

Chapitre 1 : Généralités et Définitions

La mise en place ou l'amélioration d'un système d'entretien préventif et prédictif doit être vue comme un effort visant à augmenter la disponibilité et la fiabilité des équipements de procédé par la prévention et la détection des problèmes et par le remplacement des composantes avant les arrêts imprévus d'équipement. La maintenance prédictive est tout d'abord un outil de gestion. Elle fournit des données sur la condition d'un équipement. On utilise ces données par la suite pour déterminer si des activités de maintenance corrective sont requises sur l'équipement. La maintenance prédictive est privilégiée parce que, si bien utilisée, elle apporte une contribution essentielle à la sûreté de fonctionnement d'un système industriel et elle peut réduire de façon significative les coûts du programme de maintenance préventive.

Dans ce chapitre on va de définir ce que sont une fonction et un service de maintenance et le rôle qui doit jouer cette maintenance dans la sûreté de fonctionnement et l'analyse du terme diagnostic, tout en rappelant la terminologie adoptée des différents termes liés au diagnostic, et des définitions sur les différentes étapes d'une procédure de diagnostic industriel.

I. La maintenance

Le rôle principal d'un service maintenance est de maintenir les capacités opérationnelles des moyens de production, ainsi que leur valeur patrimoniale. Les capacités opérationnelles sont nécessaires pour servir une commande lorsque le client l'exige, et non quand l'entreprise pourra la servir. La valeur patrimoniale peut s'envisager comme l'allongement de la durée de vie utile des machines et équipements, ce qui repousse ou annule la nécessité d'un nouvel investissement, où en facilite la revente.

Un service de maintenance peut également être amené à participer à des études d'amélioration du processus industriel, et doit, comme d'autres services de l'entreprise, prendre en considération de nombreuses contraintes comme la qualité, la sécurité, l'environnement, le coût, etc.

I.1 Les différentes formes de maintenance

On distingue différents types de maintenance appelée parfois stratégies de maintenance résumées dans a figure 1 suivante

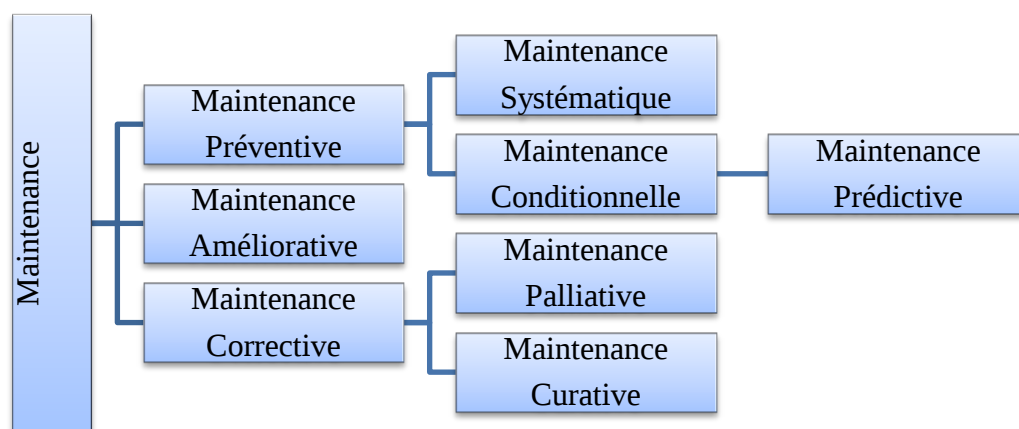


Figure 1 : Les types de maintenance

A. Maintenance corrective

Maintenance exécutée après détection d'une panne. Destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Elle s'exécute sous deux formes :

a- Maintenance curative

C'est une Forme d'entretien visant à rétablir l'opération normale d'un objet, en réparant les composants qui font défaut soit par: bris, panne, etc. C'est un cas particulier de réparation. Les signalements en service génèrent de l'entretien et la remise en état déclenché par une panne. Elle s'effectue après une défaillance par dépannage ou réparation.

b- Maintenance palliative

Maintenance exécutée d'une manière provisoire après détection d'une panne (dépannage provisoire en attendant) ;

B. Maintenance préventive

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance du fonctionnement d'un bien. Elle s'exécute sous deux formes :

a- Maintenance systématique

Entretien programmé selon une périodicité définie sur instruction du constructeur, en fonction de la durée de vie statistique des pièces d'usure et de la fiabilité d'exploitation théorique recherchée afin d'en réduire le coût.

b- Maintenance conditionnelle

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent.

b-1 Maintenance prédictive

C'est un entretien programmé suite à l'évolution d'indicateurs de surveillance en établissant un référentiel lors de la première mise en service de l'équipement à l'état neuf (Relevés des paramètres de fonctionnement, réalisation d'essais électriques, analyses des huiles diélectriques et chromatographiques des gaz dissous dans l'huile, contrôles thermo graphiques et mise en œuvre des signatures vibratoire et acoustique), diagnostic de l'état de l'équipement.

Dans cette forme de maintenance, on prévoit les dates d'intervention sûre (avant la panne) pour la mise en place des solutions techniques visant à éliminer des problèmes; et à améliorer le rendement de l'entreprise industrielle.

C. Maintenance améliorative

La maintenance amélioratrice a pour but d'optimiser le rendement des équipements industriels par la maîtrise totale des performances. Les activités conduites dans ce cadre permettent d'anticiper les défaillances et les incidents et de réduire les temps techniques de réparation. Elles amènent aussi à des modifications permettant d'améliorer la sécurité des biens et des personnes. (Optimiser les coûts liés à la maintenance).

I.2 Surveillance et supervision

Niveau qui interface un système physique partiellement ou totalement automatisé au système de décision partiellement ou totalement informatisé. La conception d'une supervision performante repose sur la combinaison des techniques de surveillance et de diagnostic.

Surveillance : tâche continue en temps réel dont le but est de caractériser le mode de fonctionnement du système physique, en enregistrant des informations, en reconnaissant et en indiquant les anomalies de comportement.

De manière simple : la surveillance consiste à détecter le comportement présent du système en différenciant entre plusieurs états (normal et défaillant) du processus et le diagnostic est l'identification de la nature du dysfonctionnement, d'une difficulté.

I.2.1 Techniques de surveillance

Deux types de redondance peuvent être distingués : la redondance matérielle et la redondance analytique.

Cette redondance est utilisée pour effectuer des tests de cohérence de ces informations. L'incohérence entre les différentes informations d'une même grandeur est révélatrice d'un éventuel dysfonctionnement du système.

A. La redondance matérielle

Avant l'apparition des techniques utilisant le modèle du processus ou les informations disponibles sur le processus, pour le besoin en diagnostic, la redondance peut être assurée au moyen de mesures supplémentaires, d'où le nom de la redondance matérielle. Cette première approche traditionnelle dite redondance matérielle consiste à doubler, tripler voire quadrupler certains composants (actionneurs, capteurs) pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière. Un principe de vote est appliqué sur les valeurs redondantes pour décider si un défaut est présent ou non.

Un composant critique, un capteur par exemple, est alors triplé et une procédure de vote majoritaire permet de savoir lequel est en défaut ou non.

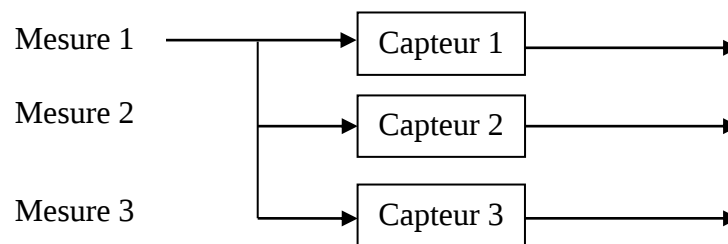


Figure 2 : Schéma représentant la redondance matérielle triple

La redondance matérielle est très répandue dans les systèmes à haut risque technologique c'est-à-dire les domaines où la sûreté de fonctionnement est cruciale pour la sécurité des personnes et de l'environnement, comme dans l'aéronautique et le nucléaire.

Cette redondance matérielle a l'avantage d'être fiable et donne un rendement élevé, mais s'avère coûteuse et encombrante. Afin de pouvoir isoler le défaut, la redondance matérielle doit être d'ordre impair. De plus, le diagnostic se limite à la surveillance des éléments redondants (capteur, actionneurs,...) présents sur une installation. A l'aide de cette unique technique, il ne sera pas possible de détecter de défauts survenant sur des éléments non redondants.

B. La redondance analytique

La deuxième approche est dite redondance analytique. En effet, les progrès réalisés dans le domaine des calculateurs permettent aujourd'hui la mise en œuvre des méthodes modernes de l'automatique et de l'intelligence artificielle. Ces nouvelles approches permettent d'éliminer en partie, voire même en totalité, la redondance matérielle pour le diagnostic.

Ce complément à la redondance matérielle consiste à exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces contraintes peuvent souvent s'exprimer sous la forme de relations analytiques liant les variables connues.

Ces relations sont appelées relations de redondances analytiques et la génération de telles relations permet d'engendrer des résidus.

Une équation de redondance analytique est une équation dans laquelle toutes les variables sont connues. Les méthodes basées sur cette approche sont plus simples, plus flexibles, moins coûteuses et plus écologiques que l'approche traditionnelle.

Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à diagnostiquer. Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour le diagnostic sont appelées méthodes à base de modèle.

Tableau 1 : Comparaison de la redondance

Redondance matérielle	Redondance analytique
Très fiable	Moins fiable
Très coûteuse	Moins coûteuse
Occupe beaucoup de place	Moins de place occupée

II. Les terminologies

Les terminologies les plus utilisées dans le domaine du diagnostic sont les suivantes.

II.2 Défaut :

C'est un changement inattendu d'au moins une période caractéristique ou un paramètre du système qui peut dégrader les performances de ce système et représente l'écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence.

II.3 Erreur :

C'est une partie du système ne correspondant pas ou correspondant incomplètement au cahier des charges. Une erreur est la conséquence d'une faute. L'erreur est latente tant que la partie erronée du système n'est pas sollicitée. Elle devient effective au moment de la sollicitation de la partie erronée.

II.3 Faute :

C'est une action, volontaire ou non, dont le résultat est le non prise en compte correcte d'une directive ou d'une contrainte exprimée par le cahier des charges.

II.4 Défaillance :

Selon la norme AFNOR :

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa (ou ses) fonction(s) requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques. En effet, une défaillance conduit à un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique constatée et la caractéristique spécifiée. Inversement, un défaut n'induit pas nécessairement une défaillance. Par ailleurs, le système peut très bien conserver son aptitude à assurer sa mission principale si les défauts affectant les systèmes et ses composantes n'ont pas d'impacts significatifs sur la mission principale.

II.5 Défaillance :

Selon la norme

Donc, la défaillance c'est une interruption permanente, ou une détérioration complète d'un composant ou d'un système et l'incapacité totale de celui-ci à remplir une fonction spécifique. Une défaillance est une situation plus grave qu'une faute ou qu'un défaut. Lorsque le défaut se produit dans un actionneur par exemple, ce dernier est encore utilisable, mais peut avoir une réponse plus lente ou devenir moins efficace. Par contre, lorsqu'une défaillance se produit, un actionneur totalement différent est nécessaire pour pouvoir produire l'effet désiré.

II.6 Panne :

Est l'état d'un système incapable d'assurer le service spécifié à la suite d'une défaillance ou l'inaptitude d'un composant à accomplir une fonction requise. En effet, une panne résulte toujours d'une défaillance, et donc d'un défaut.

II.7 Dégradation :

C'est une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement.

Défaut $\Rightarrow$ Erreur $\Rightarrow$ Faute $\Rightarrow$ Défaillance $\Rightarrow$ Panne $\Rightarrow$ Dgradation

- une faute active produit une erreur latente,
- une erreur latente devient effective après son activation,
- la défaillance survient quand une erreur affecte le système.

