

**Unité d'enseignement: UED 1.1**  
**Matière : Diagnostic des Systèmes**  
**Crédits : 1**  
**Coefficient : 1**

## **Matière : Diagnostic des Systèmes**

### **Chapitre 1 : Introduction aux techniques de diagnostic de panne**

#### **1. INTRODUCTION**

##### **A quoi ça sert un diagnostic ?**

Le diagnostic est un raisonnement menant à l'identification de la cause (l'origine) d'une défaillance ou d'un problème, à partir de symptômes relevés par des observations, des contrôles ou des tests.

L'objectif de ce cours est de présenter les outils et méthodes nécessaires à la conception d'un **système de diagnostic** pour des processus industriels. Le rôle essentiel d'un système de **diagnostic** est de **détecter** et de **localiser** un **défaillance** avant que celui-ci ne conduise à une défaillance grave du système (FDI : Fault Detection and Isolation). La mise en œuvre de ce type de méthode contribue donc à la sûreté de fonctionnement et la disponibilité de l'installation.

##### **C'est quoi un diagnostic ?**

##### **Système Physique**

Un système est une entité est un ensemble d'éléments (e.g. composants : *partie du système (e.g. un élément de base) choisie selon des critères liés à la modélisation*) inter-connectés possédant éventuellement une (ou plusieurs) entrées (excitation), et éventuellement une (ou plusieurs) sorties (réponse), pour réaliser une fonction ( $\Phi$ ). Des signaux de perturbations (ou des fautes) sont des entrées particulières du système qui ne sont pas, par définition, contrôlable, mais qui affecte le comportement du système.

#### **2. Définitions - Diagnostic**

- « C'est l'analyse ou l'examen d'un ensemble de facteurs ou de symptômes, visant à établir les causes d'un éventuel désordre ou l'état d'usure d'un composant, afin de déterminer la durée de vie restante de ce dernier, de prévoir les opérations de maintenance à exécuter, ou de choisir les mesures à prendre pour y remédier ».
- « C'est l'opération qui permet d'identifier la cause d'une panne/défaillance à l'aide d'un raisonnement logique s'appuyant sur des schémas fonctionnels, des tests, des tableaux récapitulatifs de pannes ou des systèmes experts ».

- L'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière.

Cette fonction se décompose en deux fonctions élémentaires : *localisation* et *identification*. A partir de l'observation d'un état de panne, la fonction diagnostic est chargée de retrouver la faute qui en est à l'origine. Ce problème est difficile à résoudre. En effet si, pour une faute donnée, il est facile de prédire la panne résultante, la démarche inverse qui consiste à identifier la faute à partir de ses effets, est beaucoup plus ardue. Une défaillance peut généralement être expliquée par plusieurs fautes. Il s'agit alors de confronter les observations pour fournir la bonne explication (Figure 1).

- *Localisation* : la localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant.

- *Identification de la cause* : Cette dernière étape consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale ; Ces causes peuvent être internes (sous-ensembles défaillants faisant partie de l'équipement), ou bien externes à l'équipement.

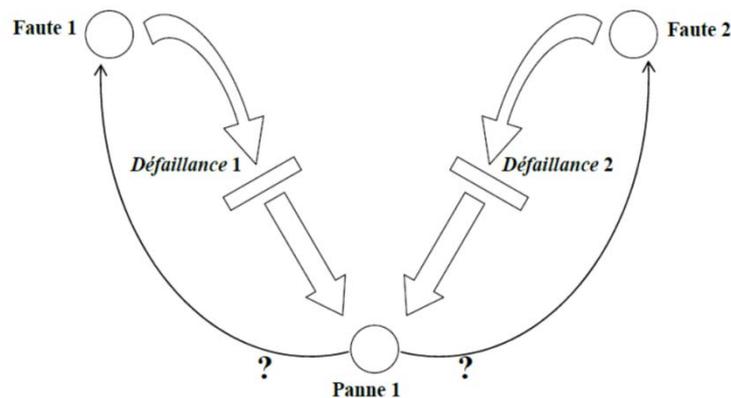


Figure 1. Difficulté du diagnostic. Deux fautes conduisent à la même panne ce qui complique l'opération inverse, en l'occurrence le diagnostic.

### Fonctionnement normal

Le comportement de référence d'un système (fonctionnement normal et donc de ces composants) est bien adapté dans le sens où il peut être dans différents mode de fonctionnement. Notamment, celui-ci est susceptible d'évoluer entre des modes de fonctionnement « *normaux* », *défaillants*, ou servir de support à la propagation de pannes dans le système.

**Definition [Mode « normal »]** : Combinaison de fonctions d'une entité simultanément requises.

- le non-fonctionnement d'un système pendant lequel celle-ci n'accomplit aucune fonction. Il peut être défini un (ou des) mode(s) de fonctionnement dégradé(s) dans le(s)quel(s) certaines fonctions peuvent être soit indisponibles, soit disponibles avec des caractéristiques dégradées.

## Dégradation

Une dégradation représente une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement.

Si les performances sont au-dessous du seuil d'arrêt défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, il n'y a plus dégradation mais *défaillance*.

