DIAGNOSTIC DE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES A PARTIR DE MODELES

DIDIER MAQUIN [1] et JOSE RAGOT[1]

RESUME
Les processus continus de fabrication et de traitement peuvent être en général décomposés en une série de processus élémentaires reliés entre eux par des voies de circulation de matière ou d'énergie. Les mesures effectuées sur ces flux fournissent des informations extrêmement utiles au contrôle du processus et à son diagnostic de fonctionnement. On examine comment interpréter ces informations afin de fournir un diagnostic sur l'état de fonctionnement du processus.

1. INTRODUCTION

La sécurité et la sûreté de fonctionnement sont deux facteurs importants de la conduite d'un processus de fabrication. Celles-ci peuvent être mises en cause lors de l'apparition de défaillances du processus physique lui-même (dégradation, fuites, ...) ou de ses organes de conduite (actionneurs, capteurs, ...). Cependant, il est difficile de dissocier le processus de son environnement de conduite (figure 1) et les perturbations qui affectent le processus complet peuvent avoir des effets difficilement dissociables les uns des autres ; il convient donc d'élaborer des techniques de surveillance capables d'appréhender aussi bien le processus physique que ses organes de conduite. La complexité actuelle des procédures de surveillance et de supervision ainsi que la nécessité d'accomplir ces tâches dans un temps restreint limitent fortement le rôle des opérateurs humains ; ces procédures doivent être rendues automatiques si on veut les rendre performantes. D'un point de vue fonctionnel, la surveillance n'est pas limitée à une simple centralisation et visualisation d'informations mais doit répondre aux objectifs suivants : détecter et localiser les fautes, estimer leurs amplitudes, expliquer leurs causes, décider d'une action compensatrice si une faute est mise en évidence de façon à ce que le processus puisse remplir la mission qui lui a été confiée.

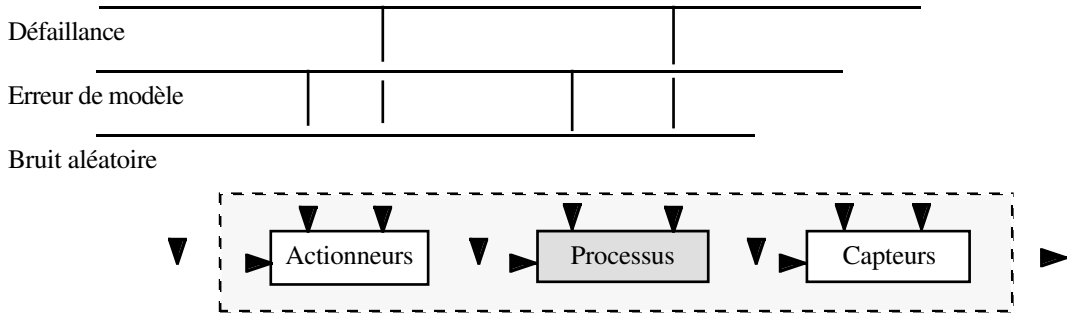

Figure 1 : Processus physique et sources de perturbation

Pour améliorer la sécurité et la sûreté de fonctionnement d'un système, il faut donc essayer de s'affranchir de l'influence de ces fautes. Différentes méthodes peuvent être utilisées de façon conjointe ; elles se classent de la façon suivante : prévention, tolérance, élimination et prévision. Bien souvent, la

[1]Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CNRS UA 821)
BP 40 - Rue du doyen Marcel Roubault - 54 500 Vandoeuvre les Nancy.

surveillance d'un procédé repose sur l'utilisation de modèles de comportement et de redondance d'informations. Cet exposé se limite à l'examen de méthodes de détection de défaillances utilisant la notion de redondance. En accord avec la terminologie classique, le diagnostic de défaillance est constitué de quatre phases essentielles : la détection, l'isolation des défaillances, l'identification des défaillances et la reconfiguration des lois de commande.

La détection concerne la mise en évidence d'événements qui affectent l'évolution du processus. Très généralement, un événement traduit un changement de situation sans préjuger du fait qu'il soit normal (dû à une action délibérée de la part d'un opérateur) ou non (dû à une perturbation extérieure).

L'isolation concerne l'analyse des événements pour distinguer ceux qui sont anormaux et la localisation précise de la défaillance de façon à pouvoir déterminer le composant défaillant du processus.

L'identification consiste à quantifier la défaillance en estimant sa durée et son amplitude. Dans certains cas, l'identification cherche à comprendre l'origine de la défaillance (recherche des causes) et même à prévoir son évolution (problème de pronostic).

Enfin, la reconfiguration concerne la remise en état de la partie défectueuse du système de façon à lui permettre de satisfaire à sa mission. La nature de la reconfiguration est étroitement liée à la gravité des défaillances détectées ; dans les cas mineurs, déréglage de faible amplitude d'un capteur par exemple, on peut se contenter d'une adaptation d'un paramètre de réglage ; par contre, la défaillance d'un organe de commande nécessite en général la modification de la structure de la loi de commande.

2. HISTORIQUE

Plusieurs actions concourent à cerner les problèmes posés par le diagnostic. Parmi celles-ci, citons : la réconciliation des données (Maquin, 1991) et l'équilibrage de bilan de production (Ragot, 1990), la détection et le rejet de valeurs extrêmes (Beckman, 1983), l'estimation d'état (Brunet, 1990), l'estimation de paramètres (Basseville, 1986), la reconnaissance de formes (Dubuisson, 1990), (Mourot, 1993).

Il est très difficile de dater avec précision les premiers travaux dans le domaine du diagnostic. On peut néanmoins penser que les techniques d'analyse de cohérence des données constituent les premières méthodes développées dans ce domaine. A l'origine, ces méthodes étaient limitées à la recherche de valeurs aberrantes (en général les valeurs extrêmes d'une série d'observation) sans chercher à en expliquer clairement les causes. Dans cet esprit, l'ouvrage de Barnett et Lewis (Barnett, 1984) rassemble un grand nombre de techniques pour la détection de valeurs aberrantes. On peut aussi citer les travaux de Linnik (1963) qui a posé le problème de la réconciliation de mesures en s'appuyant sur les méthodes d'estimation d'état. Des applications de ces techniques ont été développées pour résoudre les problèmes d'équilibrage de bilan de production, en particulier pour les processus de transport de matière et d'énergie dans les domaines chimique et pétrochimique (Mah, 1976), minéralurgiques (Ragot, 1990) et électriques. Parallèlement, en traitement de signal, un certain nombre d'outils ont été proposés pour la détection d'événements (Basseville, 1986). Dans la dernière décennie, les processus physiques ont été soumis aux techniques de diagnostic avec comme finalité de détecter et de localiser les défaillances des composants mais aussi d'identifier leur(s) cause(s). Dans le cas de défaillances détectées précocement, l'établissement de stratégies réparatrices (par exemple reconfiguration de lois de commande) est l'aboutissement normal du diagnostic. Ces techniques ont particulièrement été

développées dans le domaine de l'aérospatial (Ostroff, 1984), mais, de façon plus générale, tous les processus à risque technologique sont directement concernés par ce problème.

3. CONCEPTS DE BASE : LA REDONDANCE ET LA GENERATION DE RESIDUS

Afin d'éprouver le fonctionnement des appareils de mesure, les premières stratégies mises en oeuvre utilisèrent le principe de la redondance matérielle. Dans cette approche, le nombre de mesures est supérieur au nombre de variables à mesurer ; cette redondance constitue alors un moyen simple de détecter les capteurs présentant des défaillances et d'exhiber ceux fournissant des données cohérentes. Considérons le système de mesure :

$$y(k) = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{pmatrix} x(k) \qquad (1)$$

qui correspond à une configuration simple où on dispose de cinq mesures (couplées) de trois grandeurs. Le lecteur pourra aisément constater la redondance inhérente à ce système de mesure ; celle-ci peut être mise à profit pour générer deux équations de redondance liant les composantes $y_i(k)$ du vecteur de mesure :

$$-y_1(k) + 2\,y_3(k) - y_4(k) = 0 \qquad (2a)$$

$$-2y_1(k) + 4\,y_3(k) - y_5(k) = 0 \qquad (2b)$$

En l'absence d'erreurs de mesure, les équations (2a) et (2b) sont parfaitement vérifiées. Elles ne le sont pas si une ou plusieurs mesures sont entachées d'erreurs.

De façon plus générale, considérons l'équation de mesure :

$$y(k) = C\,x(k) + e(k) + d(k) \qquad (3)$$

où y(k) est le vecteur de mesure de dimension m, x(k) le vecteur des variables à mesurer de dimension n, d(k) le vecteur des défaillances et e(k) le vecteur des bruits de mesure ; C est la matrice (de dimension m.n) caractérisant le système de mesure. Dans la suite, on considère le cas où le nombre de mesure m est supérieur au nombre de variables n de façon à se placer dans une situation de redondance. On définit le vecteur parité p(k) projection du vecteur des mesures y(k) :

$$p(k) = W\,y(k) \qquad (4)$$

où la matrice de projection W a été définie par Potter (1977). Parmi les propriétés de cette matrice, son orthogonalité avec C entraîne en particulier :

$$p(k) = W\,e(k) + W\,d(k) \qquad (5)$$

Le vecteur parité est ainsi la somme de deux termes, le premier W e(k) apporte une contribution aléatoire de statistique connue si celle du bruit e(k) est connue, la seconde W d(k) est une composante déterministe dont la direction est fixée par le rang du capteur en défaut et l'amplitude est fonction de celle de la défaillance du capteur. Lors d'une défaillance d'un capteur, l'amplitude du vecteur parité croît et s'oriente dans la "direction de défaillance" associée au capteur concerné. En l'absence de défaillance (d(k) = 0) et si les erreurs aléatoires suivent une loi de distribution normale, le carré de la

norme du vecteur parité suit une loi du chi-2 ; on peut donc comparer cette norme à un seuil qui est fixé à partir d'un niveau de confiance associé à la loi de distribution du chi-2. Cette phase de détection de la présence d'une défaillance doit être complétée de façon à localiser la défaillance. Une solution simple repose sur l'analyse de la corrélation entre le vecteur parité et les différentes directions de défaillance matérialisées par les vecteurs formés par les colonnes de la matrice W et la détermination de la corrélation la plus grande.

La technique qui vient d'être rappelée est à l'origine des stratégies "modernes" de diagnostic ; elle a été notamment étendue au cas des systèmes dynamiques (Chow, 1984). Une façon très simple de présenter la génération de résidus pour des systèmes dynamiques consiste à utiliser la modélisation de ces systèmes à partir de fonctions de transfert :

$$y(s) = G_u(s)\, u(s) + G_d\, d(s) \qquad (6)$$

où u, d et y représentent respectivement la commande, l'entrée de perturbation et la sortie du système considéré et où les fonctions de transfert G_u et G_d traduisent respectivement les influences de l'entrée et de la perturbation sur la sortie du système.

De façon très générale un résidu est généré à partir des informations connues du système, ici l'entrée u et la sortie y (la perturbation n'est pas mesurée). Ainsi, une forme générale pour exprimer le résidu peut être :

$$r(s) = H_u(s)\, u(s) + H_y\, y(s) \qquad (7)$$

qui s'écrit aussi :

$$r(s) = \left(H_u(s) + H_y(s)\, G_u(s)\right) u(s) + H_y(s)\, G_d(s)\, d(s) \qquad (8)$$

En l'absence de perturbations affectant le système, le résidu doit être nul, ce qui impose la contrainte suivante entre les fonctions de transfert du générateur de résidu :

$$H_u(s) + H_y(s)\, G_u(s) = 0 \qquad (9)$$

La conception du générateur de résidu (figure 2) résulte donc du choix des fonctions $H_u(s)$ et $H_y(s)$ qui doivent satisfaire la contrainte (9). En général, la solution de ce système n'est pas unique ce qui permet de disposer de degrés de liberté pour "structurer" le générateur de résidu de façon à privilégier la détection de certaines perturbations. Compte tenu de (9), on peut écrire le résidu sous l'une ou l'autre des deux formes suivantes :

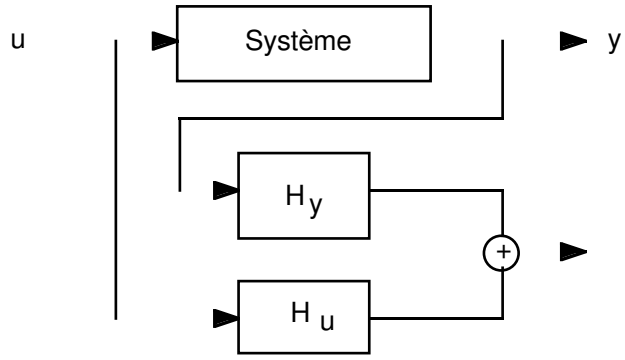

Figure 2 : générateur de résidus

$$r(s) = H_y(s)\left(y(s) - G_u(s)\, u(s)\right) \qquad (10a)$$

$$r(s) = H_y(s)\, G_d(s)\, d(s) \qquad (10b)$$

La forme (10a) permet le calcul numérique du résidu en fonction des signaux d'entrée et de sortie du système alors que la forme (10b) "explique" la valeur du résidu en fonction de la perturbation d(s) que l'on cherche à mettre en évidence. Comme dans le cas statique, l'étude statistique du résidu r(t) est

révélatrice des perturbations affectant le système et sous certaines conditions ces perturbations peuvent être estimées en amplitude et en durée en fonction des caractéristiques du résidu.

Il existe de nombreuses autres techniques de détection de défaillances, et nous invitons le lecteur à se référer aux ouvrages spécialisés dans ce domaine (Brunet, 1990), (Ragot, 1990), (Dubuisson, 1990), (Basseville, 1993). Nous présenterons, au paragraphe 6, l'une de ces techniques, utilisable lorsqu'on dispose d'un modèle du processus à surveiller.