Un exemple pratique de la maintenance

- la conséquence d'un court-circuit dans un contacteur est **une faute**,
- la commande de ce contacteur collé donne une **erreur**,
- la non délivrance du produit devient une **défaillance**,
- Vérifier le niveau d'huile sur les transformateurs par le prélèvement ponctuel s'avère **une routine de vérification**,

- Effectuer une vérification et nettoyage des ventilateurs du transformateur tous les 6 mois est **un entretien préventif périodique**,
- Remplacer un disjoncteur par un autre compatible ou par occasion de secours, **constitue une opération de dépannage**,
- Changer les balais d'une génératrice synchrone **constitue une réparation**
- La fusion d'un fusible entraîne une **maintenance corrective**,
- Remplacer les isolateurs du transformateurs de puissance quand s'éclaire, au tableau de bord, la lampe témoin du **relais buchholz** indiquant un défaut diélectrique **constitue une opération d'entretien préventif conditionnel**,
- Effectuer le changement d'huile des transformateurs chaque fois qu'il aura la présence de furane dans l'huile, témoignant d'une dégradation de l'isolation **un entretien préventif systématique**.

II.8 Résidu :

C'est un indicateur de défauts basé sur la déviation entre les mesures et les calculs basés sur un modèle. En présence des défauts, le résidu s'écarte significativement de la valeur nulle et il sera égal à zéro lorsque le système fonctionne normalement.

III. Classification des défauts

Les défauts qui affectent un système industriel sont classés selon leur emplacement, leur modélisation ou leurs caractéristiques temporelles. Les défauts apparaissent dans les différentes parties d'un système, ils sont classés selon leur emplacement en trois catégories

III.1 Classification selon leur localisation

Ces défauts peuvent être aussi répartis en trois classes selon la partie du système défaillante :

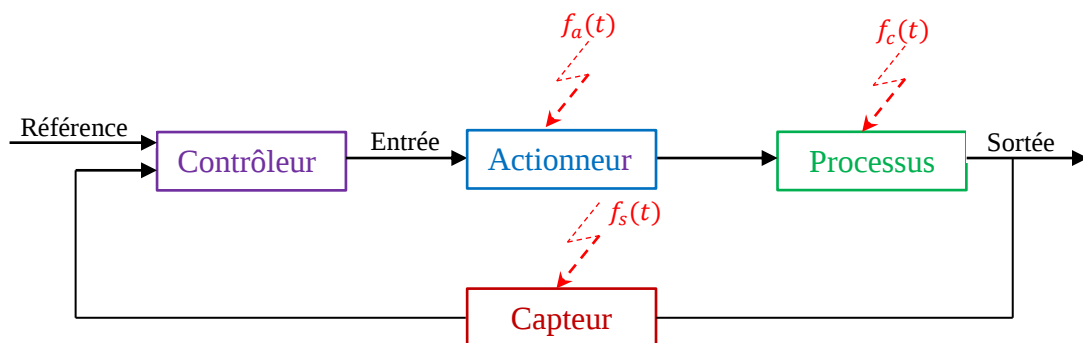


Figure 3 : Type de défaut selon leur localisation

A. Les défauts composants ou systèmes

Ce sont des défauts qui affectent les composants du système lui-même. Ces défauts ne peuvent être considérés comme défauts de capteur ou d'actionneur, ils sont classés de manière arbitraire dans cette catégorie. Ces défauts peuvent engendrer des changements des paramètres du système, ce qui entraîne des changements du comportement dynamique du système. Néanmoins, un défaut composant résulte de la casse ou de l'altération d'un composant du système réduisant les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit (une machine est cassée, un bras manipulateur est déformé, ...).