## Défaillance :

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble (de composants) à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques. [Norme AFNOR : X60-500].

On peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

- *Défaillance critique* : nécessite une intervention d'urgence,
- *Défaillance significative* : nécessite un processus de traitement,
- *Défaillance absorbable* : pouvant être ignorée dans un premier temps.

Après défaillance, le système est en état de *panne*.

## Panne :

Une panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise suite à l'apparition d'une défaillance.

- Une défaillance est un passage d'un état à un autre, par opposition à une panne qui est un état.
- Une panne résulte toujours d'une défaillance.

Si nous écartons la possibilité d'erreurs de conception, la définition précédente implique que toute défaillance entraîne une panne. La défaillance correspond à un événement et la panne à un état. Sur le plan temporel, la défaillance correspond à une date et la panne à une durée comprise entre la date d'occurrence de la défaillance et la date de fin de réparation.

## Défaut :

Une défaillance est atteinte suite à l'occurrence d'un défaut.

- Défaut : trace d'une erreur dans le système
- Erreur : manifestation d'une faute dans le système

➤ Un défaut est donc une anomalie de comportement qui peut présager d'une *défaillance* à venir.

Il peut se définir par :

- Tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence, lorsque celui-ci est en dehors des spécifications [AFNOR, 1994].

- N'importe quel état indésirable d'un composant ou d'un système. Un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance [IEEE, 1988].
- Déviation non permise d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système des conditions acceptables ou (et) standards.
- Un défaut est une anomalie de comportement au sein d'un système physique localisée au niveau d'un composant.

Dans tous les cas, le défaut correspond à un événement qui modifie le fonctionnement du système : les performances du système sont dégradées ou les objectifs ne sont pas atteints. A la suite d'un défaut, il apparaît, en général, des symptômes, tels que qualitatifs, modification des signaux, évolution de caractéristiques.....

➤ *Les défauts incluent les défaillances mais la réciproque n'est pas vraie.*

### **Mode de fonctionnement**

Un système présente généralement plusieurs modes de fonctionnement. On peut observer des modes de plusieurs types parmi lesquels :

- **Mode de fonctionnement nominal** : c'est le mode où l'équipement ou le système industriel remplit sa mission dans les conditions de fonctionnement requises par le constructeur et avec les exigences attendues de l'exploitant.
- **Mode de fonctionnement dégradé** : qui correspond soit à l'accomplissement partiel de la mission, soit à l'accomplissement de celle-ci avec des performances moindre. En d'autres termes, il y a eu dégradation dans l'équipement ou le système mais pas de défaillance.
- **Mode de défaillance** : qui correspond à des mauvais fonctionnements du système, c'est-à-dire qu'il y a eu défaillance soit après dégradation soit défaillance brusque. Un mode de défaillance est caractérisé par les effets causés par cette défaillance. Ces effets peuvent être mesurables ou qualifiables. En faisant une analyse de cause à effet de la défaillance, on peut associer le mode de défaillance à toute cette analyse faite par un expert. En d'autres termes, à chaque mode de défaillance, on associe une décision et une interprétation possible. Chaque équipement ou système peut posséder qu'un seul mode nominal ; par contre, il possède plusieurs modes de défaillance.

## **3. Méthodologie de diagnostic et d'intervention**

Pour prévenir une panne, un dysfonctionnement, ou l' occurrence d' un défaut il convient de pouvoir **diagnostiquer** le procédé.

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. Pour établir un système de diagnostic il faudra a priori disposer des fonctions suivantes :

1. **Observer** les symptômes (ie. L'évolution du comportement du procédé).
2. Interpréter les symptômes : **détecter** la défaillance.
  - Mise en évidence d'événements qui affectent l'évolution d'un système.
3. **Identifier** le composant (ou ensemble) défaillant.
  - Fournit des informations sur les caractéristiques de la défaillance.
4. **Localiser** l'origine de la défaillance.
  - Circonscriit la défaillance à un sous-ensemble du système surveillé.

Comme mentionné précédemment, un défaut (une cause) est une anomalie de comportement qui peut impliquer une défaillance. Ce qui peut se traduire par : F (causes) = observations.

Pour permettre et réaliser un **système de diagnostic** d'une entité, cela nécessite au préalable une **surveillance** (monitoring) de celui-ci. La surveillance consiste à déterminer l'état réel du procédé (e.g. mode de fonctionnement normal ou non, etc.) à partir des informations disponibles (i.e. des observations). Puis, il s'agit de chercher à détecter et localiser les éventuelles défaillances (FDI : Fault Detection and Isolation). Enfin, il faut pouvoir identifier la nature de la défaillance en vue d'entreprendre les actions correctrices.

## Surveillance

La surveillance est un dispositif **passif, informationnel** qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment 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.

La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic. La Figure 2 montre une architecture générale d'un système de surveillance. Les principales raisons qui conduisent à surveiller un système sont :

**La conduite** : qu'il s'agit d'optimiser et qui est une tâche en ligne (production maximale, sécurité, non dégradation des équipements). Ceci passe par la surveillance du procédé afin de détecter toute anomalie de fonctionnement et de l'identifier aussi bien que possible. Ce type d'action est aussi appelé supervision : surveillance + conduite.