4. ARCHITECTURE GENERALE D'UN SYSTEME DE DIAGNOSTIC

La figure 3 montre les étapes fonctionnelles du diagnostic : générer des résidus, c'est-à-dire des signaux sensibles aux défaillances à détecter, générer les signatures des défaillances, détecter et localiser les défaillances, décider d'une action à entreprendre. La plupart des méthodes de diagnostic utilisent la connaissance du processus physique représenté par son modèle mathématique. La redondance analytique (due au modèle) est en fait une généralisation de la redondance matérielle. Elle permet de comparer les informations issues de plusieurs capteurs avec celles correspondant aux variables calculées à partir des modèles (Brunet, 1990) ; cette comparaison se traduit par la génération de variables d'écart appelées résidus. Dans le cas où le processus (et ses organes de commande) fonctionnent normalement, ces résidus sont nuls ; leur déviation par rapport à la valeur zéro est alors significative d'une action combinée de bruits de mesure et de défaillances. Si le bruit est d'amplitude négligeable, les résidus peuvent être directement analysés et un test utilisant un simple seuil suffit à indiquer la présence d'une défaillance. Par contre, si l'amplitude du bruit est importante, un traitement préalable devra séparer l'influence du bruit de celle des défaillances (filtrage adapté, estimateur d'état déterministe ou stochastique). Après analyse des résidus, on dispose d'un vecteur indicateur encore appelé signature qui est une image des défaillances du processus. Cette signature expérimentale est ensuite comparée aux signatures théoriques qui correspondent à l'ensemble des défaillances que l'on peut, a priori, répertorier et caractériser ; les principes de la reconnaissance de formes peuvent être judicieusement appliqués pour effectuer cette comparaison.

Dans la pratique, la phase de diagnostic doit permettre, à l'opérateur ou à une procédure automatique, de prendre une décision. En effet, la détection d'une défaillance n'est pas une fin en soi et le processus soumis à cette défaillance doit continuer à remplir au mieux la mission qui lui a été confiée. Les décisions à prendre peuvent être : ne rien décider par manque d'information suffisamment pertinente et attendre de disposer d'un diagnostic plus précis, faire des essais sur le processus pour vérifier l'état de gravité de la défaillance qui a été détectée, réparer le composant défectueux du processus, modifier la politique de maintenance préventive, ajuster les paramètres de la loi de conduite du processus et modifier la structure de la loi de conduite du processus.

Enfin, il est important de noter que le diagnostic d'un processus physique peut être décomposé en une phase passive qui observe le processus en cours de fonctionnement "naturel" et une phase active (figure 4) qui nécessite d'agir sur le processus pour en révéler les défauts ou au contraire masquer leurs effets. La phase passive qui est généralement la première effectuée, concerne l'analyse du fonctionnement du processus uniquement à partir d'informations collectées sur celui-ci. On trouve ainsi les étapes habituelles d'analyse des historiques, de réconciliation de données par équilibrage de bilan et estimation d'état, de détection de valeurs aberrantes dans des fichiers de mesure traduisant des états de défaillances du système et/ou de ses composants.

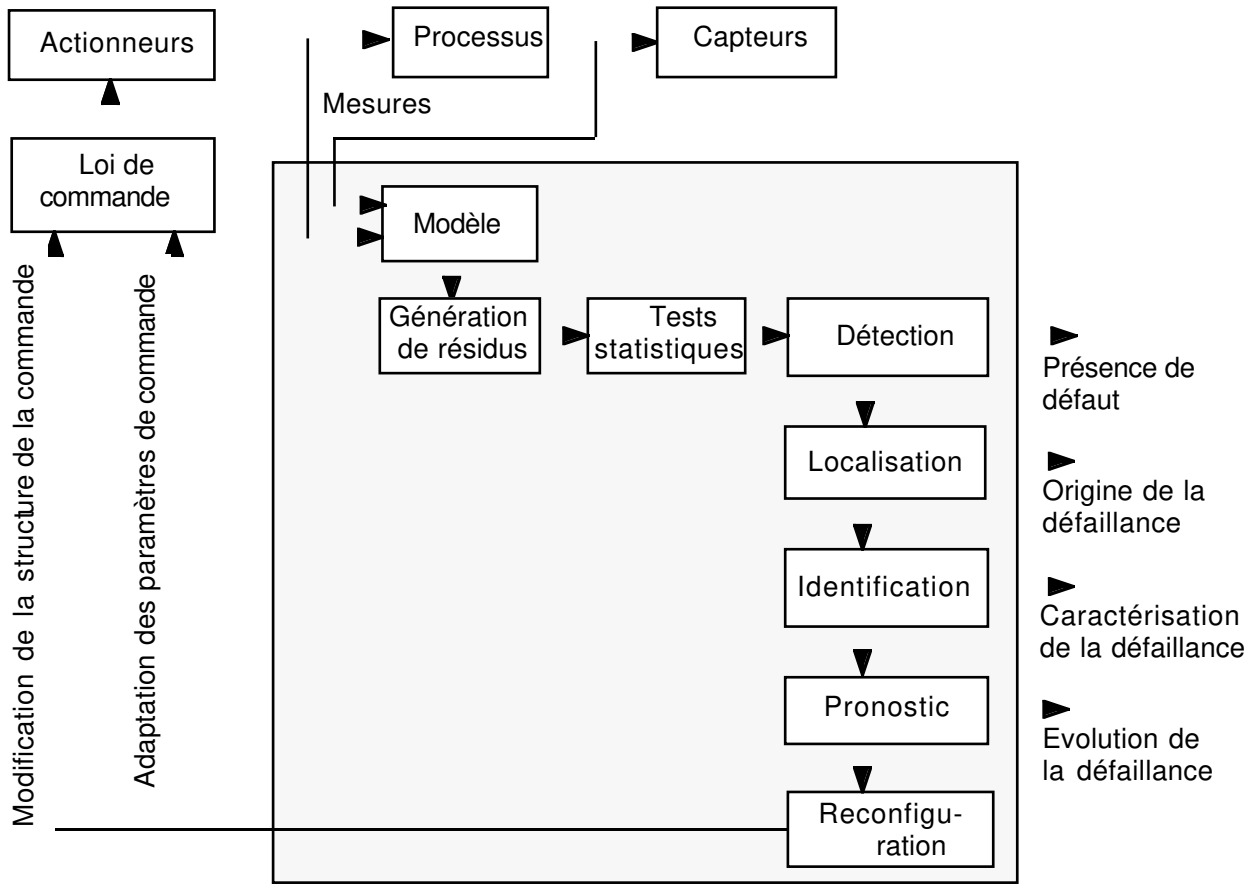

Figure 3 : Les étapes du diagnostic

Cependant, pour poser un diagnostic correct, il faut que le processus soit analysé dans l'ensemble de ses conditions de fonctionnement alors que pour une séquence d'observations particulière, il est rare de disposer des informations suffisantes. On conçoit alors la nécessité de procéder à un diagnostic actif où le processus physique va être excité (application d'extra-signaux) de façon à étudier son comportement ; ces extra-signaux doivent pouvoir exciter le système dans tous ses modes tout en lui garantissant un fonctionnement compatible avec les impératifs de production. Dans d'autres cas, on cherche à s'affranchir de certains types de perturbations en déterminant une loi de commande "robuste" appropriée. Enfin, pour effectuer le diagnostic d'un processus, il est nécessaire de disposer d'un minimum d'informations. On conçoit donc l'intérêt de la conception d'un système d'instrumentation (choix du nombre et de l'emplacement des capteurs) capable d'assurer cette fonction de diagnostic (Turbatte, 1993).

Un deuxième point important concerne les informations nécessaires pour établir un diagnostic. Ayons à l'esprit les règles d'observabilité qui définissent les conditions dans lesquelles l'état d'un système est reconstructible. La reconnaissance de l'état d'un système nécessite de disposer d'un nombre suffisant de mesures ; il est donc nécessaire de pouvoir définir, a priori, le nombre et l'emplacement des capteurs et, de façon plus générale, de définir l'architecture d'instrumentation d'un système (Maquin, 1987). Là encore, il s'agit bien d'une phase active du diagnostic qui nécessite d'intervenir sur le système.

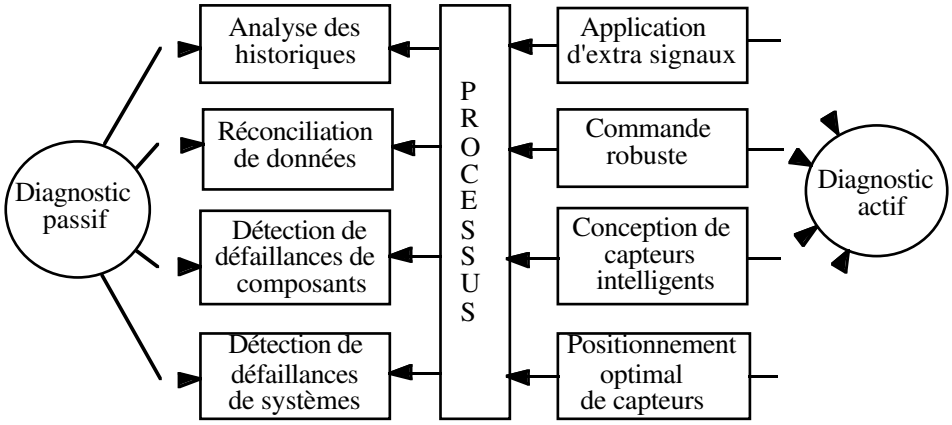

Figure 4 : Diagnostic passif et actif

5. QUALITES D'UN SYSTEME DE DIAGNOSTIC

Le cahier des charges de la conception d'un système de diagnostic inclut les spécifications suivantes : détectabilité, isolabilité, sensibilité, robustesse, rapidité de détection. Il convient d'ajouter que le système de diagnostic lui-même doit être non défaillant ou conçu pour prendre en compte ses propres défaillances.

La *détectabilité* concerne la possibilité offerte par le système de diagnostic de pouvoir détecter une défaillance particulière. Il faut donc, en se référant à la notion de résidu, que le générateur de résidu soit sensible, d'une certaine manière, à la défaillance que l'on souhaite détecter. Si on considère l'expression (10b), cette notion est simple à mettre en évidence. Considérons la ième composante du vecteur d ; pour détecter cette défaillance, il faut que la ième colonne de la matrice $H_y(s)\ G_d(s)$ soit non nulle.

L'*isolabilité* est l'aptitude de la procédure de détection à distinguer (c'est-à-dire isoler) plusieurs fautes sous réserve que ces fautes soit détectables. Cette propriété d'isolabilité est liée à la structure des équations de parité (Gertler, 1991) et à la procédure de détection elle-même. En se référant à l'expression (10b), les défaillance d_i et d_j sont isolables si les colonnes i et j de la matrice $H_y(s)\ G_d(s)$ sont non liées.

La *sensibilité* caractérise l'aptitude de la procédure à détecter des fautes d'amplitude donnée. Elle dépend de la structure des équations de parité et surtout de l'amplitude relative du bruit de mesure par rapport à celle du défaut à détecter.

La *robustesse* est l'aptitude de la procédure à détecter les fautes indépendamment des erreurs de modèle du processus. C'est une forme particulière de l'aptitude à l'isolabilité ; dans la pratique, c'est un problème très difficile à résoudre car la structure d'un modèle est une approximation (sauf peut être dans le cas de modèles directement issus des lois de conservation de matière et d'énergie) et ses paramètres ne sont connus qu'avec une certaine précision.

La *rapidité* de la détection se définit d'elle-même ; c'est un impératif à prendre en compte lorsque le diagnostic doit être établi en temps réel.

Il faut bien se rendre compte que les quatre exigences citées sont partiellement contradictoires ; par exemple, le souhait légitime de robustesse de la détection vis-à-vis d'imprécisions sur le modèle du

processus se réalise souvent au détriment de la rapidité de détection et d'isolation. Inversement, une procédure d'isolabilité très fine peut être très sensible aux erreurs de structure de modèle et aux erreurs à caractère aléatoire.

6. ANALYSE D'UNE TECHNIQUE DE GENERATION DE RESIDUS

La technique utilisant la reconstruction d'état au moyen d'un observateur peut être mise à profit pour le diagnostic. En effet, la reconstruction d'état est basée sur la notion de prédiction et de rétro-action à partir de l'erreur d'estimation de la sortie du processus. Cette erreur peut aussi servir de variable indicatrice de la présence d'événements affectant le processus. Les différentes étapes nécessaires à la mise en oeuvre de cette technique de diagnostic recouvre les trois points suivant : générer des résidus qui puissent mettre "en valeur" les défaillances, analyser ces résidus pour détecter puis localiser ces défaillances.

Pour un système décrit par les équations d'état (11), un observateur d'état peut avoir la forme (12) :

$$x(k+1) = A\,x(k) + B\,u(k) \qquad (11a)$$

$$y(k) = C\,x(k) \qquad (11b)$$

$$\hat{x}(k+1) = A\,\hat{x}(k) + B\,u(k) + K\,(y(k) - \hat{y}(k)) \qquad (12a)$$

$$\hat{y}(k) = C\,\hat{x}(k) \qquad (12b)$$

où le gain K est choisi de façon à assurer des performances dynamique acceptables. Pour juger de la qualité de la reconstruction de l'état, on définit l'erreur d'estimation :

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k) \qquad (13)$$

Un calcul classique donne comme expression de l'erreur d'estimation de l'état :

$$e(k+1) = (A - K\,C)\,e(k) \qquad (14)$$

qui est sensible aux défaillances du processus. En effet, si on considère le système perturbé (15) :

$$x(k+1) = A\,x(k) + B\,u(k) + E\,f(k) \qquad (15a)$$

$$y(k) = C\,x(k) + m(k) \qquad (15b)$$

on peut montrer que l'équation de l'évolution de l'erreur prend la forme (16) :

$$e(k+1) = (A - K\,C)\,e(k) + E\,f(k) + K\,m(k) \qquad (16)$$

L'analyse de l'évolution de cette variable peut donc être révélatrice de la présence de défaillances. En réalité, l'erreur e(k) ne peut être calculée car elle fait intervenir l'état du x(k) du processus qui n'est pas connu. Aussi, on utilise l'erreur de reconstruction de la sortie :

$$\varepsilon(k) = y(k) - \hat{y}(k) \qquad (17)$$

En l'absence de défaillance, l'erreur d'observation $\varepsilon(k)$ présente certaines particularités : valeur moyenne nulle, séquence blanche, non corrélée avec l'entrée, gaussienne si les hypothèses de Gauss-Markov sur le modèle sont respectées. L'apparition d'une défaillance conduit au non respect de ces particularités ; le test des caractéristiques de l'innovation est donc révélateur de la présence de défaillances et dans certains cas la détection peut être complétée par la localisation de la défaillance. Comme en général l'innovation est une variable vectorielle, les tests peuvent porter sur chacune de ses composantes de façon à faciliter la localisation des défaillances.

Le test le plus simple à mettre en oeuvre est relatif à l'amplitude de l'erreur d'observation. Si cette dernière est normalisée (divisée par son écart-type), elle est alors de valeur moyenne nulle et de variance unité. La comparaison de l'innovation à un seuil (en général deux à trois fois l'écart-type) renseigne sur la présence d'une défaillance. Ce test peut être effectué de façon séquentielle (SPRT) en testant la réalisation de l'hypothèse de fonctionnement normal correspondant à une innovation centrée et d'écart type s_0 unité à celle correspondant à un fonctionnement anormal caractérisée par une innovation centrée et d'écart-type inconnu s_1 différent de s_0. Cette technique bien connue des spécialistes de la mesure s'apparente aux tests sur la variance d'échantillons.

De la même façon, l'influence d'une défaillance peut se manifester sur la valeur moyenne de l'innovation. Il suffit alors de tester les deux hypothèses : le fonctionnement normal correspond à une innovation de moyenne m_0 nulle, le fonctionnement anormal correspond à une innovation de moyenne m_1 différente de m_0. Ce test est en général effectué sur une "fenêtre d'observation" glissante dont la largeur temporelle conditionne la robustesse et la sensibilité de la détection.

Une approche bien connue pour l'isolation des défaillances consiste à utiliser des observateurs dédiés c'est-à-dire offrant une sensibilité particulière à une défaillance. Le principe consiste donc à utiliser autant d'observateurs que de défaillances à détecter ; chaque observateur surveille alors une variable particulière. Dans un premier schéma de ce type proposé par Clark (1979), chaque observateur est "piloté" par une sortie particulière et par l'ensemble des entrées. Ainsi, dans le cas où la reconstruction des sorties peut être complète pour chaque observateur, on dispose d'un ensemble de vecteurs de sortie ; l'isolation des défaillances peut alors être effectuée au moyen d'un test logique de décision basé sur la comparaison de ces différents vecteurs. Par exemple, si un seul capteur est défaillant, l'observateur qui utilise cette information reconstruit un vecteur des sorties qui sera différent de tous les vecteurs reconstruits par les autres observateurs. Dans le même esprit Frank (1990) propose d'utiliser une série de reconstructeurs pour isoler les défauts d'actionneur : cette fois, chaque observateur est piloté par l'ensemble des sorties et par seulement une entrée.

7. CONCLUSION

S'il y a quelques années, l'automatisation des processus de production avait pour objectif principal l'augmentation de leur productivité par la mise en oeuvre de commandes performantes, aujourd'hui, la prise en compte des aspects maintenance, gestion technique ou sûreté de fonctionnement devient une nécessité. [La complexité de plus en plus importante des systèmes automatisés de production les rend vulnérables aux défaillances qui sont à l'origine de coûts importants (risque d'accidents, de pollution, diminution de la production, non-qualité,...). Cette vulnérabilité justifie l'introduction, dans leur système de contrôle-commande, de procédures de surveillance et de diagnostic de l'état de fonctionnement.] On a exposé ici succinctement les principes du diagnostic d'un système fondé sur la connaissance de son modèle ; on a également montré que la possibilité d'effectuer un diagnostic est étroitement liée aux mesures disponibles. Les prochains développement concerneront probablement la prise en compte, dans le cahier des charges de conception des systèmes, des contraintes imposées pour le diagnostic de celui-ci (quantité, localisation, qualité des capteurs et actionneurs). Il semble aussi qu'une analyse de robustesse s'avère indispensable de façon à proposer des techniques de diagnostic s'accommodant de modèles plus imprécis voire incertains ; en particulier, l'usage de concepts de physique qualitative apparaît être une démarche intéressante et son couplage aux techniques actuelles devrait sensiblement améliorer les possibilités du diagnostic.

Références

1. Barnett V., Lewis T. *Outliers in statistical data*. J. Wiley and Sons, 1984.
2. Basseville M., Benveniste A. Detection of abrupt changes in signals and dynamical systems. Lecture notes in control and information sciences, 77, Springer Verlag, 1986.
3. Basseville M., Nikiforov I.V. *Detection of abrupt changes - Theory and applications*. Series in Information and System Sciences, Prentice-Hall, 1993.
4. Beckman R.J., Cook R.D. Outliers. Technometrics, 25 (3), p. 119-149, 1983.
5. Broussaud A., Clin F., Croise G., Fourniguet G. Méthodologie d'échantillonnage et bilans matière cohérents dans un pilotage de minerai sulfuré. Revue de l'Industrie Minérale, p. 165-170, 1988.
6. Brunet M., Jaume D., Labarrère M., Rault A., Vergé M. *Détection et diagnostic de pannes.* Traité des nouvelles technologies, série diagnostic et maintenance, Hermès, 1990.
7. Chow E.Y., Willsky A.S. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. IEEE Transactions on Automatic Control, AC-29, p. 603-614, 1984.
8. Clark R.N. The dedicated observer approach to instrument failure detection. Proceeding of the 18th IEEE Conference on Decision and Control, p. 237-241, 1979.
9. Dubuisson B. *Diagnostic et reconnaissance de formes.* Traité des nouvelles technologies, série diagnostic et maintenance, Hermès, 1990.
10. Gertler J. Analytical redundancy in fault detection and isolation. Proceedings of the IFAC/IMACS Symposium Safeprocess'91, 9-22, Baden-Baden.
11. Frank P.M. Fault diagnosis in dynamical systems using analytical and knowledge based redundancy - a survey and some new results. Automatica, 26 (3), p. 459-474, 1990.
12. Héraud N., Maquin D., Ragot J. Multilinear balance equilibration - application to a complex metallurgical process. Mineral and Metallurgical processes, p. 197-204, 1991.
13. Linnik Y.V. *Méthodes des moindres carrés*. Dunod, 1963.
14. Mah R.S.H., Stanley G.M., Downing D.M. Reconciliation and rectification of process flow and inventory data. I.E.C. Process Design Development, 15 (1), p. 175-183, 1976.
15. Maquin D., Bloch G., Ragot J. Data reconciliation of measurements. Revue Européenne Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement, 1 (2), p. 145-181, 1991.
16. Maquin D., Fayolle J., Darouach M., Ragot J. Le positionnement de capteurs dans les systèmes industriels de grande dimension. Proceedings of IMACS congress, Villeneuve d'Ascq, 1986. Published in *Applied Modelling and Simulation of Technological Systems*, Elsevier, 1987.
17. Maquin D., Ragot J. LVD : a software for mass balance and data validation. Dechema-Monographs vol. 116, VCH Verlagsgesellschaft, 1989.
18. Maquin D., Ragot J. Comparison of gross errors detection methods in process data. Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control, p. 2253-2261, Brighton, december 1991.
19. Maquin D., Gaddouna B., Ragot J. Parity space equations for singular systems. IEEE international Conference on Systems Man and Cybernetics, Le Touquet, 1993.
20. Mourot G. Contribution au diagnostic des systèmes industriels par reconnaissance de forme. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 1993.
21. Nogita S. Statistical test and adjustment of process data. Industrial Engineering Chemistry Process Design Development, 11 (2), p. 197-200, 1972.
22. Ostroff A.J., Hueschen R.M. Investigation of control law reconfiguration to accomodate a control element failure on a commercial airplane. Proceeding of the American Control Conference, p. 1746-1754, 1984.
23. Potter J.E., Suman M.C. Thresholdless redundancy management with arrays of skewed instruments. Electronic flight control systems, Agardograph 224, p. 2115-2121, 1977.
24. Ragot J., Darouach M., Maquin D., Bloch G. *Validation de données et diagnostic*. Traité des nouvelles technologies, série diagnostic et maintenance, Hermès, 1990.
25. Ragot J., Maquin D., Bloch G. Sensor positionning for processes described by bilinear equations. Revue Européenne Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement, 2 (2), p.115-132, 1992.
26. Ragot J., Maquin D., Kratz F. Observability and redundancy decomposition - application to diagnosis. To be published. In Advances in fault diagnosis for dynamical systems, Prentice-Hall, 1993.
27. Ragot J, Maquin D., Ribbens W.B., Two approaches for the isolation of plant failures in dynamic systems. International Conference on Fault Diagnosis, Tooldiag, p. 1-9, Toulouse, 1993.
28. Ragot J., Maquin D. Failure detection identification and accomodation based on a new accomodation filter. International Journal of Systems Sciences, 24 (6), p. 1215-1220, 1993.
29. Ragot J., Maquin D., An algorithm for obtaining the redundancy equations of LTI systems. Automatica, 30 (9), 1994.
30. Turbatte H.C., Maquin D., Huynh C.T., Ragot J. Conception de l'architecture d'un système d'instrumentation. Application à un procédé pétrochimique. International Conference on Fault Diagnosis, Tooldiag, p. 406-415, Toulouse, 1993.