B. Les défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale (défaillance) ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Une perte totale d'actionneur peut se produire suite à la coupure d'un fil électrique qui relie l'actionneur au système de commande par exemple. Une perte partielle peut se présenter sous la forme d'une chute de tension électrique ou une diminution de la vitesse de rotation du rotor ou une fuite hydraulique.

$$u_a^i(t) = \begin{cases} u_c^i(t) & \text{Sana défaut} \\ k_i(t)u_c^i(t) & 0 < \varepsilon_i < k_i(t) < 1 \quad \forall t \geq t_F \quad \text{Perte d'efficacité} \\ 0 & \forall t \geq t_F \quad \text{Oscillation} \\ u_c^i(t_F) & \forall t \geq t_F \quad \text{Blocage} \\ u_{i \min} \vee u_{i \max} & \forall t \geq t_F \quad \text{Saturation} \end{cases}$$

Avec

$u_a^i(t)$ est le signal de sortie de l'actionneur ; $u_c^i(t)$ est le signal de commande appliqué à l' $i^{\text{ème}}$ actionneur ; t_F désigne le temps d'occurrence d'un défaut à l' $i^{\text{ème}}$ actionneur ; k_i est l'efficacité de l'actionneur, $\varepsilon_i > 0$ est l'efficacité minimale ; $u_{i \min}$ et $u_{i \max}$ sont respectivement les limites supérieures et inférieures du signal de sortie de l' $i^{\text{ème}}$ actionneur.

C. Les défauts capteurs

Un défaut capteur est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un capteur défectueux donne une mesure qui n'a aucune relation avec la vraie valeur de la variable. Ce type de défaut peut être partiel ou total. Un défaut capteur partiel peut se traduire par des mesures biaisées par exemple. Un capteur non étalonné peut être considéré comme exemple de capteur partiellement défectueux. La redondance matérielle peut être utilisée pour résoudre les problèmes liés aux mesures données par des capteurs défaillants.

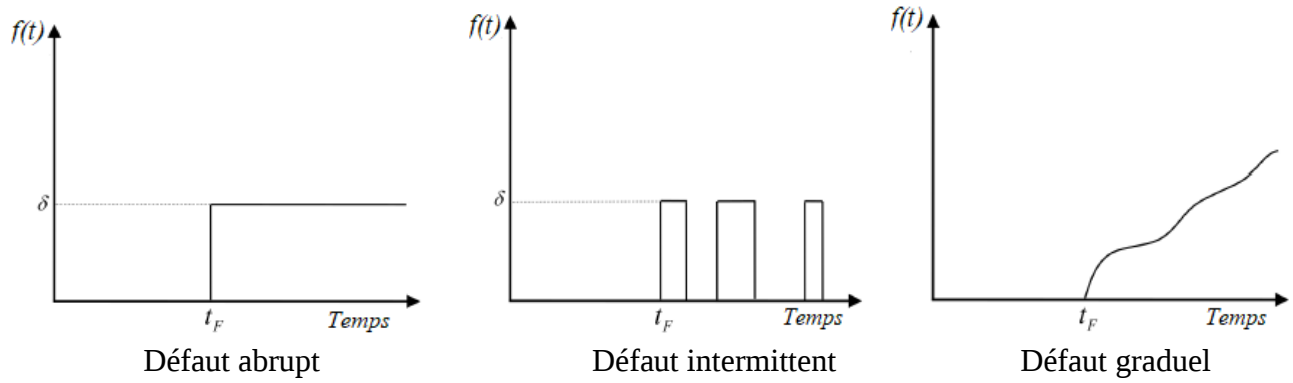
Les équations mathématiques de ces défauts sont comme suite :

$$y_i(t) = \begin{cases} x_i(t) & \forall t \geq t_0 \quad \text{Sana défaut} \\ x_i(t) + b_i(t) & b_i(t) = 0, \quad b_i(t_F) \neq 0 \quad \text{Biais} \\ x_i(t) + b_i(t) & |b_i(t)| = c_i(t), 0 < c_i < 1 \quad \forall t \geq t_F \quad \text{Dérive} \\ x_i(t) + b_i(t) & |b_i(t)| \leq \bar{b}_i, \dot{b}_i(t) \in L^\infty, \quad \forall t \geq t_F \quad \text{Perte d'efficacité} \\ x_i(t_F) & \forall t \geq t_F \quad \text{Blocage} \\ k_i(t)x_i(t) & 0 < k \leq k_i(t) \leq 1 \quad \forall t \geq t_F \quad \text{Défaut de calibrage} \end{cases}$$

Avec t_F c'est le temps d'occurrence d'un défaut pour l' $i^{\text{ème}}$ capteur et b_i désigne sa précision où $b_i \in [-\bar{b}_i, \bar{b}_i]$ avec $\bar{b}_i > 0$. En plus, $k_i \in [\bar{k}_i, 1]$ avec $\bar{k}_i > 0$ représente l'efficacité minimale du capteur.

III.2 Classification selon leur nature ou temporelle

Les défauts peuvent être classés selon leurs natures, c'est à dire la façon et la gravité avec lesquelles ils appariaient. Ils sont de type abrupt (*brusque* ou *biais*), intermittent (*valeurs aberrantes*) ou graduel (*progressifs* ou *dérives*) comme la montre la figure 4 suivante.

Figure 4 : Type de défaut selon leur nature pour $\delta = cte$

A. Défauts abrupt

Ils se produisent instantanément souvent à la suite d'un dommage matériel. Ces défauts peuvent être très graves, car, s'ils affectent les performances et/ou la stabilité du système en boucle fermée, alors, une réaction rapide du système de commande est nécessaire.

La caractéristique principale de ce type de défauts est la discontinuité dans l'évolution temporelle de la variable. Cette évolution, si elle ne correspond pas aux évolutions dynamiques normales attendues pour la variable (changement de consigne), est caractéristique d'une panne brutale de l'élément en question : arrêt total ou partiel.

Une représentation mathématique de ce défaut est donné par :

$$f(t - t_F) = \begin{cases} \delta & \text{si } t \geq t_F \\ 0 & \text{si } t < t_F \end{cases}$$

Où $f(t - t_F)$ est le comportement temporel du défaut et δ est un seuil constant.

B. Défauts intermittents

Ce sont des défauts qui apparaissent et disparaissent à plusieurs reprises. Ils représentent également un cas particulier de défauts abrupts sur un capteur avec perte aléatoire de signal avec la propriété particulière qu'ils reviennent d'une façon aléatoire à leurs valeurs normales. Il s'agit d'un type de défauts caractéristiques de faux contacts ou de pannes intermittentes de capteurs ou un câblage partiellement endommagé.

C. Graduels

Ce type de défauts représente est caractérisé par des changements lents ou d'un encrassement ou d'une dérive des valeurs paramétriques qui résultent souvent d'un vieillissement du procédé. Il s'agit de défauts très difficiles à détecter, car leurs évolutions temporelles sont les mêmes que celles d'une modification paramétrique lente représentant une non stationnarité du système, mais ils sont également moins graves. Cependant, si ces défauts ne sont pas pris en charge le plus rapidement possible, ils risqueront de conduire le système à une situation plus dramatique.

$$f(t - t_F) = \begin{cases} \delta(1 - e^{-\alpha(t-t_F)}) & \text{si } t \geq t_F \\ 0 & \text{si } t < t_F \end{cases}$$

III.3 Classification selon la modèle

En plus, suivant la manière dont les défauts sont modélisés, ils sont classés comme additif ou multiplicatif, comme la montre la figure 5 suivante.

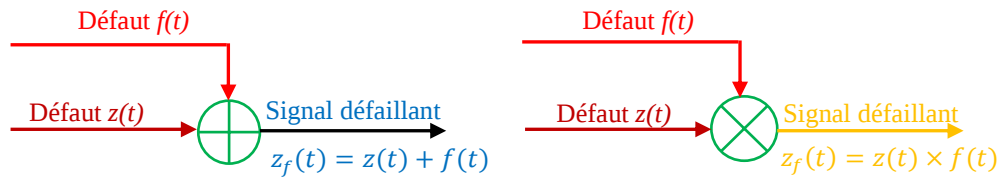


Figure 5 : Défauts additifs et Multiplicatifs

IV Diagnostic

Suivant la norme *AFNOR*, le **diagnostic** est défini par l'ensemble d'actions à évaluer un système et identifier la cause probable des défauts ou défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test de son fonctionnement. Un système est dit **diagnosticable** s'il est susceptible d'être soumis à un diagnostic, il doit alors être muni d'organes d'observation (Capteurs) et d'un système d'analyse pour étudier les informations fournies.