**La maintenance** : qui a pour objet d'optimiser le remplacement ou la réparation d'équipements usés ou défectueux. On peut citer trois types de maintenance :

- *Maintenance corrective* : intervient après la détection et la localisation d'un défaut.

- *Maintenance préventive* : Maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. C'est une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance. Le plus souvent elle est systématique, c'est-à-dire une maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage.
- *Maintenance conditionnelle* : alternative à la maintenance systématique, fait l'objet d'une demande croissante dans un grand nombre d'applications industrielles. Cette maintenance est basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive. Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation. La décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale de défaut imminent, ou approche d'un seuil de dégradation prédéterminé. Elle impose donc des traitements en ligne, au moins en partie.

Le monitoring (ou surveillance) classique pour détecter l'apparition d'un défaut, et donc d'une défaillance, peut se faire :

- À partir des informations disponibles : estimer une (des) caractéristique(s) ou symptôme(s) – e.g. paramètre(s), variable(s), grandeur(s)··· du système ;
- Comparer la(les) caractéristique(s) estimée(s) aux caractéristiques théoriques ou de référence sous l'hypothèse d'un « bon fonctionnement ».

Pour ce faire, il peut y avoir différents moyens pour surveiller le procédé, tel que :

- Poste opérateur : eg. ensemble structuré hiérarchique de synoptiques;
- Automatisation : comparaisons des signaux aux valeurs de références;
- Alarme : selon le synoptique renvoi une information détaillée concernant un signal, etc.

➤ On a alors besoin d'une étape supplémentaire de **supervision du système**.

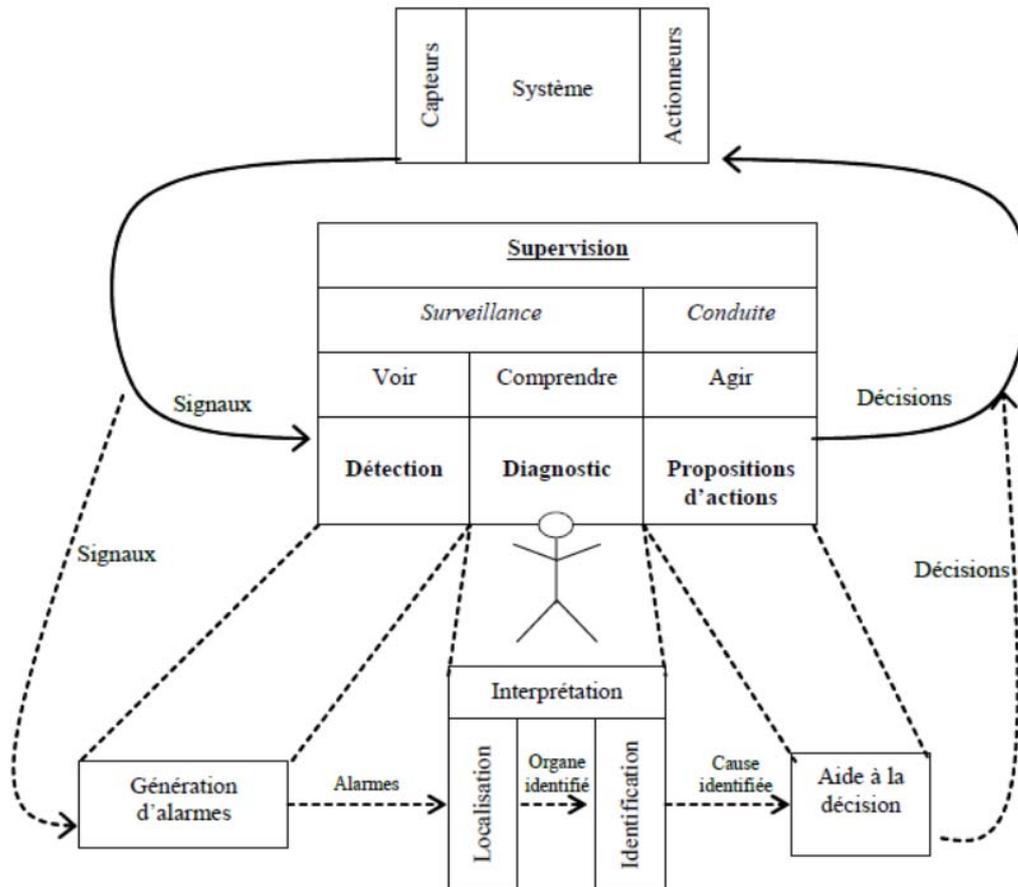


Figure 2. Architecture générale d'un système de supervision en ligne (Basseville et al., 1996)

## Détection

Pour détecter les défaillances du système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales.

- Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale.

La qualité du système de diagnostic repose alors sur les spécifications attendues. Le cahier des charges de la conception d'un système de diagnostic inclut généralement les spécifications suivantes :

- ✓ détectabilité : pouvoir **détecter** une défaillance ;
- ✓ isolabilité (ou localisation) : pouvoir **distinguer** plusieurs fautes ;
- ