Institut National Polytechnique de Lorraine
Ecole Doctorale IAE + M
DFD Automatique

Habilitation à diriger des recherches

Présentée par

Didier MAQUIN

Docteur de l'Université de Nancy 1
Maître de Conférences à l'Institut National
Polytechnique de Lorraine

Document 2 : Contexte scientifique

Diagnostic à base de modèles des systèmes technologiques

Soutenue le 18 novembre 1997 devant la commission d'examen :

Rapporteurs :	Bernard Dubuisson	Professeur, UTC
	José Ragot	Professeur, ENSG-INPL
	Marcel Staroswiecki	Professeur, Université de Lille I
Examinateurs :	René Husson	Professeur, ENSEM-INPL
	Philippe Mouyon	Ingénieur de recherche, ONERA-CERT
	Ronald Patton	Professeur, Université de Hull

First of all, you see that knowledge continually increases (for example, libraries get bigger), but in addition ignorance increases as well. In other words, you have to know something in order to ask the right question. The more you know, the more questions you can formulate, the more ignorance you are aware of. So we have the paradox that as knowledge increases, so does ignorance. Yet, we feel wiser.

David Gross
Unified Theories of Everything

Avant propos

L'habilitation à diriger des recherches est en place depuis une dizaine d'années. Elle continue cependant de revêtir des formes très différentes. Constituée simplement de quelques publications reliées sans explications complémentaires ou, au contraire, d'une synthèse scientifique de trois cent pages, les formes que les candidats à ce titre lui donnent sont très variées. Ayant lu un certain nombre de ces documents, j'ai essayé de faire la synthèse des présentations qui m'ont le plus séduites.

Le mémoire que je présente en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches est donc constitué de trois documents séparés. Le premier document est un "Curriculum vitae étendu" dont l'objet est de me présenter. Il comprend une partie intitulée "activité de recherche" dans laquelle je décris, sous forme d'un rapport d'activité, les dix années de recherche conduites après ma thèse. Le second document, que j'ai intitulé "Contexte scientifique", situe les thématiques de recherche auxquelles je me suis intéressé. Ce document ne constitue pas une synthèse en ce sens qu'il est volontairement incomplet ; seuls figurent les thèmes auxquels j'ai pu apporter une contribution. On notera, par exemple, que la conception d'observateurs en présence d'incertitudes non structurées ou que cette même conception par placement de la structure propre ne sont pas évoqués. Je suis bien sûr le développement de ces travaux, mais je n'y ai pas, pour l'instant, apporté de contribution ; ils ne figurent donc pas dans ce document. Enfin, le troisième document est une sélection d'articles dont je suis co-auteur. Ils ont été choisis de manière à illustrer le mieux possible les différentes thématiques de recherche que j'ai abordées.

Sommaire

Chapitre 0 : Introduction générale : Le diagnostic des systèmes technologiques 5
1. Contexte global 5
2. Concept de base : notion de redondance 13
3. La détection de défauts basée sur l'utilisation de modèles 15
4. Organisation du mémoire 19
5. Références bibliographiques 22

Chapitre 1 : Panorama des méthodes de génération d'équations de redondance 27
1. Introduction 27
2. L'approche espace de parité 27
   2.1. Espace de parité statique 28
      2.1.1. Génération de redondance par projection 28
      2.1.2. Extension aux systèmes avec contraintes 30
      2.1.3. Décomposition systématique 31
   2.2. Espace de parité dynamique 33
      2.2.1. Approche temporelle (numérique) 33
      2.2.2. Approche fréquentielle (symbolique) 35
      2.2.3. Exemple 36
      2.2.4. Utilisation des techniques d'analyse d'observabilité 37
   2.3. Théorie de l'élimination 38
3. Amélioration des méthodes : robustesse aux perturbations 42
   3.1. Cas des modèles statiques 43
      3.1.1. Découplage approché 43
      3.1.2. Vecteur parité d'un système à modèles multiples 46
   3.2. Cas des modèles dynamiques 48
4. Conception de résidus structurés 52
5. Références bibliographiques 55

Chapitre 2 : Génération de résidus à l'aide de reconstructeurs d'état 59
1. Introduction 59
2. Reconstruction d'état à l'aide d'observateurs 60
3. Amélioration de la méthode 62
   3.1. Observateurs à entrées inconnues 62
   3.2. Estimation des entrées inconnues 64
      3.2.1. Méthode de Hou et Müller 64
      3.2.2. Exemple 67
      3.2.3. Mise en évidence du conservatisme de la méthode 67
      3.2.4. Exemple (suite) 69
   3.3. Approche utilisant des factorisations des matrices de transfert 70

4. Résidus structurés - bancs d'observateurs 75
5. Observateurs non-linéaires 76
5.1. Introduction 76
5.2. Une méthode de conception d'un observateur non-linéaire 77
5.3. Exemple : 1ère partie - Conception 81
5.4. Exemple : 2ème partie - Observateurs dédiés 85
6. Reconstruction d'état généralisé 87
6.1. Introduction 87
6.2. Estimation d'état sur un horizon fixe 88
6.3. Estimation d'état sur "fenêtre glissante" 89
6.4. Filtrage entrée-sortie généralisé 90
6.5. Extension aux systèmes non-linéaires 93
7. Références bibliographiques 96

Chapitre 3 : Eléments de conception d'une architecture d'instrumentation 101
1. Introduction 101
2. Modèles utilisés 102
3. Démarche intuitive - définitions 103
3.1. Analyse de l'observabilité 103
3.2. Observabilité minimale d'une variable 104
3.3. Redondance de degré quelconque 104
3.4. Positionnement de capteurs sous contraintes de redondance 105
4. Démarche systématique - algorithmes 107
4.1. Analyse d'observabilité basée sur l'analyse des cycles 107
4.2. Détermination du degré de redondance d'une variable 109
4.3. Placement de capteurs sous contrainte de redondance 110
4.3.1. Solution par analyse matricielle 111
4.3.2. Solution par programmation linéaire mixte 112
5. Détection et localisation de défauts 115
5.1. Introduction 115
5.2. La notion de degré de redondance revisitée 115
5.3. Relations entre détectabilité, isolabilité et degré de redondance 116
5.4. Exemple 118
6. Evaluation de la fiabilité d'un système 122
7. Conclusion 125
8. Références bibliographiques 126

Conclusion générale 129

Chapitre 0

Introduction générale
Le diagnostic des systèmes technologiques

1. Contexte global

L'un des enjeux les plus importants de l'automatisation concerne aujourd'hui l'augmentation de la fiabilité, de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement des processus technologiques. En effet, dans une première période, l'automatisation des processus de production a surtout fait appel aux techniques d'optimisation avec l'objectif d'augmenter la productivité en implantant des commandes performantes.

Rapidement, cependant, on s'est rendu compte que le schéma théorique qui consiste à établir un modèle mathématique de l'installation, à piloter et à calculer les signaux de commande à appliquer pour satisfaire un critère de productivité n'est pas satisfaisant, car incomplet, d'un point de vue pratique. La principale raison qui conduit à un échec partiel de cette méthodologie tient sans doute à la difficulté d'établissement de modèles réellement représentatifs du fonctionnement d'une installation. Quoiqu'extrêmement important, ce problème essentiel de modélisation-identification ne sera pas abordé ici. L'hypothèse que les fonctions élémentaires d'une installation (processus lui-même, capteurs, actionneurs, régulateurs, etc.) sont correctement réalisées constitue également l'une des causes importantes de cet échec.

Ces constats ont naturellement conduit à la mise en oeuvre de systèmes de surveillance dont l'objectif est d'être capables, à tout instant, de fournir l'état de fonctionnement des différents organes constitutifs d'un système technologique quelconque. Cette approche, qui considère les systèmes de production non seulement sous l'angle de leur commande mais également sous leurs aspects sûreté de fonctionnement, maintenance, gestion technique, diagnostic de fonctionnement, est couramment appelée *Automatisation Intégrée*.