Le diagnostic consiste à détecter, localiser et éventuellement identifier les défauts qui affectent un système.

IV.1 Détection

Premier niveau du diagnostic consiste à prendre une décision binaire : soit le système fonctionne correctement, soit une panne s'est produite. Le résultat de la procédure de détection est une alarme signifiant que le fonctionnement réel du système ne concorde plus avec le modèle de fonctionnement sain.

IV.2 Localisation

Deuxième niveau du diagnostic, déclenché par une procédure de détection, consistant à déterminer de manière plus approfondie les composants défaillants : capteur, actionneur, processus ou unité de commande.

IV.3 Identification

L'identification d'un défaut est le fait d'estimer l'amplitude et l'évolution temporelle du défaut afin d'expliquer au mieux le comportement du système. Cette partie d'identification du défaut est la dernière phase de la procédure de diagnostic.

IV.4 Prise de décision

Une fois le fonctionnement incorrect du système constaté, il est primordial d'agir de façon à maintenir les performances souhaitées ou à limiter les dégradations sur le système réel. Cette prise de décision permet de choisir entre plusieurs options comme arrêter le système pour faire de la maintenance ou accepter un fonctionnement dégradé. Il peut encore s'agir, quand cela est possible, de reconfigurer ou de réorganiser le système.

IV.5 Performance d'une procédure de diagnostic

Comment s'assurer que le système de diagnostic développé soit le plus performant possible ?

Pour répondre à une telle question, il convient tout d'abord de définir en vertu de quels critères le système peut être évalué. D'une manière générale, nous pouvons regrouper les différents critères de performance du système de détection de la manière suivante:

- La détectabilité,
- L'isolabilité,
- La sensibilité,
- La robustesse,
- Le coût économique,
- Le temps de développement

La Détectabilité est l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir déceler la présence d'une défaillance sur le procédé. Elle est fortement liée à la notion d'indicateurs de défauts (résidus) : le générateur de résidu doit, d'une certaine manière, être sensible à la défaillance que l'on souhaite détecter.

L'isolabilité est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut. Une alarme engendre bien souvent de nouvelles alarmes et il devient dès lors difficile de retrouver l'organe défaillant. La propriété d'isolabilité est liée à la structure des résidus et à la procédure de détection elle-même.

La sensibilité caractérise l'aptitude du système à détecter des défauts d'une certaine amplitude. Elle dépend non seulement de la structure des résidus mais aussi du rapport de l'amplitude du bruit de mesure avec celle du défaut.

La robustesse détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation (sensibilité du résidu aux défauts et insensibilité vis-à-vis des perturbations). Généralement, la robustesse est définie par rapport à toutes les entrées inconnues.

En pratique, d'autres critères sont à prendre en considération. En phase d'industrialisation, les contraintes ergonomiques et économiques sont essentielles. La rapidité de détection peut être un facteur déterminant. De même, les coûts économiques vont conditionner la stratégie de diagnostic : le système nécessite-t-il des composants trop chers pour sa conception, le temps de développement est-il trop important ? Autant de points à vérifier afin de satisfaire le cahier des charges.

IV.6 Fonctions du diagnostic

Les fonctions du diagnostic peuvent se résumer comme suit :

- observer les symptômes de la défaillance,
- identifier la cause de la défaillance,
- prévoir la défaillance.

Le diagnostic joue un rôle primordial permettant d'assurer la sûreté de fonctionnement.

Une détection rapide ou précoce permet d'augmenter la disponibilité et la productivité des capitaux investis dans l'outil de production.

- Diagnostic = Capteur informatique intelligent
- *DID* ou *FDI* = Détection et isolation des défauts (*Fault Detection and Isolation*)
- *CTP* ou *FTC* = Contrôle tolérant aux pannes (*Fault Tolerant Control*)