

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Suite au développement important et rapide qu'a connu l'industrie automobile, les moteurs Diesel modernes sont de plus en plus complexes et sophistiqués, un défaut dans ces moteurs peut conduire à la baisse de ses performances ainsi qu'une augmentation des émissions des gaz d'échappement. La surveillance et le diagnostic de tels systèmes sont devenus des tâches importantes. Elles imposent des systèmes de diagnostic en ligne et visent le diagnostic en temps réel du moteur afin de prévenir toute défaillance dans le système et éventuellement l'identifier et la localiser [SABEH 06].

De nos jours, tout moteur diesel est commandé par un/ou plusieurs calculateurs traitant les informations collectées par des capteurs (pression, vitesse,...etc.) et commandant les actionneurs (pompe, électrovanne ...etc.). L'analyse des informations collectées depuis les différents capteurs pour la détection rapide et précise des défaillances est un problème réel. Quand elle est mal faite, elle peut causer des pertes humaines, matérielles, économiques,...etc.

En Algérie le diagnostic des moteurs diesel se fait hors ligne, de plus les connaissances des mécaniciens sont très limitées, qui rend le diagnostic difficile à réaliser et prend beaucoup de temps, pour répondre à cette problématique nous présentons un système d'aide au diagnostic en ligne (temps réel) afin de répondre aux exigences des clients en matière de sécurité, de confort et de consommation et ceci même en présence des défauts.

L'exploitation du système de diagnostic en ligne permet en temps réel d'adopter le meilleur comportement en présence des défauts et en temps différé (off line), de développer une stratégie de maintenance préventive.

Les systèmes de diagnostic actuels se basent sur la comparaison des différentes mesures sans exploiter les corrélations entre ces dernières, cela augmente leur tolérance aux défauts, rendent la détection précise des défaillances de plus en plus complexes, c'est pourquoi l'utilisation des techniques de diagnostic tel que les réseaux de neurones, la reconnaissance des formes ..., semblent prometteuses pour améliorer la qualité de détection et de localisation des défauts.

Le moteur diesel est composé par plusieurs sous-systèmes : le système d'injection, le système d'admission, le bloc moteur avec ses solides en mouvements (Cylindres, Bielles, ...etc.), le système de suralimentation et le système d'échappement. Plusieurs modèles décrivant ses différents sous-systèmes, sont abondamment développés dans la littérature.

Du fait qu'il est difficile d'acquérir une base de données ou de la construire en collectant les informations sur tous les modes de fonctionnement du moteur Diesel, on a été contraint de la créer en utilisant les modèles développés dans [NOHRA 09], [PEYSSON 05], [NOURA 06] et [YOUNES 93].

Sous l'hypothèse d'un couple de freinage constant qui ne représente que la résistance exercée par les parties en rotation du moteur à vide, un ensemble de modèles de fonctionnement avec et sans défaut est proposé [NOURA 06]. Les défauts pouvant apparaître sont : défauts d'injection, défaut de fuite d'admission, défaut de soupape d'admission et défaut de compression.

À partir des données générées par l'ensemble de modèles associés à une base de connaissances relatives au moteur, un système de diagnostic complet basé sur les techniques de reconnaissance des formes floue est développé, permettant de détecter et de localiser plus facilement et plus rapidement le composant responsable de défaillance.

Deux méthodes de diagnostic basées sur la classification automatique sont développées dans ce travail. La méthode de reconnaissance floue d'une part, et les séparateurs à vaste marge (SVM) d'autre part, utilisent les mêmes approches d'apprentissage supervisé. Elles partagent la même construction de l'espace de représentation mais différent dans la structuration de cet espace et dans l'élaboration des règles de décision.

Pour la reconnaissance des formes floue, les fonctions de décision sont des règles de décision issues du domaine de l'intelligence artificielle, alors que les règles de décision pour les méthodes SVM sont obtenues par une binarisation de l'espace de représentation avec un hyperplan optimal.

Les deux méthodes sont adaptées aux systèmes complexes et assez robustes pour intégrer les erreurs et les incertitudes.

Les résultats obtenus par ces deux méthodes sont comparés, et analysés avant de choisir la méthode qui sera implémentée sur le système embarqué.

Les travaux menés dans cette thèse sont structurés en quatre chapitres :

Le premier chapitre, est consacré à la présentation des différentes approches nécessaires pour l'établissement d'une démarche de diagnostic.

Le deuxième chapitre, se divise en trois parties, la première présente en détail les différentes étapes de l'approche de diagnostic par reconnaissance des formes. La deuxième partie a été réservée à l'étude de l'approche de reconnaissance floue des formes, dans le cadre de cette approche les différents algorithmes de classification, précisément l'algorithme C-moyennes floue et ses variantes seront largement décrit et détaillé. La comparaison des différents algorithmes nous permet d'adopter une méthodologie de diagnostic basée sur l'un de ses algorithmes. La troisième partie est consacrée à la présentation des différents concepts de base de l'approche des séparateurs à vastes marges. Nous avons choisi d'utiliser un classifieur SVM pour valider les résultats de classification par reconnaissance des formes floue. Nous commençons cette partie par une présentation de principe des SVM, ainsi nous présentons quelques notions de base qui sont : hyperplan, les vecteurs supports et la marge. Nous mettrons en évidence l'utilisation des SVM dans le cas des données linéairement séparables et le cas des données non linéairement séparables. Nous finissons par une présentation des méthodes les plus connues pour le traitement des problèmes de classification multi-classes.

Le troisième chapitre, se divise en trois parties, la première présente une synthèse bibliographique, montrant un état de l'art des moteurs diesel. La partie 2 est dédiée à la présentation de l'ensemble des modèles avec et sans défaut. La troisième partie est réservée à la présentation des résultats provenant de la modélisation sous MATLAB/SIMULINK, accompagnée des commentaires des résultats obtenus.

Le quatrième chapitre est réservé à la présentation des résultats des deux systèmes de diagnostic avec commentaires des résultats obtenus. En premier lieu nous avons présenté les résultats du système de diagnostic par reconnaissance des formes floue. En deuxième lieu nous avons présenté les résultats de classification par la deuxième approche basée sur les séparateurs à vastes marges dont le but de valider les résultats de la première approche.

Le cinquième chapitre est réservé à la simulation et implémentation de système de diagnostic basée sur les séparateurs à vaste marge sur une plateforme FPGA.

Une conclusion termine ce travail, en mettant en évidence que le modèle simplifié présenté dans cette thèse est un modèle non linéaire précis et rapide en temps de calcul, destiné à être utilisé à bord du véhicule dans le but d'établir le diagnostic en temps réel; Il utilise des sous modèles de connaissance pour décrire les évolutions des variables (vitesse, pression, pollution ...etc.).

CHAPITRE I

Généralités sur le diagnostic des systèmes

1.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des différentes méthodologies de diagnostic des systèmes développés dans les différents travaux de recherche.

Au cours de ces dernières années, la surveillance et le diagnostic des différents systèmes sont d'une grande importance dans l'industrie. Elle impose actuellement des systèmes de diagnostic capable d'identifier, pendant toute la durée de fonctionnement, toute défaillance d'un composant ou d'un système.

En général, il existe pour un système donné un certain nombre de variables dont l'observation permet de déterminer si le comportement obtenu est normal ou non.

Le diagnostic des défauts nous permet de décider s'il existe ou non une anomalie de fonctionnement et de localiser cette dernière au sein du système, à partir des observations et de la connaissance du système. Donc le diagnostic des défauts consiste à déterminer comment représenter la connaissance du comportement normal du système, de définir les variables appropriées du système à observer et de décrire la procédure permettant la prise de décision, à savoir : quel est le défaut présent et où se situe-t-il dans le système **[SABEH 06]**.

Dans le cas de ce travail de thèse, nous nous intéressons au diagnostic en temps réel appliqué à un moteur diesel équipé d'un certain nombre de capteurs et d'actionneurs.

Une méthode de diagnostic est ainsi proposée pour la détection de différents types de défauts du système (défauts d'actionneurs).

1.2 Diagnostic des défaillances

1.2.1 Introduction

L'objectif du diagnostic des défaillances est la détection et l'identification de l'état ou mode opérationnel d'un système dans l'instant actuel. La surveillance d'un système consiste à diagnostiquer ses états et modes défaillants. Le pronostic est la prédiction des possibles états futurs dans lesquels un système peut évoluer. Alors, une fois les états futurs identifiés, le pronostic nous permettrait d'estimer le temps de vie restant d'un système à partir de son état actuel jusqu'à un état défaillant [DIEZ LLEDO 08].

1.2.2 La surveillance

La surveillance est un dispositif passif, informationnel, qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système, puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières. Donc la surveillance se décompose en deux fonctions qui sont la détection et le diagnostic [RACOCEANU 06].

1.2.3 La détection

Elle permet la détection des dysfonctionnements dans le système. Si l'on dispose d'un modèle nominal, un dysfonctionnement se caractérisera par l'éloignement des paramètres du procédé de ceux du modèle de bon fonctionnement. En présence d'un modèle de dysfonctionnement, la détection identifie clairement le défaut connu a priori [RIPOLL 99].

1.2.4 Le diagnostic

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. [AFNOR, CEI], [BOUZIDI 16].

Il s'intègre dans le cadre plus général de la surveillance et de la supervision. Il consiste à localiser les éléments défaillants et à identifier les causes à l'origine du problème ; ceci en établissant un lien causal entre les symptômes et les éléments fautifs à remplacer. La phase qui suit correspond à la décision. Elle a pour rôle de déterminer et d'engager les actions permettant de ramener au mieux le système dans un état normal.

La fonction de diagnostic se décompose en deux fonctions élémentaires, la première c'est la *localisation* et l'autre c'est *l'identification des causes*.

1.2.4.1 Localisation : la localisation suit l'étape de détection ; elle a pour but de remonter à l'origine du défaut détecté.

1.2.4.2 Identification de défauts : la tâche d'identification a pour but de déterminer du type, de l'amplitude, de la localisation et des instants de détection des défauts.

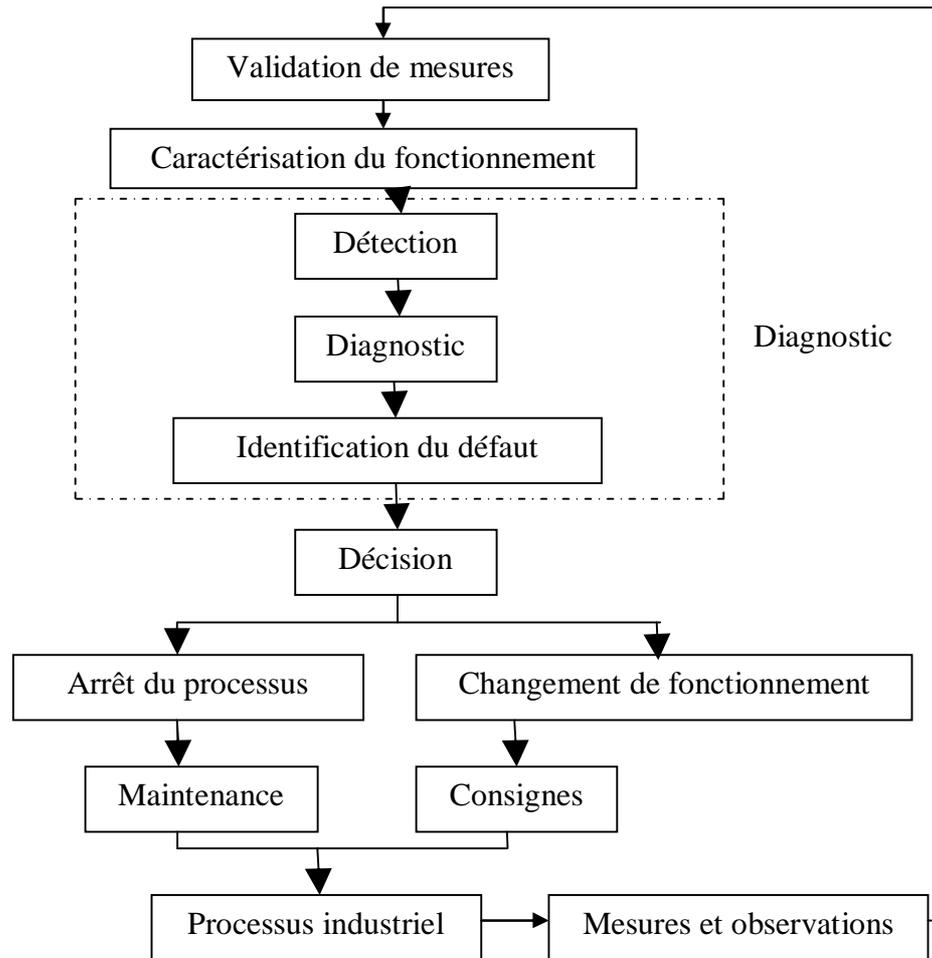


Figure 1.1 : Les phases de diagnostic [BOUZIDI 16].

1.3 Terminologie de diagnostic

Nous présentons dans ce paragraphe la définition des termes principaux utilisée dans le domaine du diagnostic.

Un défaut (fault) est considéré comme un écart du comportement normal. Il s'exprime par une déviation d'une propriété ou d'un paramètre caractéristique du procédé. Un défaut est donc une anomalie de comportement qui peut présager une défaillance à venir.

Selon [ZWINGELSTEIN 95] un défaut est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications.

Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

Une panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise. Elle provoque un arrêt complet du procédé.

- *Les pannes permanentes* peuvent être la conséquence du changement progressif des caractéristiques d'un composant.
- *Les pannes intermittentes* sont très souvent le prélude à une panne permanente et expriment une dégradation progressive des performances du procédé [ALEXANDRE06].
- *La détection des défauts* (fault detection) c'est la détermination des défauts et leurs instants de détection dans un système.
- *L'isolation des défauts* (fault isolation) consiste à déterminer le type de défaut, de la localisation et des instants de détection de ce dernier.
- *L'identification des défauts* est le fait d'estimer l'amplitude et l'évolution temporelle du défaut afin d'expliquer au mieux le comportement du système [GUILLAUME 05].

1.4 Classification des méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic utilisées dans l'industrie sont très variées. Leur principe général repose sur la comparaison entre les données observées au cours du fonctionnement du système et les connaissances acquises sur son comportement normal et ses comportements de défaillance [COMBACAU 91].

Les méthodes de diagnostic se distinguent selon la dynamique du procédé (discret, continu ou hybride), l'implémentation du diagnostic en ligne et/ou hors ligne, la nature de l'information (qualitative ou quantitative), ... En général ces méthodes sont divisées en deux catégories :

- Les méthodes externes (model-free methods) qui sont des méthodes soit à base de connaissance, soit des méthodes empiriques et/ou de traitement du signal.
- Les méthodes internes (model-based methods) qui représentent des méthodes à base de modèles quantitatifs et/ou qualitatifs.

1.4.1 Méthodes externes

Les méthodes externes considèrent le système comme une *boîte noire* et elles utilisent uniquement un ensemble de mesures et/ou de connaissances heuristiques sur le système. Elles n'ont besoin d'aucun modèle mathématique pour représenter le fonctionnement du procédé. Ces méthodes comprennent les méthodes à base de reconnaissance des formes, de réseaux de neurones, ou de systèmes experts.

1.4.1.1 Reconnaissance des formes

Ces méthodes reposent sur l'utilisation des algorithmes de classification des formes et des mesures (continues ou discrètes). Le fonctionnement d'un système de diagnostic par reconnaissance des formes se déroule en trois phases [DERBEL 09].

- Une phase d'analyse qui consiste à déterminer et à réduire l'espace de représentation des données et à définir l'espace de décision permettant de spécifier l'ensemble des classes possibles ;

- Une phase de choix d'une méthode de décision permettant de définir une règle de décision qui a pour fonction de classer les nouvelles observations dans les différentes classes de l'ensemble d'apprentissage ;
- Une phase d'exploitation qui détermine, en appliquant la règle de décision, le mode de fonctionnement du système en fonction de chaque nouvelle observation recueillie sur le processus.

1.4.1.2 Réseaux de neurones

Un réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques. Ils sont des outils particuliers adaptés pour aider les spécialistes de maintenance dans ces activités de reconnaissance et de classification. Pour ces raisons. De nombreuses études pilotes sont entreprises dans le secteur de maintenance pour évaluer les apports des réseaux de neurones avant leur mise en œuvre de façon opérationnelle.

Les réseaux de neurones sont des réseaux fortement connectés de processeur élémentaire fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit [TOUZET 92].

Un RNA se compose typiquement d'une couche d'entrée, d'une ou de plusieurs couches intermédiaires ou cachées et d'une couche de sortie, chaque neurone est connecté à d'autres neurones d'une couche suivante par des poids synaptiques adaptables. La figure 1.2 illustre le schéma général d'un neurone. Chaque nœud i calcule la somme de ses entrées (X_1, \dots, X_n) , pondérées par les poids synaptiques $(\omega_{i1}, \dots, \omega_{in})$ correspondants ; la valeur obtenue représente l'état interne du neurone μ_i . Ce résultat est transmis à une fonction d'activation F . La sortie y_i est l'activation du neurone [KEMPOWSKY 04].

Le modèle général du neurone est représenté par :

$$\mu_i = \sum_{n=1}^N \omega_{in} X_n \quad (1.1)$$

$$y_i = F(\mu_i) \quad (1.2)$$

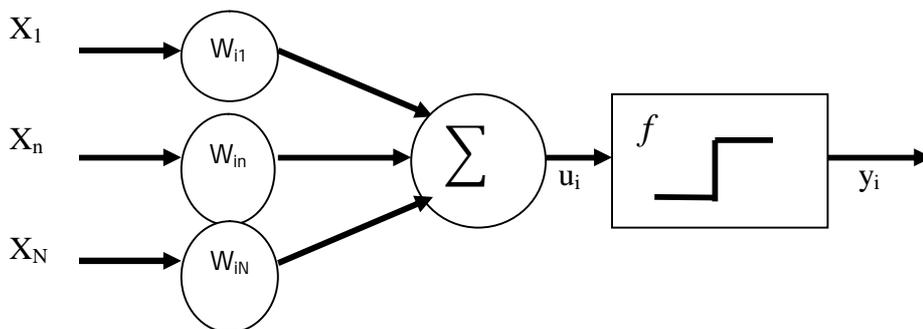


Figure 1.2 : Schéma général d'un neurone.

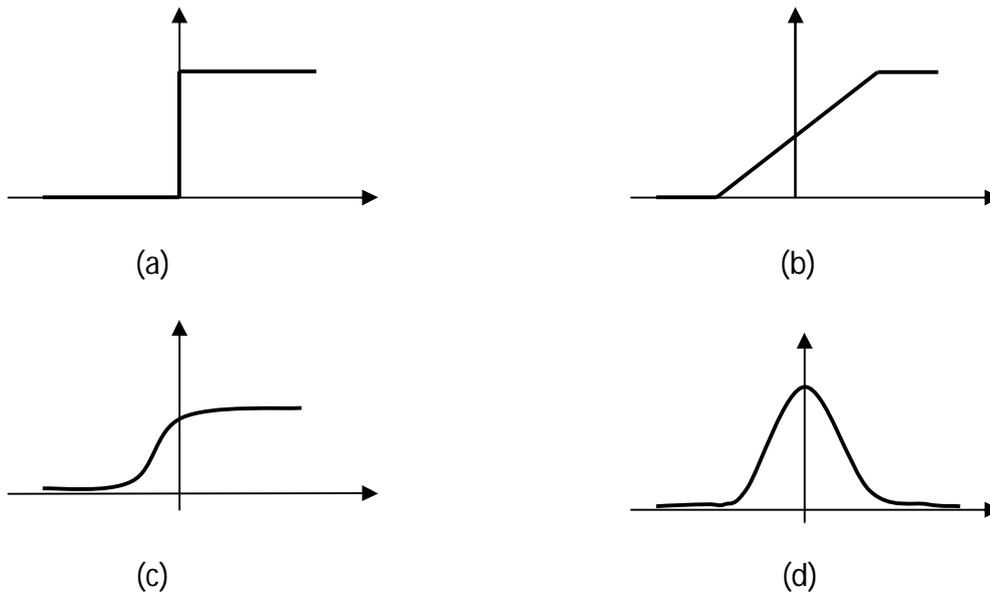


Figure 1.3 : fonction d'activation les plus utilisées : (a) fonction à seuil, (b) fonction linéaire, (c) fonction sigmoïde, (d) fonction gaussienne.

Le choix d'une fonction d'activation influe directement sur le réseau de neurones, c'est bien important de bien choisir pour l'obtention d'un modèle utile en pratique.

La fonction d'activation fait transformer un signal d'entrée dans un neurone à un signal de sortie (réponse). Les fonctions d'activation les plus utilisées sont présentées via la figure 1.3.