De manière schématique, on peut dire que cette automatisation intégrée a pour objectif de concevoir et mettre en oeuvre, sur un processus complexe de production, la structure hiérarchisée suivante :

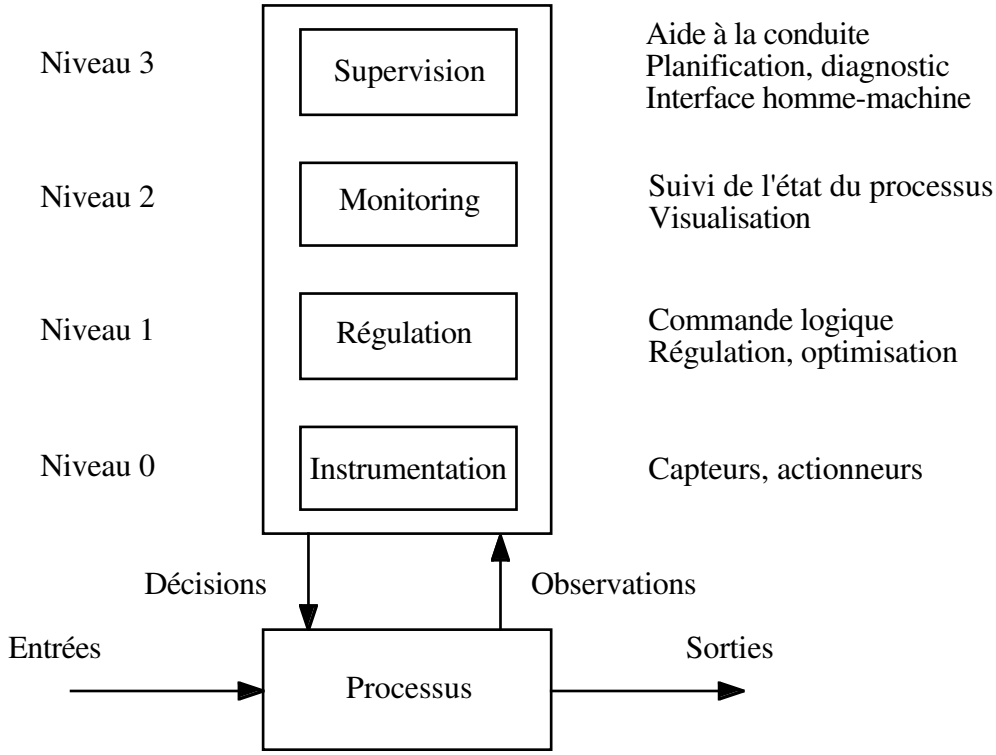

Figure 0.1 : l'Automatisation Intégrée

La mise en place de cette structure doit permettre un accroissement de la fiabilité, de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement du processus.

D'un point de vue technologique, l'introduction de calculateurs numériques performants ainsi que la centralisation des informations prélevées sur un processus ont permis d'implanter des algorithmes de commande sophistiqués. En effet, les méthodes et algorithmes de contrôle-commande, initialement conçus pour satisfaire les besoins des industries de haute technologie (nucléaire, aérospatial, armement, ...), se sont "démocratisés" aidés notamment par la baisse du coût des ordinateurs. Depuis une quinzaine d'années, on rencontre dans des industries plus "classiques" (chimie, sidérurgie, usine minéralurgique) des postes-opérateurs qui sont de véritables salles de commandes vers lesquelles de puissantes centrales de mesure déversent des informations nombreuses et de nature très variée. Celles-ci peuvent alors être visualisées sur des terminaux graphiques (synoptiques) ou archivées sur des supports magnétiques pour consultation ultérieure.

L'introduction de tels systèmes de commande a considérablement modifié le fonctionnement et la conduite des systèmes technologiques. Des usines entières ou, au moins, des ateliers complets sont contrôlés depuis un poste-opérateur central. Cependant, le grand nombre de variables acquises ou contrôlées (signaux), dû à l'augmentation du degré d'automatisation, ne peut être visualisé simultanément et de manière persistante. Ainsi, dans les Systèmes Numérique de Contrôle-Commande (S.N.C.C.) modernes, le nombre de signaux présentés à l'opérateur est réduit et, souvent, seuls ceux relatifs à l'état instantané du processus sont visualisés. Les opérateurs sont alors capables de conduire le processus sans avoir une vision simultanée de tous les signaux mais en utilisant un ensemble structuré hiérarchique de synoptiques.

La visualisation d'informations "bas-niveau" est négligée car la plupart des signaux sont comparés, en permanence, à des valeurs limites fixes ; ces tests portant soit sur la valeur absolue du signal, soit sur son gradient (vitesse de variation). Si l'amplitude d'un signal n'est pas comprise dans l'intervalle admissible, par exemple, lors d'une phase de démarrage ou d'arrêt du processus ou lors d'une panne de celui-ci, un message d'erreur est affiché sur un écran et/ou imprimé. Le scénario le plus fréquent se déroule alors de la manière suivante : l'opérateur choisit la vue, le synoptique, visualisant l'information détaillée concernant ce signal, il décide ensuite, après analyse, de l'action à entreprendre : c'est le *monitoring*.

Malgré les progrès des méthodes de représentation des données, les méthodes de conduite restent donc essentiellement basées, comme nous venons de le décrire, sur l'analyse de signaux qui sont majoritairement directement des variables mesurées.

La demande croissante de fiabilité et de sûreté de fonctionnement mais également celle d'un fonctionnement moins onéreux et plus écologique, ces deux derniers points étant fortement liés aux deux premiers, justifie donc l'intérêt grandissant porté à des méthodes plus avancées de conduite incluant, évidemment, des techniques performantes de détection de défauts. Lorsqu'un défaut apparaît, il doit être détecté le plus rapidement possible, même dans le cas où tous les signaux observés restent dans leurs limites admissibles. Il doit ensuite être localisé et sa cause identifiée. Ainsi, les classiques étapes d'observation et de suivi doivent-elle être assistée par une étape plus "intelligente". Cette étape, souvent appelée *supervision* doit utiliser l'ensemble des informations disponibles au moyen d'un modèle explicite ou implicite (reconnaissance de formes). Cependant, si une partie importante concernant le pré-traitement, la mise en forme des informations de façon à les rendre plus explicites ou l'extraction d'informations pertinentes peut être automatisée, il ne

semble pas possible, ni peut-être, d'ailleurs, souhaitable d'éliminer l'homme dans sa fonction d'interprétation de ces informations et de décision induite par ces analyses.

Comme le dit très bien Patrick Millot dans l'introduction de son livre "Supervision des procédés automatisés et ergonomie", (Millot, 1988) : "*Les calculateurs de conduite assurent aux outils de production une autonomie très importante en situation de fonctionnement normal, mais leur manque d'adaptativité dans les situations imprévues rend indispensable la présence de l'homme pour assurer les tâches de surveillance et les tâches de maintenance curative telles que le diagnostic et la reprise des dysfonctionnements, qui sont actuellement très difficiles à automatiser. En ce sens, l'automaticien assigne une fonction sécuritaire à l'opérateur, pour augmenter la fiabilité et la disponibilité des procédés*". Sans doute faut-il nuancer ces propos car des progrès significatifs ont été réalisés depuis cette date et si la maintenance *curative* reste du ressort de l'intervention humaine, il n'en est pas de même de certaines tâches de surveillance et de diagnostic (Philippe, 1992). De même, certaines tâches de maintenance, sous réserve évidemment qu'elles soient *préventives*, car devant être planifiées, peuvent également être automatisées. Patrick Millot lui-même complète son point de vue en disant : "... *pour limiter les risques d'intervention erronée de l'opérateur, les automaticiens visent actuellement à assister celui-ci dans les tâches décisionnelles, en intégrant aux systèmes de surveillance des procédés, des outils logiciels d'aide au diagnostic et à la reprise des défauts*".

