

Chapitre 2. Les méthodes de diagnostic

I. Introduction

Les méthodes de diagnostic des défauts utilisées dans le milieu industriel sont très variées. Leur principe général repose sur une comparaison entre les données observées au cours du fonctionnement du système et les connaissances acquises sur son comportement normal et ses comportements de défaillance

Les méthodes de diagnostic se distinguent selon différents critères:

La dynamique de procédé (discret, continu ou hybride),

- Sa complexité, l'implémentation de diagnostic en ligne et/ou hors ligne, la nature d'information (qualitative et/ou quantitative),
- Sa profondeur (structurelle, fonctionnelle et/ou temporelle),
- Sa distribution (centralisée, décentralisée ou distribuée)...

L'objectif est de déterminer la méthode la plus appropriée pour la résolution du problème de détection et de diagnostic, ainsi que, positionner la classe des méthodes de diagnostic qui nous intéresse parmi les différentes méthodes de la littérature. Ainsi, voici une classification non exhaustive des méthodes de diagnostic en deux grandes familles figure 7 suivante.

- Les méthodes sans modèle mathématique qui ne nécessitent pas de connaissances accrues du système physique, mais utilisent des connaissances superficielles,
- Les méthodes à base de modèles qui nécessitent une connaissance approfondie du système physique

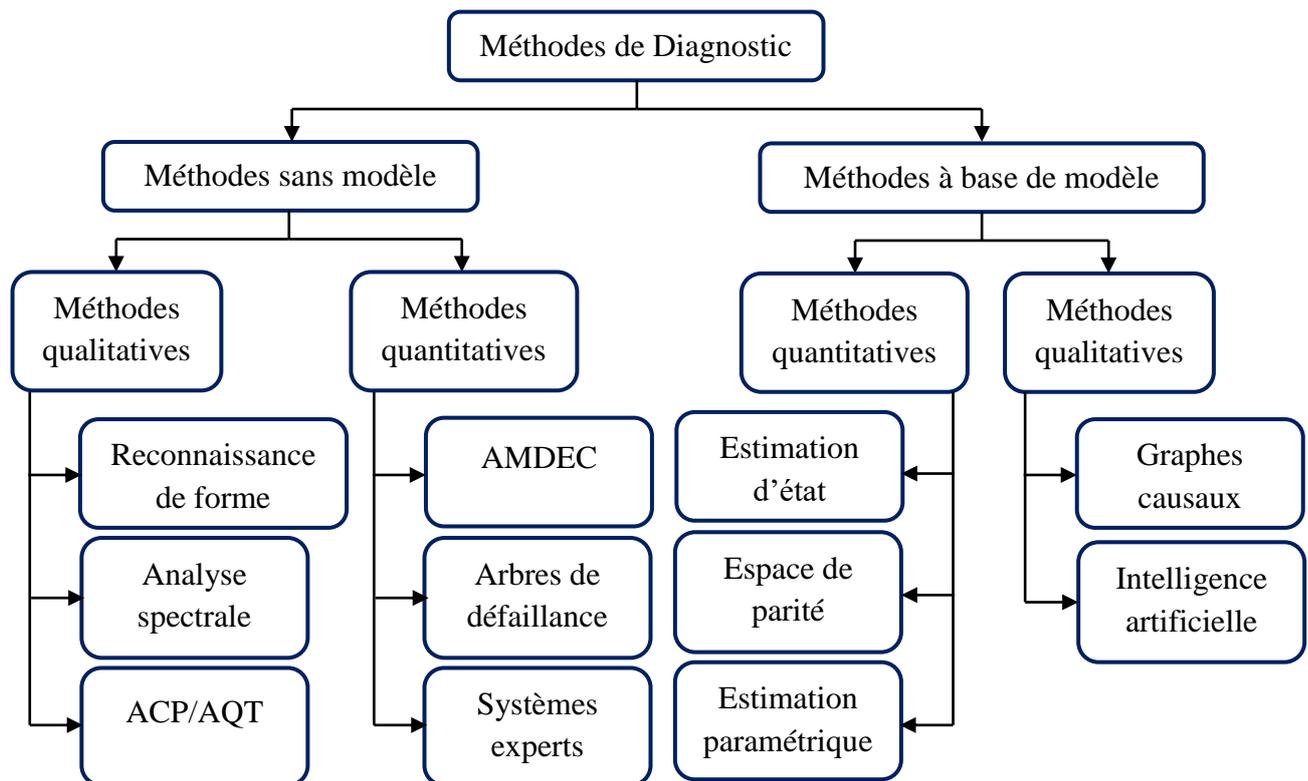


Figure 6 : Classification générale des méthodes de diagnostic

II. Méthodes sans modèle

Pour certaines applications industrielles, la conception d'un modèle mathématique est difficile, voire impossible à obtenir, à cause des nombreuses reconfigurations intervenant dans le processus de production ou de la complexité des phénomènes mises en jeu. Dans ce cas, on a recours à des méthodes qui ne nécessitent aucune connaissance approfondie du procédé. Deux classes, dans ce type d'approches, peuvent se présenter:

- Les méthodes quantitatives ou appelés méthodes à base de connaissances.
- Les méthodes qualitatives ou méthodes basées sur le traitement de données.

II.1 Méthodes quantitatives

Les méthodes quantitatives ou à base de connaissances sont mises en œuvre lorsque la majorité des mesures sont indisponibles et lorsque la construction du modèle s'avère difficile. Elles peuvent être utilisées pour identifier les causes des défaillances d'un procédé industriel. Il s'agit d'analyses fonctionnelles et structurelles qui se basent sur l'expérience et la connaissance de l'opérateur

A. L'AMDEC

(Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets) et ses dérivées: c'est une méthode issue du contexte de la sûreté de fonctionnement. Villemeur dans [Villemeur,1988] décrit l'AMDE comme une approche d'analyse consistant à identifier de façon inductive et systématique les modes de défaillances d'un système puis à en rechercher les causes et leurs effets. La démarche consiste à examiner comment et pourquoi les fonctions du système étudié risquent de ne plus être assurées correctement, en définissant les modes de défaillances potentielles, en recherchant les causes possibles de l'apparition de chaque mode de défaillance et enfin en étudiant pour chaque combinaison cause-mode de défaillance, les effets sur le système et sur l'utilisateur.

Une fois complétée par une analyse de criticité, l'AMDE devient l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets et de la Criticité). Elle permet d'extraire les modes de défaillances les plus critiques. Elle consiste à examiner la criticité des modes de défaillances à partir de trois critères : gravité, fréquence d'apparition et probabilité de non détection.

B- Arbre de causes a effets ou arbre de défaillances

L'arbre de défaillances apparu la première fois dans [Villemeur, 1988], représente l'un des outils majeurs d'analyse de risques technologiques.

L'objectif de cette approche est de déterminer les diverses combinaisons possibles d'évènements qui entraînent la réalisation d'un évènement indésirable unique. Sa représentation graphique est composée d'une structure arborescente permettant un traitement à la fois qualitatif et quantitatif. L'arbre de défaillances est composé de plusieurs niveaux où la racine correspond à l'évènement indésirable. Les niveaux sont ordonnés de manière successive tel que, chaque évènement est généré à partir des évènements du niveau inférieur par l'intermédiaire d'opérateurs logiques (ET, OU). La décomposition s'arrête aux niveaux des évènements élémentaires, caractérisés par le fait qu'ils sont indépendants et non décomposables en éléments plus simples.

C- les systèmes experts

Le système expert est un système informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse, d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un ou de plusieurs spécialistes de

ce problème. Ils utilisent une information heuristique pour lier les symptômes aux défauts. A partir de l'ensemble des symptômes à sa disposition, il déduit toutes les conclusions possibles, élabore de nouvelles hypothèses et approfondit son diagnostic en exploitant des informations supplémentaires collectées sur le système à diagnostiquer. Les systèmes experts sont composés de deux parties indépendantes : une base de connaissances et un moteur d'inférence. La base de connaissances peut être subdivisée en deux groupes: la base de faits et la base de règles. La base de faits représente l'état du système observé. La base de règles est un ensemble de règles logiques qui permettent de déduire, d'inférer de nouveaux faits à partir d'autres faits déjà établis dé nommés les prémisses. Le moteur d'inférence a la lourde tâche de déduire tous les faits susceptibles d'être déduits à partir de la base de connaissances.

Le système expert se compose habituellement d'une combinaison de règles logiques du genre :

SI [état du système i] **ET** (fait observable) **ALORS** [état du système j]

II.2 Méthodes qualitatives

Les méthodes qualitatives consistent en l'exploitation d'une base de connaissance symbolique et nécessitent l'existence d'un large éventail de données historiques correspondant aux divers modes de fonctionnement de l'installation.

A- Analyse en composantes principales ACP

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique statistique multi-variable, capable de compresser les données et de réduire leur taille. Elle peut être vue comme une technique de projection orthogonale linéaire qui projette les observations multidimensionnelles représentées dans un espace de dimension n . (n est le nombre de variables observées) dans un sous espace de dimension $q < n$, en maximisant la variance des projections (ou en minimisant l'erreur quadratique d'estimation).

B- Reconnaissance de forme

L'objectif de la méthode de reconnaissance de forme est la classification automatique d'objet suivant sa ressemblance par rapport à un objet de référence.

Dans un problème de diagnostic, une classe est formée par l'ensemble d'observations caractérisant une situation ou un mode de fonctionnement de processus. Le diagnostic consiste à associer toute nouvelle observation à une classe. Le problème de diagnostic est équivalent à la recherche des frontières entre les classes qui minimisent l'erreur de classification. Le calcul de la distance (distance euclidienne) peut être choisi comme un critère de décision pour assigner une forme à une classe et de déterminer avec quelle confiance est effectuée cette décision.

C- Analyse qualitative des tendances AQT

Son objectif est la représentation et l'analyse qualitative des signaux à travers l'information des dérivées de premier et de second ordre. Cette analyse se base sur la segmentation des signaux en unités appelées épisodes, en fonction de leur convexité et de leur pente. Elle est constituée de deux étapes de base: l'identification de tendances dans les mesures (ce processus doit être robuste par rapport au bruit en capturant seulement les variations importantes), et l'interprétation de ces tendances en termes de scénarios.

D- Analyse spectrale

Sous certaines conditions normales, certaines mesures ont un spectre typique de fréquence; toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une anomalie. Cette méthode s'avère intéressante pour l'analyse des signaux qui montrent des oscillations avec des périodes longues (les débits, les pressions...).

II. Méthodes à base de modèle

La notion de modèle est décomposée en quatre niveaux fondamentaux de représentation : le niveau structurel, le niveau comportemental, le niveau fonctionnel et le niveau de reconnaissance des formes.

La représentation comportementale est constituée de relations entre différents phénomènes du système physique tandis que la représentation structurelle évoque les interconnexions des éléments d'un système physique. Alors que le niveau fonctionnel est constitué de relations de même nature que celle de la représentation comportementale, mais plus globales, représentant uniquement les fonctions présumées d'un système physique. Enfin, le niveau de la reconnaissance de forme qui est basée sur la connaissance heuristique et pourrait identifier des syndromes permettant de présager de l'évolution d'un état.

Il est aussi possible d'imaginer que la connaissance heuristique permette de déterminer des causes de défaillances.

Ainsi, ces méthodes reposent sur une comparaison du comportement du système avec le comportement du modèle qualitatif et/ou quantitatif établi. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance, comme indiqué dans le schéma de la figure 8.

Selon le type du modèle (qualitatif et/ou quantitatif), on peut distinguer deux branches de méthodes. La dissociation entre les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives n'implique pas que ces deux aspects sont disjoints. En réalité, ces deux types d'approche peuvent coexister au sein d'une même méthode de diagnostic.

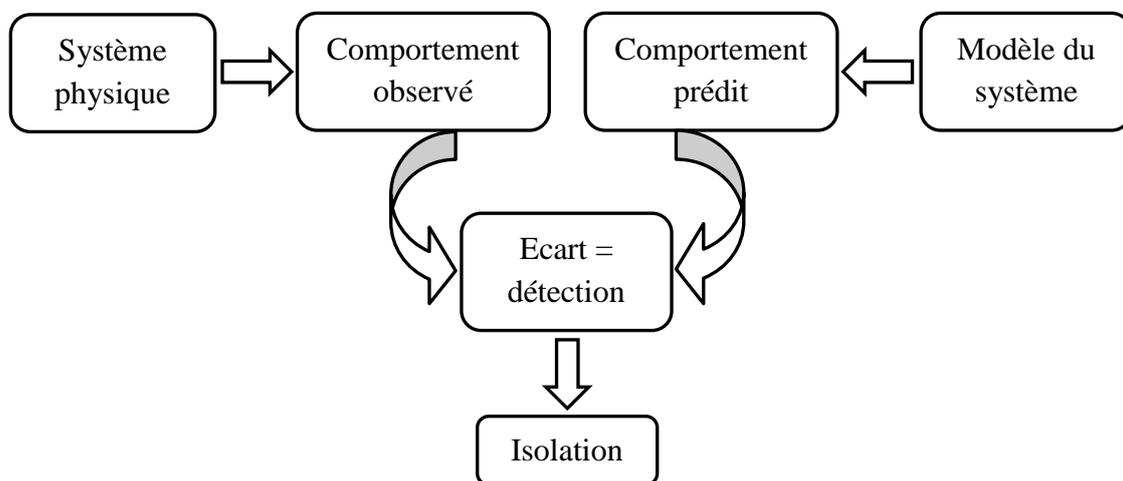


Figure 7 : Principe des méthodes de diagnostic avec modèles

II.1 Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs

Ces méthodes reposent sur l'estimation de l'état, des paramètres ou de l'espace de parité en utilisant les relations mathématiques qui existent entre les variables décrivant le comportement du système. Si l'écart entre ces modèles et les variables du système dépasse un certain seuil, une défaillance est alors

détectée. A ce moment, un résidu sera généré et comparé avec toutes les signatures des défauts connues, afin d'isoler et d'identifier la défaillance. Parmi les différentes méthodes de détection et de diagnostic utilisant des modèles mathématiques, on trouve principalement l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique.

A. Espace de parité

Cette méthode est utilisable à la fois dans le cas des systèmes déterministes et dans le cas des systèmes stochastiques.

L'objectif principal de cette méthode est l'élaboration de signaux permettant la vérification de parité ou de tester la cohérence des mesures issues des capteurs et des entrées connues (consignes, signal de commande,..) par rapport à leurs valeurs calculées à l'aide d'un modèle (on parle aussi de consistence des mesures, de leur parité). D'un point de vue général, la méthode consiste à vérifier les relations algébriques entrées/sorties du modèle en utilisant les mesures réelles. Pour cela, les signaux recueillis sur le système sont injectés dans les relations entrées/sorties et les signaux ainsi créés sont utilisés comme résidus. La méthode a été développée au début pour le cas statique, puis elle a été généralisée plus tard pour le cas des systèmes dynamiques. Cette généralisation utilise la redondance temporelle ou la redondance fréquentielle, c'est à dire des relations faisant intervenir les valeurs des sorties des capteurs et les entrées des actionneurs à différents instants.

Dans le cadre général, l'approche consiste à réaliser une redondance analytique (en mode temporel ou fréquentiel) entre les entrées et les sorties du système et cela indépendamment des états du système. Ainsi, la matrice de parité est définie comme étant une matrice de projection de la matrice d'observabilité, ce qui revient à éliminer l'influence des états sur les résidus.

B. Estimation paramétrique

Cette technique a été appliquée pour la détection des défauts pour les systèmes non linéaires, quand la structure du modèle est connue la détection et la localisation des défauts peuvent être effectuées en utilisant des techniques d'identification. L'idée de base consiste à estimer les paramètres du système en temps réel en utilisant les mesures d'entrées et de sorties et de les comparer aux paramètres non affectés par les défauts. Pour cela on doit établir un modèle mathématique du système à diagnostiquer et décrire toutes les relations qui existe entre les constantes physiques et les paramètres du modèle, puis estimer les paramètres du système ainsi que ceux du modèle à partir des entrées et sorties du système. Le vecteur de résidus est obtenu en faisant la différence entre les grandeurs estimées et les valeurs de référence de l'état normal du système.

