 1994.
- [PC97] Patton (R. J.) et Chen (J.)- «Observed-Based Fault Detection and Isolation : Robustness and Applications». *Control Eng. Practice*, vol. 5, n° 5, 1997, pp. 671-672.
- [PC91a] Patton (R. J.) et Chen (J.)- «An Review of Parity Space Approaches to Fault Diagnosis». *In : IFAC SAFEPROCESS'91*, vol. 1, pp. 239-255.- Baden Baden, Germany, September 1991.
- [PC91b] Patton (R. J.) et Chen (J.)-«A Re-examination of the Relationship Between Parity Space and Observer-based Approaches in Fault Diagnosis». *Revue Européenne de Diagnostic et Sécurité de Fonctionnement*, vol. 1, n° 2, 1991, pp. 183-200.

- [Pom88] Pomerol (J-C).- «*Les Systèmes Experts*».- France, Edit. HERMES, 1988, chap. 2, pp. 15-29.
- [Pup93] Puppe (F.).- «*Systematic Introduction to Expert Systems*».-U.S.A., Springe-Verlang, 1993, chap.1, pp. 1-26.
- [RDMB90] Ragot (J.), Darouach (M.), Maquin (D.) et Bloch (G.).- «*Validation de Données et Diagnostic*».-France, Hermes , 1990, chap. 2, 3.
- [RSMB92] Ramoni (M.), Stefanelli (M.), Magnani (L.) et Barosi (G.).- «*An Epistemological Framework for Medical Knowledge-Based Systems*». *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 22, n° 6, 1992, pp. 1361-1375.
- [SP91] Schoukens (J.) et Pinleton (R.).- «*Identification of Linear Systems*». U. K., Pergamon Press, 1991, chap. 1, pp. 1-30.
- [Spr92] Sprösser (T.).- «*Contribution à l'Etude des Méthodes de Détection de Défauts par Redondance Analytique*».- Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, 1992.
- [Uli93a] Ulieru (M.).- «*A Fuzzy-Logic Based Computer Assisted Fault Diagnosis System*». *In : International Conference on Fault Diagnosis - TOOLDIAG'93*, vol. 2, pp. 689-698.- Toulouse France, April 1993.
- [Uli93b] Ulieru (M.).- «*From Fault Trees to Fuzzy Relations in Managing Heuristics for Technical Diagnosis*». *In : IEEE-ICSMC*, vol. 2, pp. 392-397.- Le Touquet, October 1993.
- [UR87] Unbehauen (H.) et Rao (G. P.).- «*Identification of Continuous Systems*».-Netherlands, North-Holland, Systems and Control Series, vol. 10, 1987, chap. 1, 5.
- [VMC97] Vadam (O.), Montmain (J.) et Cassar (J. C.).- «*Fault Detection Using Parallel Simulations*». *In : IFAC SAFEPROCESS'97*, vol. 1, pp. 121-126.- Kingston Upon Hull, U.K., August 1997.
- [VTS97a] Vela Valdés (L.G.), Theilliol (D.) et Sauter (D.).- «*Fault Detection and Isolation in Closed Loop Systems Using Parallel Model and Functional Abstractions*». *In : Workshop Automation 201*, pp. 103-112.- Vienna, Austria, June 1997.
- [VTS97b] Vela Valdés (L.G.), Theilliol (D.) et Sauter (D.).- «*Using Ontological Classification to Design Fault Detection and Isolation Architecture*». *In : IFAC SAFEPROCESS'97*, vol. 1, pp. 456-461.- Kingston Upon Hull, U.K., August 1997.
- [Wel79] Wellstead (P. E.).- «*Introduction to Physical Systems Modeling*».- U.K. Academic Press Inc., Ltd., 1979, chap 2, pp. 28-54
- [ZTF93] Ziemer (R. E.), Tranter (W.H.) et Fannin (D.R.).- «*Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*».-U.S.A, John Wiley & Sons, Inc., 1992, chap. 1, pp. 1-77.
- [Zwi95] Zwingelstein (G.).- «*Diagnostic des Défaillances*».-Paris, Hermes, 1995, chap. 1, 2, 4, 5, 9.

## **Résumé :**

Le travail présenté dans ce mémoire concerne le développement d'une approche fonctionnelle dans le domaine du diagnostic de défauts. Cette approche repose sur une classification des connaissances issues du système afin de détecter et localiser les défauts vis-à-vis des caractéristiques les plus représentatives de son comportement. L'objectif de ce travail de recherche est d'aboutir à une meilleure structuration de la connaissance, des moyens et des outils dont on dispose face à un problème de diagnostic afin d'augmenter le nombre de défauts à localiser.

L'approche fonctionnelle du diagnostic repose sur la notion de fonction. Celle-ci est utilisée afin de localiser les défauts qui possèdent des signatures identiques. Les caractéristiques les plus représentatives de l'espace de parité, des observateurs et de l'estimation paramétrique sont classifiées à l'aide d'un modèle ontologique. La fonction, au sein du modèle ontologique, permet d'interpréter autrement la connaissance contenue dans les résidus et les signatures. Cette interprétation repose sur la définition et la spécification d'un cadre générique basé sur une analyse structurelle, comportementale et fonctionnelle des étapes de génération de résidus, d'évaluation de résidus et de décision.

L'application de l'approche proposée porte sur la simulation d'un moteur à courant continu en boucle ouverte et en boucle fermée en vue de détecter et de localiser des défauts capteurs, actionneurs et composants en présence de signatures identiques. L'apport de l'étude développée dans ce travail de recherche, se situe à l'intersection de deux domaines : l'intelligence artificielle et l'automatique.

**Mots clés :** localisation de défauts, analyse de signatures, diagnostic, modèle continu, approche fonctionnelle, ontologie.

## **Abstract :**

The work presented in this thesis deals with the development of a functional approach in the fault diagnostic field. This approach is based on the classification of knowledge about the system, in order to detect and isolate faults with respect to the principal characteristics in the behavior of the system. The objective of this work is to end at a best knowledge specification and utilization of abilities and tools in order to increase the quantity of isolated faults.

The functional approach in diagnostic is based on the function. This approach is used in order to isolate the faults that have same signatures. The principal characteristics of parity space, observers and parameter estimation are classified using an ontological model. The function, in the ontological model frame, let to interpret otherwise the knowledge contents in residuals and signatures. This interpretation is based on the definition and specification of a generic frame using a structural, behavioral and functional analysis of residual generation, residual evaluation and decision tasks.

The proposed approach is used on a simulated application concerning a D.C. motor in open and closed loop, in order to detect and isolate sensor, actuator and component faults which have the same signatures. The contribution of this work is placed on the intersection of two fields: artificial intelligence and automatic control.

**Keywords :** fault isolation, analysis of signatures, diagnostic, continuous models, functional approach, ontology.