On entrevoit clairement le problème de la confrontation homme-calculateur, essentiellement au niveau de la décision. Il faut donc définir une politique de répartition des tâches de décision entre l'homme et la machine qui tire un profit maximum des qualités (voire des défauts !) de l'un et de l'autre des acteurs induisant le concept de système homme-machine.

Ce problème d'optimisation est très délicat. En effet, le comportement mental de l'homme est extrêmement complexe à modéliser. De plus, les deux systèmes à coordonner, calculateur et opérateur, utilisent des logiques de décision différentes, l'une, artificielle, essentiellement déductive, l'autre, humaine, plutôt inductive voire intuitive et sensible à des paramètres difficilement identifiables (Millot, 1988). Nous ne nous intéresserons pas à cet aspect qui dépasse largement le propos de ce mémoire mais il est très important d'avoir à l'esprit ces notions et ces problèmes lors du développement de nouvelles méthodes.

Avant de poursuivre, il convient peut être de situer clairement le contexte de cette étude et plus particulièrement de définir les "objets" sur lesquels elle porte. Le mot

“automatisation” sera considéré ici au sens restrictif de “automatisation des processus continus” concernant, par exemple, les processus de production d'énergie (centres de production thermique ou nucléaires, ...), de matières premières (papeteries, cimenteries, usines pétrochimiques ou minérallurgiques, ...) ou celle de processus de transformation (sidérurgie, ...). Le vocable le plus générique pour désigner les “objets” manipulés sera donc “système technologique” bien que celui-ci puisse également désigner des systèmes manufacturier de production. L’expression “système automatisé de production” ou S.A.P., chère à la communauté automaticienne, sera également utilisée avec les mêmes restrictions que précédemment. Plus simplement, on utilisera les expressions “installation” ou “processus”.

En fait, comme le mentionne Philippe Declerck (Declerck, 1991), les systèmes automatisés de production sont caractérisés par une complexité de plus en plus importante : capteurs et actionneurs nombreux, géographiquement répartis, modes de fonctionnement multiples, interaction importante entre les opérateurs et le processus. Leur complexité les rend vulnérables aux défaillances qui sont à l'origine de coûts importants en termes de sécurité (risque d'accidents, de pollutions, ...) et en termes de disponibilité (diminution de la productivité, non qualité, ...).

Cette vulnérabilité justifie l'introduction, dans leur système de commande, de modules de surveillance intermédiaire entre le processus et son instrumentation (producteurs d'informations) et les différents utilisateurs (consommateurs d'informations) : il s'agit alors de traiter les données relevées sur le système pour détecter et diagnostiquer ses défaillances.

Rolf Isermann (Isermann, 1984) décrit très finement l’architecture d’un système de supervision et les interactions au sein d’un tel système (figure 0.2). La présentation qui suit s’inspire largement de ses travaux. En fait, l’objet de la supervision est de signaler les modes de fonctionnement anormaux (non désirés ou interdits) et prendre ou d’aider à prendre les actions appropriées de façon à éviter une dégradation des performances du processus ou une dégradation du processus lui-même pouvant conduire à un accident mettant éventuellement en cause des vies humaines. Un défaut est généralement perçu comme une déviation dans les caractéristiques attendues du processus lui-même, des capteurs, des actionneurs ou de tout autre équipement constitutif du système. Si ces déviations influencent les variables mesurées, elles doivent pouvoir être détectées à l’aide de procédures d’évaluation de signal adéquates. Ces fonctions sont appelées, globalement, *monitoring* dans le cas où les variables mesurées sont simplement comparées à certains

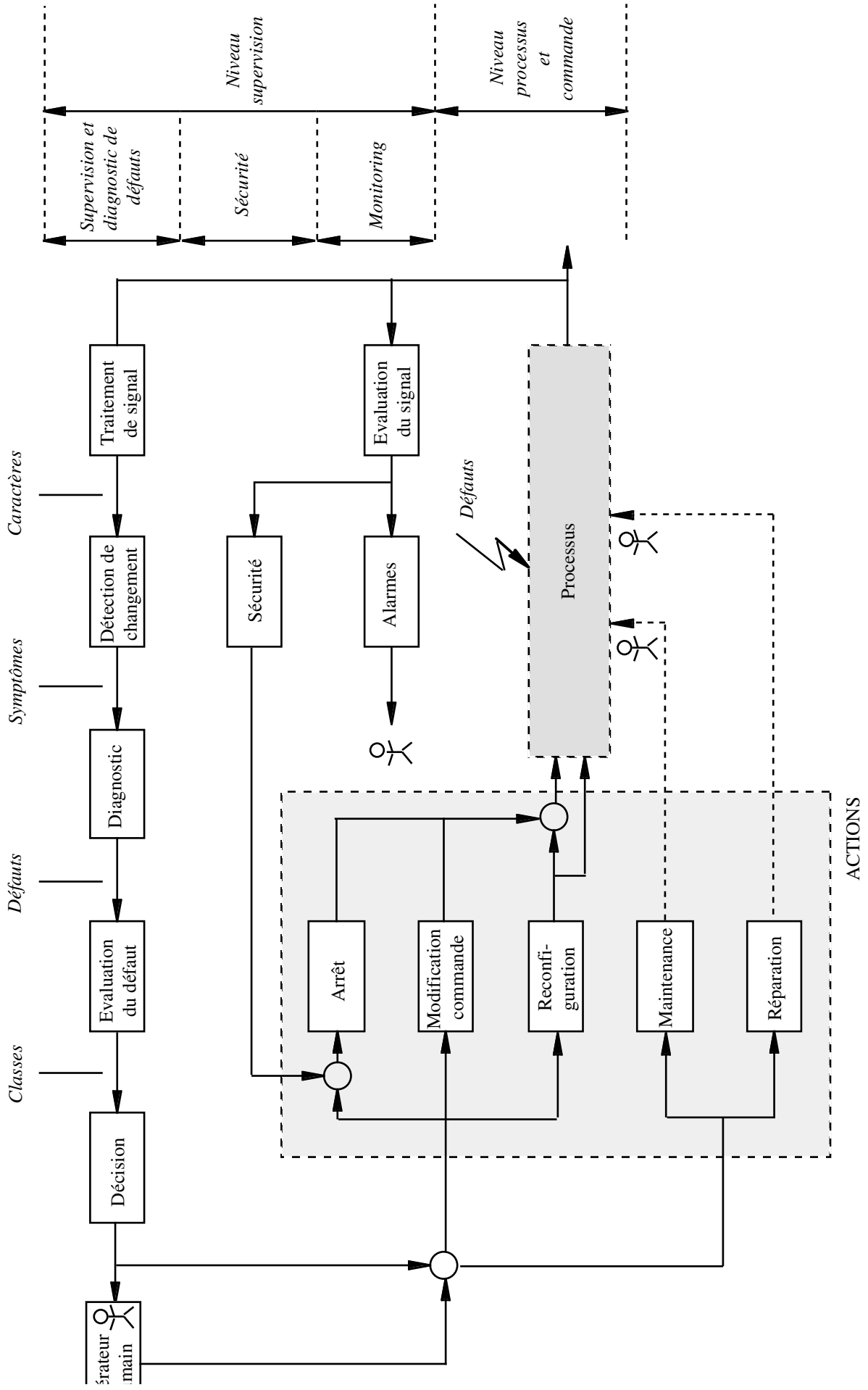

Figure 0.2 : schéma des fonctions de supervision et des actions résultantes
(adapté de Isermann R., 1984)

seuils limites (comparaison de la mesure elle-même ou de sa vitesse d'évolution) et des alarmes sont déclenchées si les limites sont dépassées. L'opérateur, à partir de ces alarmes, met en oeuvre les actions appropriées pour ramener la ou les variables incriminées dans leurs plages de fonctionnement normales. Dans le cas où la violation de ces limites entraîne le système dans un état présentant un danger (pour lui même ou pour son environnement), une action appropriée peut être effectuée automatiquement (garantie de la sécurité).

Ces deux dernières fonctions, *monitoring* et sécurité peuvent s'appliquer soit sur les signaux acquis directement sur l'installation, soit sur le résultat de traitements élémentaires portant sur ces signaux, par exemple, le spectre fréquentiel de ceux-ci.

Comme nous l'avons déjà mentionné dans l'introduction générale, cette technique, très répandue dans l'industrie, donne souvent des résultats satisfaisants. Cependant, les dérives, par exemple, ne sont détectées que lorsqu'elle deviennent importantes et si celles-ci sont lentes, très longtemps après leur apparition. C'est l'une des raisons pour lesquelles même – ou peut être surtout – pour des processus très bien instrumentés, les opérateurs sont toujours utilisés pour la tâche de supervision. En effet, ces opérateurs utilisent leurs propres "capteurs", enregistrements (expérience) et surtout raisonnements pour diagnostiquer – au sens trouver la cause – une modification du comportement du système.

Pour améliorer et automatiser la supervision des systèmes, une première étape peut donc consister à ajouter plus de capteurs de manière à obtenir une image plus précise du système que l'on surveille et, une seconde, a essayer d'introduire l'expérience et la connaissance des opérateurs dans les calculateurs. Nous verrons cependant, au cours du troisième chapitre, que l'augmentation du nombre de capteurs (induisant également celle des transmetteurs et des connections) augmente, de fait, le coût et n'améliore pas nécessairement la fiabilité globale.

Ainsi, beaucoup de défauts ne peuvent être détectés par la seule analyse individuelle des différents signaux acquis sur l'installation. Au cours des vingt dernières années, les efforts de la recherche ont montré que les changements de mode de fonctionnement des processus peuvent cependant être détectés précocement en utilisant des modèles liant les différentes variables mesurées. Ainsi, des quantités non-mesurables comme des variables d'état ou des paramètres du processus peuvent être estimés. A l'aide de cette connaissance améliorée, la supervision des processus (incluant le diagnostic des défauts) devient réalisable.

Dans ce contexte, le traitement adéquat des signaux fournit des caractères sous la forme de mesures directes ou d'estimation d'états ou de paramètres. Par comparaison à des

valeurs de référence (valeurs normales), les changements sont détectés et traduits en terme de symptômes ou d'événements (le mot symptôme est utilisé par analogie au domaine médical). Une procédure numérique ou le recours à une base de connaissance permet ensuite de localiser et de déterminer éventuellement la cause du défaut.

L'étape suivante concerne l'évaluation de ce défaut pour savoir comment il affecte le processus. Les défauts sont alors répartis en classes selon leur incidence. Cette classification peut être réalisée, par exemple, à l'aide d'un arbre des causes. A partir de cette analyse, les actions appropriées peuvent alors être entreprises. Si le défaut est "tolérable", le système peut continuer à fonctionner. Le défaut peut également être conditionnellement tolérable, dans ce cas une modification de loi de commande, la reconfiguration d'une partie du système ou une maintenance doivent être effectuées. Si le défaut est inacceptable, on procède à un arrêt immédiat et à une opération de réparation.

La figure 0.2 montre clairement une chaîne, classique en automatique, de rétro-action sur le processus : on peut la qualifier de boucle de supervision. La structure de supervision ainsi décrite permet d'améliorer l'automatisation des processus.

Les méthodes de surveillance et de diagnostic se répartissent en deux grandes classes selon que l'on dispose ou non d'un modèle du processus à surveiller. Dans le premier cas, on utilise les redondances d'informations et la connaissance fournie par le modèle pour caractériser le mode fonctionnement ou l'état du système, puis décider s'il est normal ou anormal. Dans le deuxième cas, c'est l'analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son état. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de formes ou à l'intelligence artificielle. Comme l'indique S. Gentil (1996), contrairement aux techniques traditionnellement utilisées en automatique où l'on aborde les problèmes numériquement en utilisant essentiellement les propriétés des équations différentielles (caractérisant le modèle), en intelligence artificielle, on travaille essentiellement en symbolique. Les problèmes considérés sont combinatoires et on utilise la logique ; on cherche à représenter les connaissances de sens commun, à modéliser la façon dont un individu raisonne. Dans le contexte de la supervision globale, les données traitées sont de nature extrêmement variées, imprécises (bruit de mesure), incomplètes (pannes de capteurs), non-homogènes (logiques, analogiques, qualitatives), fonction du contexte (le dépassement de seuil, significatif d'une alarme en régime permanent, est parfaitement normal lors d'une grande transition d'un point de fonctionnement à un autre) et temporelles. Toute cette quantité d'informations diverses et la complexité des relations entre variables font douter de la validité des modèles numériques, surtout en cas de panne. On peut encore remarquer que les tâches de

diagnostic humain reposent sur quantité d'heuristiques difficiles à formaliser dans un modèle mathématique, la corrélation entre des variables très différentes, des observations qualitatives (couleur, bruit) ou encore des intuitions, liées en fait à des statistiques (tel appareil pose plus de problèmes que tel autre) difficilement quantifiables mais pourtant efficaces. L'intelligence artificielle devrait donc apporter des solutions intéressantes aux problèmes de supervision, à condition surtout de ne pas être vue comme un substitut aux méthodes traditionnelles, mais comme un outil de plus dans la panoplie de l'ingénieur chargé de résoudre un problème concret.

2. Concept de base : notion de redondance

La présentation qui suit s'inspire largement de l'ouvrage de Brunet *et al*. (1990). L'idée première, pour s'assurer de la validité d'une mesure, est de doubler (système duplex), tripler (système triplex), ..., multiplier les chaînes de mesure. Cette redondance, dite matérielle, permet une détection voire une localisation des capteurs défaillants. La fiabilité et la simplicité de la méthode ont, pour contrepartie, un surcoût de l'installation et une diminution du temps moyen de bon fonctionnement.

La *redondance matérielle* double (figure 0.3) ne permet que la détection d'une panne simple.

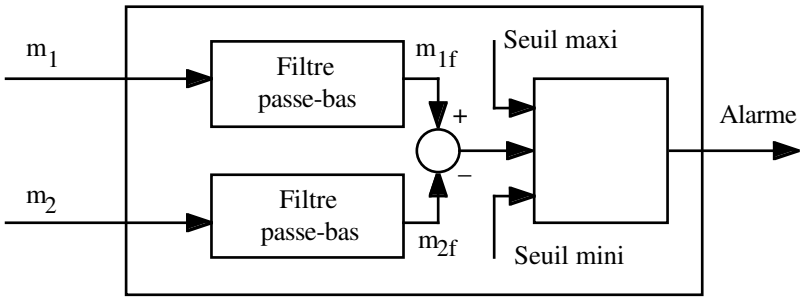

Figure 0.3 : redondance matérielle double

Si m_1 et m_2 sont les mesures issues de deux capteurs identiques soumis au même mesurande, m_{1f} et m_{2f} ces mêmes valeurs filtrées, le résidu $m_{1f} - m_{2f}$ est comparé à un seuil fonction des tolérances et des caractéristiques statistiques des bruits de mesure. Cette méthode détecte une panne de capteur mais ne localise pas le capteur en panne.

Les systèmes triplex (figure 0.4) ou plus, permettent la détection et la localisation de la panne capteur en utilisant, en cascade, un détecteur et un voteur.

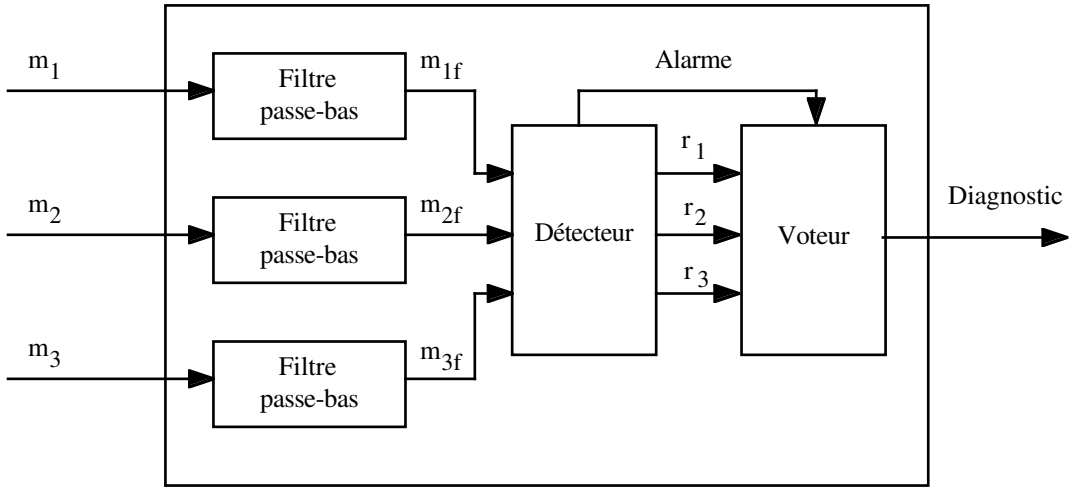

Figure 0.4 : redondance matérielle triple

Le détecteur calcule trois résidus r_1, r_2 et r_3 :

$$r_1 = m_{1f} - m_{2f} \qquad r_2 = m_{1f} - m_{3f} \qquad r_3 = m_{2f} - m_{3f}$$

Le rôle du voteur est de déterminer le capteur en panne. Cette décision peut être prise en prenant en compte les caractéristiques statistiques précédentes et en analysant la dispersion des trois mesures.

L'approche redondance matérielle est très efficace bien qu'elle ne couvre pas les pannes de mode commun : panne d'alimentation électrique, panne de masse etc... Le coût et l'encombrement ainsi qu'un champ d'application strictement limité aux pannes capteurs constituent les inconvénients majeurs de cette méthode.

Une autre solution consiste à utiliser les relations analytiques qui existent entre les mesures de grandeurs dépendantes qu'elles soient ou non de même nature. Cette méthode, appelée *redondance analytique*, ne peut être mise en oeuvre que si l'on dispose d'un modèle statique ou dynamique, linéaire ou non linéaire, déterministe ou stochastique du système ou du sous-système reliant les entrées et les sorties mesurées. La technique de redondance analytique permet une exploitation optimale de toutes les informations acquises dans le cadre d'une configuration d'instrumentation donnée. Elle vient en complément de la redondance matérielle et peut permettre d'en réduire le degré de redondance.

La redondance analytique consiste à utiliser des informations supplémentaires issues de modèles générant des grandeurs homogènes à celles provenant de capteurs. Elle exploite la redondance informationnelle contenue implicitement dans un ensemble de mesures. L'utilisation des techniques de redondance analytique repose sur la disponibilité d'un modèle de connaissance ou de représentation ; elle augmente fortement l'ordre de la redondance et a pour conséquences d'augmenter la fiabilité et la sûreté d'un système de détection, de remplacer un capteur matériel par un “capteur mathématique” ou “capteur informationnel” et de permettre l'implantation d'un voteur pour un système de redondance matérielle double.

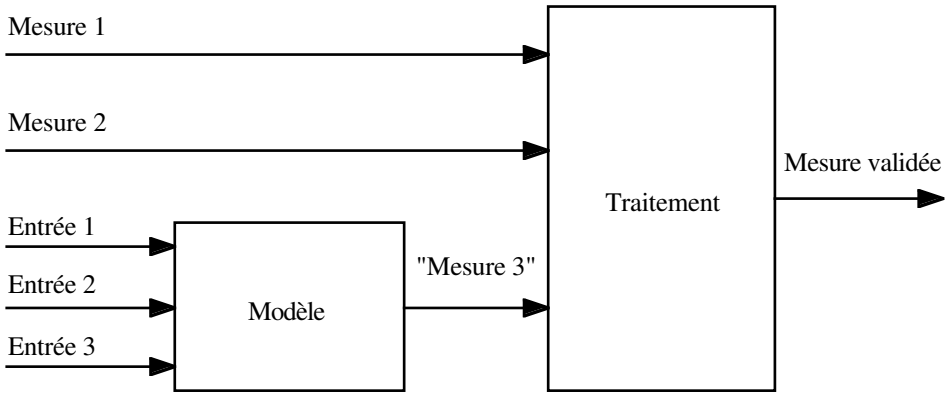

Figure 0.5 : redondance matérielle et analytique

La redondance analytique dont l'utilisation permet la détection et la reconnaissance de défauts de fonctionnement de façon à effectuer des actions correctives appropriées, repose sur des relations de cause à effet, statiques ou dynamiques, qui existent entre les entrées et les sorties observées d'un système. Son champ d'application ne se limite donc pas aux pannes de capteurs mais s'étend aux pannes des actionneurs ou à celles du procédé lui-même.

Les deux types de redondance sont complémentaires. Pour une analyse comparée des avantages, inconvénients et performances de leurs utilisations, le lecteur pourra consulter la thèse de Richard Dorr (Dorr, 1996).

3. La détection de défauts basée sur l’utilisation de modèles

Comme nous l’avons mentionné précédemment, la demande d’une automatisation améliorant les performances de l’outil de production et celle d’une amélioration de la

sûreté de fonctionnement ont provoqué le développement de méthodes de détection de défauts. Celles-ci sont basées sur l'utilisation de la *redondance analytique* existant entre différentes variables mesurées en termes de relations statiques ou dynamiques. Cette approche repose donc sur l'utilisation de modèles. Les différentes approches de la détection de défauts basée sur l'utilisation de modèles peuvent être résumées à quelques méthodes génériques parmi lesquelles on recense l'approche observateurs ou, plus largement, reconstructeurs d'état ou de sortie − observateurs de Luenberger ou filtres de Kalman − (Beard, 1971 ; Mehra et Peshon, 1971 ; Jones, 1973 ; Clark *et al.*, 1975 ; Massoumnia, 1986 ; Basseville, 1988 ; White et Speyer, 1989 ; Olin et Rizzoni, 1991 ; Frank, 1991, 1992 ; Frank et Ding, 1993), l'approche espace de parité (Mironovskii, 1980 ; Chow et Willsky, 1984 ; Gertler et Singer, 1985 ; Gertler, 1991, Gertler et Kunwer, 1993, Gertler, 1995 ; Staroswiecki et al., 1993), l'approche estimation paramétrique (Isermann, 1984 ; Isermann et Freyermuth, 1991 ; Sprösser, 1992 ; Sprösser *et al.*, 1994 ; Höfling et Pfeufer, 1994) ou l'utilisation de systèmes experts (Fink et Lusth, 1987 ; Tzafestas, 1989 ; Zhang, 1991 ; Penalva, 1993 ; Chatain, 1993). Selon la méthode, différents types de modèles sont utilisés. Par exemple, pour les approches utilisant l'estimation d'état ou l'estimation paramétrique, on utilisera des modèles analytiques alors que pour l'approche systèmes experts, on recourra à des modèles de type base de connaissances. Le modèle servant directement de référence pour la détection de défaillance, la qualité du résultat dépend directement de la qualité des modèles. La mise en oeuvre de ces méthodes nécessite donc une *modélisation précise*. Nous verrons ultérieurement que de nombreux travaux ont été menés pour assouplir cette contrainte.

La détection de défaut basée sur l'utilisation de modèles peut être divisée en deux étapes principale : la génération de résidus et la prise de décision. Lors de la première étape, les signaux d'entrée et de sortie du système sont utilisés pour générer un *résidu*, c'est-à-dire un signal mettant en évidence la présence d'un défaut. En général, en régime de fonctionnement normal, ce signal est statistiquement nul et s'écarte notablement de zéro en présence de défauts. La génération de résidus est propre à la méthode utilisée. Durant la seconde étape, les résidus sont analysés pour décider s'il y a ou non présence de défaut, sur quel composant du système il est intervenu (opération souvent appelée localisation) et dans certains cas, déterminer la nature du défaut et sa cause (identification). La décision peut s'effectuer à l'aide d'un simple test de dépassement de seuil sur les valeurs instantanées ou des moyennes mobiles des résidus ou faire appel à la théorie de la décision statistique (Basseville et Nikiforov, 1993). L'évaluation des résidus peut également être non booléenne ; elle consiste alors à attribuer un "facteur de croyance" à un ensemble d'hypothèses de défaillances (Kramer, 1987). La combinaison des informations peut alors être effectuée à l'aide de la théorie de l'évidence (Shafer, 1976) ou en utilisant des

fonctions floues. Cette décision peut également faire appel à la reconnaissance de formes (Dubuisson, 1990 ; Zwingelstein, 1995). D'un point de vue pratique, la logique de décision à seuils joue un rôle important car la plupart des méthodes citées se ramène, à terme, à un seuillage. Si le seuil choisi est constant, les entrées inconnues qui excitent le système perturbent la décision. Si le seuil est choisi trop petit, on observe beaucoup de fausse alarmes et s'il est trop grand, les défauts de faible amplitude ne sont pas détectés. Il est donc intéressant d'utiliser des seuils adaptatifs qui évoluent en fonction du point de fonctionnement du processus surveillé. Un certain nombre de travaux ont été développés en ce sens (Emami-Naeini, 1988 ; Clark, 1989 ; Ding et Frank, 1991 ; Ragot *et al.*, 1997).

La figure 0.6 présente l'architecture générale de la détection de défauts basée sur l'utilisation de modèles.

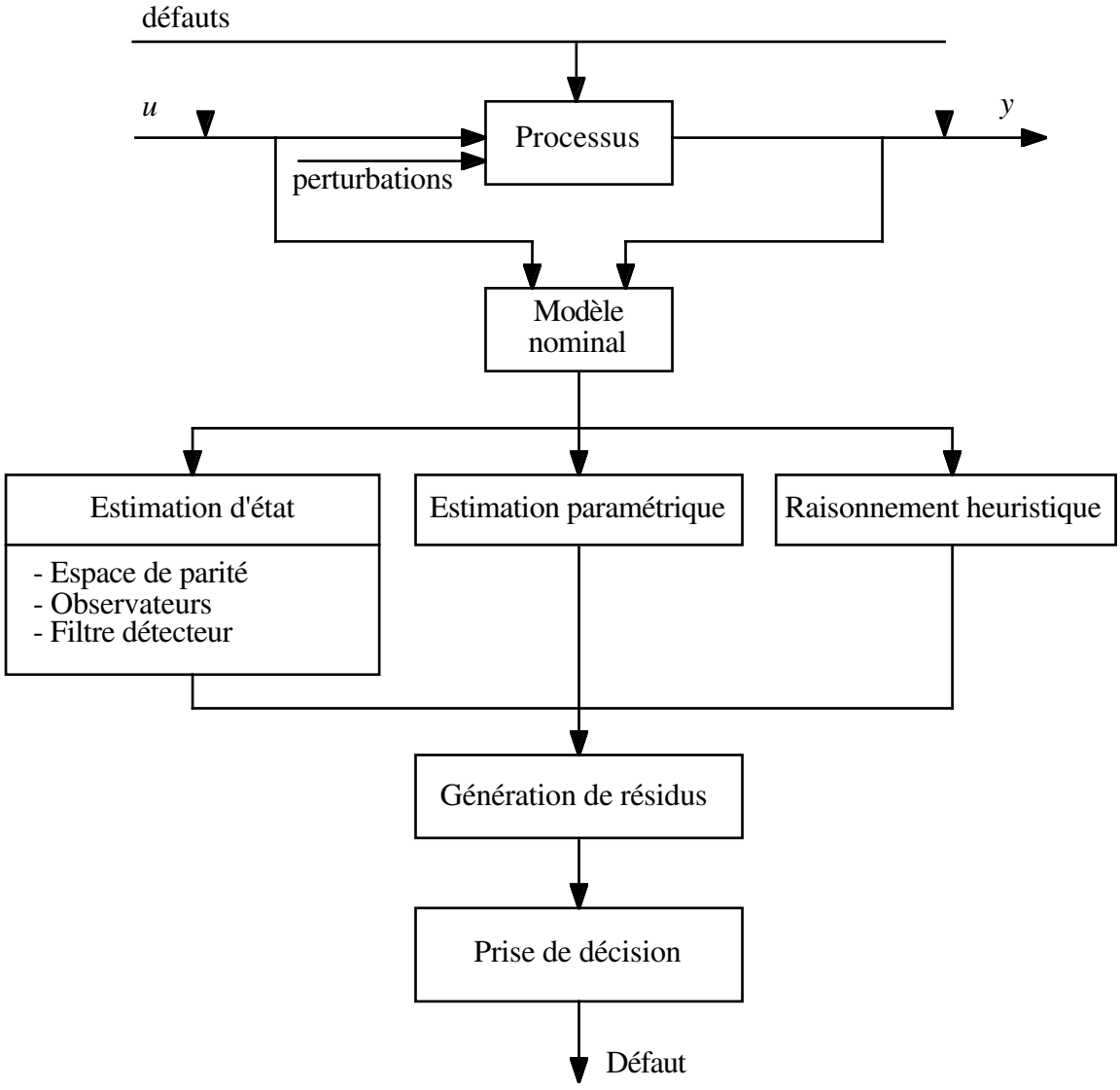

Figure 0.6 : architecture générale de la détection de défaut à base de modèles (d'après Isermann, 1984.)

De nombreuses méthodes permettant la génération de résidus en utilisant des modèles analytiques ont été proposées. Elles peuvent cependant être classées en trois catégories selon les notions suivantes :

a) Reconstructeurs d'état (Frank, 1987 ; Patton *et al*., 1989 ; Magni et Mouyon, 1991 ; Marquez et Diduch, 1992 ; Viswanadham *et al*., 1987 ; Ding et Frank, 1990) qui font appel aux :

- Observateurs de rang plein ou réduit
- Observateurs généralisés
- Observateurs à entrées inconnues
- Filtres détecteurs
- Filtres de Kalman
- Factorisations de matrices de transfert
- Estimateurs sur horizon glissant

b) Espace de parité (Chow et Willsky, 1984 ; Massoumnia *et al.,* 1988 ; Gertler *et al*., 1990, 1991, 1993 ; Staroswiecki *et al*., 1993).

c) Estimation paramétrique (Isermann, 1984, 1991).

Bien que les approches soient différentes, de très nombreuses équivalences entre les différentes méthodes ont pu être mises en évidence. On consultera avec profit les papiers de Gertler (1991, 1995), Patton et Chen (1991), Delmaire *et al.* (1994), Magni (1995), Nuninger *et al.* (1996) et Alcorta-Garcia et Frank, (1996). Considérons par exemple les approches basées sur l'espace de parité et celles utilisant des observateurs. Un système dynamique linéaire excité par des entrées $u(t)$ et des défauts $f(t)$, peut être décrit, en ne tenant pas compte de bruits additifs éventuels et en utilisant la transformée de Laplace, par la relation entrée-sortie suivante :

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_f(s)f(s) \tag{0.1}$$

La structure générale de tous les générateurs déterministes de résidus peut alors être schématisée par la figure 0.7 :

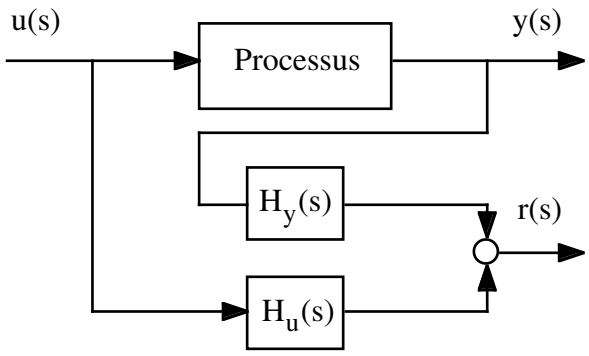

Figure 0.7 : structure générale des générateurs de résidus

On peut donc exprimer le résidu par :

$$r(s) = H_u(s)u(s) + H_y(s)y(s) \tag{0.2a}$$

ou encore, en substituant dans cette relation $y(s)$ par son expression (0.1) :

$$r(s) = \Big(H_u(s) + H_y(s)G_u(s)\Big)u(s) + H_y(s)G_f(s)f(s) \tag{0.2b}$$

Pour que le résidu soit effectivement nul lorsqu'il n'y a pas de défauts, les matrices de transfert $H_u(s)$ et $H_y(s)$ doivent satisfaire la condition :

$$H_u(s) + H_y(s)G_u(s) = 0 \tag{0.3}$$

Il est important de noter que l'expression (0.2) est la représentation générale de tous les générateurs linéaires de résidus. La conception d'un générateur revient donc à choisir les matrices $H_u(s)$ et $H_y(s)$ en satisfaisant la contrainte (0.3). Notons également que la relation (0.3) n'explicite pas la fonction de transfert du générateur de résidus mais donne simplement une contrainte sur sa structure. Nous reviendrons sur ce point au paragraphe 3.3. du chapitre 2.

4. Organisation du mémoire

Le travail présenté ici s'inscrit donc dans le contexte de la supervision et peut être plus particulièrement celui de la surveillance de fonctionnement des processus (le terme supervision ayant peut être une connotation trop "informatique industrielle", c'est-à-dire liée principalement à la mise en œuvre et non aux méthodes). Il concerne, d'une part, la

détection de défauts des processus très souvent, bien qu'improprement à mon sens, appelée diagnostic de défauts ou même simplement diagnostic des systèmes[1] et, d'autre part, propose une contribution à la conception des systèmes. Comme le mentionne Michel Vergé (Vergé, 1991), ces disciplines, qui sont encore récentes, ne possèdent pas encore un vocabulaire bien stabilisé. Après avoir donné la définition étymologique du mot diagnostic qui fait seulement référence au domaine médical, Bernard Dubuisson (Dubuisson, 1990), comme l'auteur précédent, après avoir classé les modes de fonctionnement d'un processus en mode de fonctionnement normal et mode de fonctionnement anormal, donne une définition du diagnostic en trois phases. La première concerne la détection du mode de fonctionnement, la seconde, la qualification de ce mode et enfin, la dernière, la décision à partir de la reconnaissance de ce mode. Cette définition, bien qu'assez juste me semble cependant trop réductrice et trop floue pour bien caractériser tout ce que doit recouvrir *le diagnostic* d'un processus.

Comme le titre de ce mémoire l'indique clairement, nous nous sommes plus particulièrement focalisé sur les méthodes à base de modèles. Cependant, à notre sens, une "bonne" méthode de diagnostic doit sans doute utiliser conjointement et judicieusement l'approche basée sur l'utilisation de modèles et l'approche "sans modèle" (reconnaissance de forme, intelligence artificielle, systèmes experts).

Hormis ce chapitre inroductif qui a permis de présenter le problème du diagnostic à base de modèles des systèmes technologiques et de situer la thématique du travail présenté, le mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier brosse un panorama des méthodes permettant de générer des relations de redondance analytique. Celles-ci sont globalement désignées par "méthodes de l'espace de parité" en ce sens qu'on se place dans un espace dans lequel toutes les grandeurs sont connues et donc que l'on peut vérifier leur cohérence par rapport à des modèles.

Le second chapitre est consacré aux méthodes de génération de résidus à base de reconstructeurs d'état ; observateurs "classiques", observateurs à entrées inconnues, observateurs non-linéaires, ... Il présente également des techniques de reconstruction d'état issues des méthodes de reconciliation de données utilisées pour les systèmes en régime de fonctionnement statique.

---

[1] Les anglo-saxons utilisent l'expression *model-based fault diagnosis* pour désigner, au sein de la supervision des systèmes, tout ce qui en rapport avec les défauts (actionneurs, processus, capteurs) et l'acronyme FDI - Fault Detection and Isolation - pour désigner ce que l'on nomme simplement en français détection de défaut.

Le troisième chapitre concerne le problème de conception d'architecture d'instrumentation. Les résultats présentés ne concernent que les systèmes linéaires en régime statique. L'introduction de la notion de degré de redondance d'une variable, permet l'écriture d'un cahier des charges simplifié incluant le niveau de redondance souhaité, les spécifications sur la détectabilité-isolabilité des défauts de capteurs ainsi qu'une éventuelle prise en compte de la fiabilité globale de l'architecture.

5. Références bibliographiques

Alcorta-Garcia, E. et Frank, P.M. (1996). On the relationship between observer and parameter identification based approaches to fault detection. Proc. of the IFAC World Congress, San Francisco, USA.

Basseville, M. (1988). Detecting changes in signals and systems - A survey. *Automatica*, vol. 24, n° 3, p. 309-326.

Basseville, M. et Nikiforov, I. (1993). *Detection of abrupt changes - Theory and applications*. Prentice Hall Information and System Sciences Serie (T. Kailath, ed.), Englewood Cliffs, N.J.

Beard, R.V. (1971). Failure accomodation in linear systems through self-reorganisation. Ph.D. Thesis, Dept. of Aero. and Astro., MIT, Cambridge, MA, USA.

Brunet, J., Jaume, D., Labarrère, M., Rault, A. et Vergé, M. (1990). *Détection et diagnostic de pannes*. Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Hermès, Paris.

Chatain, J.N. (1993). *Diagnostic par systèmes experts*. Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Hermès, Paris.

Chow, E.Y. et Willsky, A.S. (1984). Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-29, n° 7, p. 603-614.

Clark, R.N., Fosth, D.C. et Walton, V.M. (1975). Detection intrument malfunctions in control systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 11, p. 465-473.

Clark, R.N. (1989). State estimation schemes for instrument fault detection. In *Fault diagnosis in dynamic systems : Theory and application.*, Patton, R.J., Frank, P.M., Clark, R.N. eds, Prentice Hall.

Declerck, P. (1991). Analyse structurale et fonctionnelle des grands systèmes. Application à une centrale PWR 900 MW. Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres-Artois, 20 décembre 1991.

Delmaire, G.,Cassar, J.P., Staroswiecki, M. (1994). Comparison of identification and parity space approaches for failure detection in single input single output sytems. Proc. of the 3rd IEEE Conference on Control Applications, Glasgow, U.K, August 24-26.

Ding, X. et Frank, P.M. (1990). Fault detection via factorization approach. *Systems and Control Letters*, vol. 14, p. 431-436.

Ding, X. et Frank, P.M. (1991). Frequency domain approach and threshold selector for robust model-based fault detection and isolation. Proc. of the IFAC/IMACS Symposium SAFEPROCESS '91, September 10-13, Baden-Baden, Germany.

Dorr, R. (1995). Détection de défauts de capteurs par redondances matérielle et analytique. Application aux centrales nucléaires. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, juillet.

Dubuisson, B. (1990). *Diagnostic et reconnaissance de formes*. Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Hermès, Paris.

Emami-Naeini, A., Akhter, M.M. et Rock, S.M. (1988). Effect of model uncertainty on failure detection. The threshold selector. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-33, n° 12, p. 1106-1115.

Fink, P.K. et Lusth, J.C. (1987). Expert systems and diagnostic expertise in mechanical and electrical domains. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybertetics,* vol. 17.

Frank, P.M. (1987). Fault diagnosis in dynamic systems via state estimation - A survey. In *System Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge-Based Approaches*, S. Tzafestas et al. (Eds.), D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, vol. 1, p. 35-98.

Frank, P.M. (1991). Enhancement of robustness in observer-based fault detection. *International Journal of Control*, vol. 59, p. 955-981.

Frank, P.M. (1992). Robust model-based fault detection in dynamic systems. Proc. of the IFAC Synposium On-line Fault Detection in the Chemical process Industries, Newark, Delaware, USA.

Frank, P.M. et Ding, X. (1993). Frequency domain approach to minimizing detectable faults in FDI systems. *Applied Mathematics and Computer Sciences*, vol. 3, n° 3, p. 417-443.

Gentil, S. (1996). Intelligence artificielle pour la surveillance des procédés continus. Actes de l'école d'été d'automatique de Grenoble, session 14 "Surveillance des systèmes continus", Tome 1, 2-6 septembre, Grenoble, France.

Gertler, J. et Singer, D. (1985). Augmented models for statistical fault isolation in complex dynamic systems. Proc. of the IEEE-ACC, p. 317-322, Boston, MA, USA.

Gertler, J. et Singer, D. (1990). A new structural framework for parity equation based failure detection and isolation. *Automatica*, vol. 26, n° 2, p. 381-388.

Gertler, J. (1991). Analytical redundancy methods in failure detection and isolation. Proc. of the IFAC/IMACS Symposium SAFEPROCESS '91, September 10-13, Baden-Baden, Germany.

Gertler, J. et Kunwer, M.M. (1993). Optimal residual decoupling for robust fault diagnosis. Proc. of the Conference TOOLDIAG'93, April, 5-8, Toulouse, France.

Gertler, J. (1995). Diagnosing parametric faults: from parameter equation to parity relations. Proc. of the 1995 American Control Conference, Seattle, USA.

Höfling, Th, et Pfeufer, Th. (1994). Detection of additive and multiplicative faults. Parity space vs. parameter estimation. Proc. of the IFAC/IMACS Symposium SAFEPROCESS '94, June 13-16, Helsinki, Finland.

Isermann, R. (1984). Process fault diagnosis based on modelling and estimation methods - A survey, *Automatica*, vol. 20, p. 387-404.

Isermann, R. et Freyermuth, B.(1991). Process fault diagnosis based on process model knowledge - Part I : Principles for fault diagnosis with parameter estimation, *Transactions of the ASME*, vol. 113, p. 620-626.

Jones, H.L. (1973). Failure detection in linear systems. Ph.D. Thesis, Dept. of Aero. and Astro., MIT, Cambridge, MA, USA.

Kramer, M.A. (1987). Malfunction diagnosis using quantitative models with non-boolean reasoning in expert systems. *AIChE Journal*, vol. 33, n° 1, p. 130-140.

Magni, J.F. et Mouyon, P. (1991). A generalized approach to observers for fault diagnosis. Proc. of the 30th IEEE-CDC, vol. 3, p. 2236-2241, December 11-13, Brighton, UK.

Magni, J.F. (1995). On continuous time parameter identification by using observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-40, n° 10, p. 1789-1792.

Marquez, H.J et Diduch, C.P. (1992). Sensitivity of failure detection using generalized observers. *Automatica*, vol. 28, p. 837-840.

Massoumnia, M.A. (1986). A geometric approach to failure detection and identification in linear systems. Ph.D. Thesis, Dept. of Aero. and Astro., MIT, Cambridge, MA, USA.

Massoumnia, M. A. et Vander Velde, W.E. (1988). Generating parity relations for detecting and identifying control system component failures. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 11, n° 1, p. 60-65.

Mehra, R.K et Peshon, I. (1971). An innovations approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems. *Automatica*, vol. 7, p. 637-640..

Millot, P. (1988). *Supervision des procédés automatisés et ergonomie*. Traité des Nouvelles Technologies, série Automatique, Hermès, Paris.

Mironovskii, L.A. (1980). Functional diagnosis of dynamic system - a survey. *Automation Remote Control* (traduit de Avtomatika i Telemekhanika), vol. 41, p. 1122-1143.

Nuninger, W., Kratz, F et Ragot, J. (1996). Observers and redundancy equation generation for system with unknown inputs. Proc. of the IFAC/IMACS multiconference, Computational Engineering in Systems Applications, CESA'96, Lille, France, July 9-12.

Olin, P. et Rizzoni, G. (1991). Design of robust detection filters. Proc. of the 1991 American Control Conference, p. 1522-1527.

Patton, R.J. et Chen, J. (1991). Are-examination of the relationship between parity space and observer-based approaches in fault diagnosis. *Revue Européenne Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement*, vol. 1, n° 2, p. 183-200.

Patton, R.J., Frank, P.M. et Clark, R.N. (1989). *Fault diagnosis in dynamic systems : Theory and application*. Prentice Hall.

Pénalva, J.M., Coudouneau, L., Leyval, L. et Montmain, J. (1993). DIAPASON : a supervision Support System. *IEEE Expert Intelligent Systems and their Applications*, vol. 8, n° 5.

Philippe, D. (1992). Contribution au développement de stratégies de diagnostic. Application à un train de laminage à chaud. Thèse de doctorat de l'Université de Nancy I, 12 novembre 1992.

Ragot, J., Kratz, F. et Maquin, D. (1997). Espace de parité pour les systèmes linéaires incertains. Synthèse, quelques résultats nouveaux et mise en oeuvre. Seizième Colloque GRETSI, Grenoble, France, 15-19 septembre 1997.

Shafer, G. (1976). *A mathematical theory of evidence*. Princeton University Press, Princeton, New-Jersey, USA.

Sprösser, Th. (1992). Contribution à l'étude des méthodes de détection de défauts par redondance analytique. Thèse de l'Université de Haute Alsace, Mulhouse.

Sprösser, Th. et Gissinger, G.L. (1994). Identification based sensor fault detection and localisation. Application to an inverted pendulum. Proc. of the IFAC/IMACS Symposium SAFEPROCESS '94, June 13-16, Helsinki, Finland.

Staroswiecki, M., Cocquempot, V. et Cassar, J.P. (1993). A general approach for multicriteria optimization of structured residuals. Proc. of the Conference TOOLDIAG'93, April, 5-8, Toulouse, France.

Staroswiecki, M., Cassar, J.P. et Cocquempot, V. (1993). Generation of optimal structured residuals in the parity space. Proc. of 12th IFAC World Congress, Sydney, Australia.

Tzafestas, S.G. (1989). *Knowledge-based system diagnosis, supervision and control.* Plenum Press, New-York.

Vergé, M. (1991). Détection et diagnostic de défauts. Applications industrielles. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Nancy I, 3 décembre.

Viswanadham, N. et Srichander, R. (1987). Fault detection using unknown input observers, Control-Theory and Advanced Technology, MITA Press, vol. 3, n° 2, p. 91-101.

White, J.E et Speyer J.L. (1987). Detection filter design : spectral theory and algorithm. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-32, n° 7, p. 593-603.

Zhang, J. (1991). Expert systems in on-line process control and fault diagnosis. PhD thesis, City University, London, 1991.

Zwingelstein, G. (1995). Diagnostic des défailances : théorie et pratique pour les systèmes industriels. Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Hermès, Paris.