C. Estimation d'états

Cette approche s'appuie sur la bonne connaissance du modèle et de ses paramètres, et nécessite l'intégration des diverses relations qui, contrairement aux relations de parité, sont différentielles. Le principe de base de diagnostic par observateur est basé sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs issues de l'observateur tout en estimant la sortie du système à partir des connaissances de la commande (ou partie de la commande), et des mesures (ou partie des mesures). L'état du système est reconstruit en se recalant à l'aide de certaines mesures. Le gain de l'estimateur dépendant des objectifs et des performances désirées. Dans le cas des systèmes linéaires, la structure de base des reconSTRUCTEURS est toujours la même, un modèle parallèle corrigé à l'aide de l'erreur d'estimation multipliée par un gain adéquat, mais dans le cas non linéaires le

problème s'avère difficile. Le vecteur résidu est ainsi construit comme l'écart entre la sortie estimée et la sortie mesurée. Ces résidus doivent servir d'indicateurs fiables du comportement du processus.

En diagnostic, la construction d'observateur est beaucoup plus complexe que ce qu'il en est dans le cas de commande dans la mesure où les paramètres d'observateurs jouent un rôle aussi sur la manière dont les défauts vont affecter les résidus. En plus d'assurer la stabilité, ces paramètres doivent permettre de structurer les résidus afin de localiser les défauts. Cependant, pour ce type de stratégie, si une anomalie apparaît, elle affecte en général toutes les composantes des vecteurs résidus ; de ce fait, le problème de localisation est plus complexe que ce qu'il en est dans le cadre de l'espace de parité. Pour résoudre ce problème, une solution consiste à construire des bancs d'observateurs où chacun d'entre eux surveille un défaut.

II.2 Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs

La communauté d'Intelligence Artificielle (IA) a proposé un raisonnement qualitatif (ou semi qualitatif) basé sur l'établissement de relations causes à effets. En effet, le diagnostic est typiquement un système causal puisqu'il consiste à établir des hypothèses sur les composants défaillants qui sont l'origine du dysfonctionnement observé. Le raisonnement qualitatif exprime le lien entre un composant et les formules décrivant son comportement.

A. Les graphes causaux

Ils sont appelés aussi les graphes d'influence. Ils déterminent les composants défectueux qui peuvent expliquer le fonctionnement anormal observé. Le diagnostic basé sur un graphe causal consiste à rechercher la variable source dont la déviation est suffisante pour expliquer toutes les déviations détectées sur d'autres variables. Deux principaux types de structure causale sont proposés: le premier type lie la causalité aux équations décrivant le système (analyse globale) tandis que le deuxième axe lie la causalité à la structure du système (analyse locale).

B. La logique floue

La logique floue est une théorie mathématique introduite par Zadeh, qui permet de tenir compte des incertitudes et permet une fusion des informations. L'idée de l'approche floue est de construire un dispositif, appelé système d'inférences floues, capable d'imiter les prises de décision d'un opérateur humain à partir des règles verbales traduisant ses connaissances relatives à un processus donné. Trouver une relation mathématique entre un défaut et ses symptômes s'avère souvent difficile. Cependant, en s'appuyant sur leur expérience, les opérateurs humains sont capables de déterminer l'élément défaillant qui est à l'origine des symptômes observés. Ce type de savoir peut être exprimé à l'aide de règles de la forme :

SI condition **ALORS** conclusion.

Où la partie condition comporte les symptômes observés et la partie conclusion l'élément défaillant. Ainsi le problème de diagnostic est considéré comme un problème de classification. Le vecteur des symptômes du classificateur, élaboré à partir des grandeurs mesurées sur le système, peut être vu comme une forme, qu'il s'agit de classer parmi l'ensemble des formes correspondant à un fonctionnement normal ou non.