1.4.1.3 Systèmes experts

Un système expert utilise la connaissance correspondant à un domaine spécifique afin de fournir une performance comparable à l'expert humain. En général, les concepteurs des systèmes experts effectuent l'*acquisition de connaissances* grâce à un ou plusieurs interviews avec les experts du domaine. Les humains qui enrichissent le système avec leurs connaissances fournissent leur connaissance théorique ou *académique* et aussi des heuristiques qu'ils ont acquises grâce à l'utilisation de leurs connaissances [TOUZET 92].

La qualité première des systèmes experts réside dans leur efficacité au niveau temps de calcul. Le système doit simplement attendre les événements observables des règles pour *sauter* directement aux conclusions.

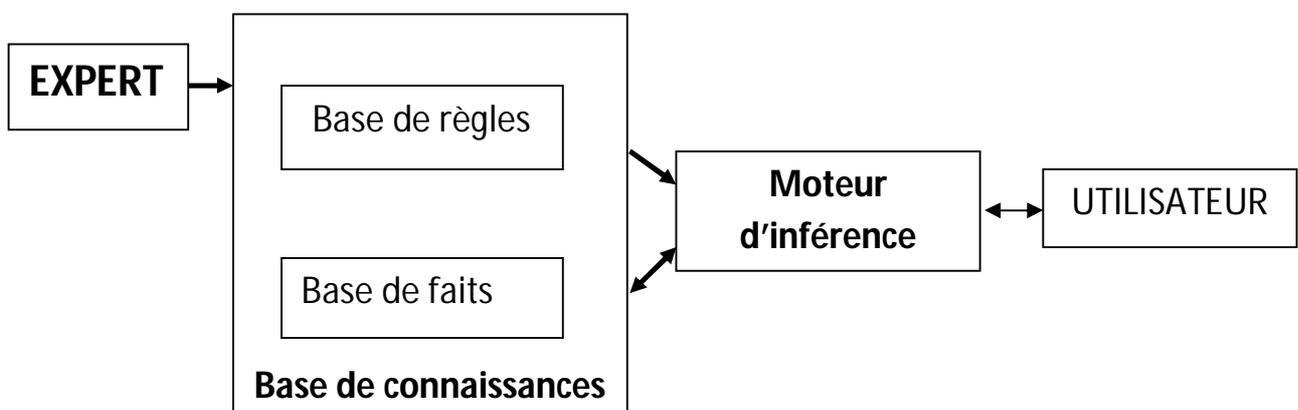


Figure 1.4 : Architecture d'un système expert.

Un système expert est composé de deux parties indépendantes [KEMPOWSKY 04] (voir Figure 1.4) :

- Une base de connaissance elle-même composé d'une base de règles qui modélise la connaissance du domaine considéré et d'une base de faits qui contient les informations concernant le cas traité,
- Un moteur d'inférences capables de raisonner à partir des informations contenues dans la base de connaissances, de faire des déductions,... etc. Au fur et à mesure que les règles sont appliquées des nouveaux faits se déduisent et se rajoutent à la base de faits.

1.4.2 Méthodes internes

Cette famille de méthodes est principalement dérivée de techniques utilisées par les automaticiens. À partir de modèles physiques ou de comportements validés par les techniques d'identification de paramètre, il devient possible de mettre en œuvre la méthode du problème inverse. Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou bien en utilisant de modèle de type **boîte noire**.

Elles impliquent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques qui devront être obligatoirement validés expérimentalement avant toute utilisation industrielle. Les méthodes de diagnostic internes se regroupent en trois grandes familles : méthodes de modèle, méthodes d'identification de paramètre et les méthodes d'estimation du vecteur d'état.

1.4.2.1 Méthodes de modèle

Cette méthode consiste à comparer les grandeurs déduites d'un modèle représentatif du fonctionnement des différentes entités du processus avec les mesures réelles directement observées sur le processus industriel.

1.4.2.2 Méthodes d'identification de paramètre

Cette méthode s'applique dans les cas particuliers où l'on souhaite suivre l'évolution de certains paramètres physiques critiques pour le fonctionnement et qui ne sont pas mesurables directement [BDIRINA 06].

1.4.2.3 Méthodes d'estimation du vecteur d'état

La généralisation du principe de diagnostic de défaillance par la méthode de l'identification de paramètre a été rendue possible en considérant les modèles physiques d'un processus sous la forme d'équations d'état. Pour les systèmes à plusieurs entrées et à plusieurs sorties.

Le modèle est constitué par un ensemble de n équations différentielles du premier ordre. Les n composantes du vecteur d'état x forment un espace à n dimensions appelées espace d'état.

Grâce à cette représentation d'état il est possible de connaître tous les états internes du processus. L'intérêt de cette représentation réside dans sa généralité.

Elle peut être utilisée aussi bien pour les systèmes monovariables que multivariables. Les méthodes de diagnostic par les techniques du vecteur d'état sont performantes à la condition expresse que la structure du modèle reflète exactement le comportement du système. Dans le cas contraire les résultats des estimations sont à prendre avec beaucoup de précautions. Elles ont fait leurs preuves principalement dans les domaines du spatial et de l'aéronautique où les modèles de la dynamique du vol sont parfaitement connus.

1.4.2.4 Méthodes des résidus

L'objectif du résidu est d'être sensible aux défauts. En cas d'absence de défaillance (fonctionnement normal), les résidus doivent avoir une valeur nulle. En présence d'un défaut, le résidu aura une valeur non nulle [Tatiana 04].

Les résidus représentent des changements (divergences) entre le comportement réel du processus et celui prévu par le modèle estimé. Le principe général pour la génération des résidus est illustré sur la figure ci-dessous.

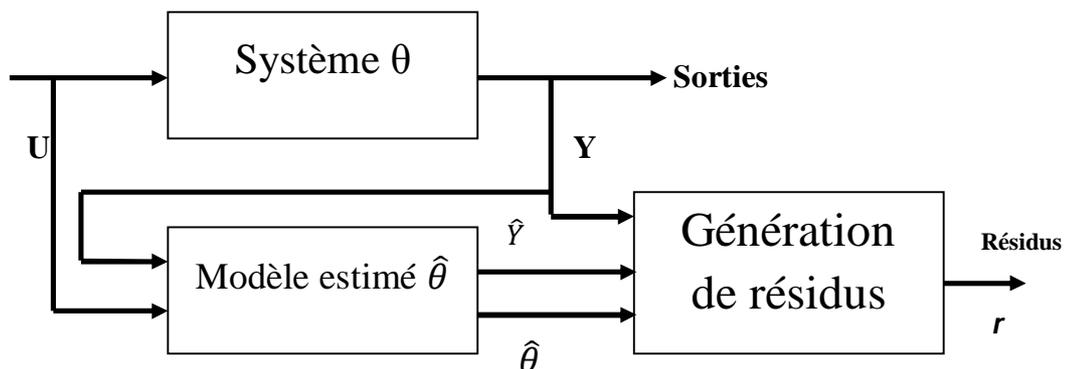


Figure 1.5 : Principe de génération des résidus

Les techniques les plus utilisées pour la génération des résidus sont : les équations de parité, estimation d'état à partir d'observateurs ou filtres de KALMAN, Estimation paramétrique et analyse structurelle.

1.4.2.4.1 Espace de partie

Les méthodes du type d'équations de parité reposent sur la vérification d'une relation statique ou dynamique qui relie les mesures. L'espace de parité peut être vu comme l'espace des résidus possibles. Il est défini comme l'orthogonal de la matrice d'observabilité, ce qui revient à éliminer l'influence de l'état sur le résidu [CHRISTOPHE 00].

1.4.2.4.2 Observateur

Les méthodes de génération de résidus construites à l'aide d'observateurs reposent sur une estimation de l'état. Un observateur d'ordre réduit à ne considérer qu'une partie du système, donc à estimer une partie de l'état et à éliminer l'autre. Par ailleurs, l'estimation d'une partie du système peut être utilisée pour rejeter les perturbations (découplage direct).

1.5 Conclusion

Nous avons décrit toutes les méthodes nécessaires de diagnostic pour l'identification de la cause exacte d'une défaillance, nous avons vu que deux grandes familles de méthode sont disponibles pour l'aide au diagnostic : les méthodes internes qui sont basées sur une connaissance profonde du fonctionnement et les méthodes externes (l'intelligence artificielle, reconnaissance de formes...) à la condition expresse de disposer d'un retour d'expérience riche et parfaitement documenté.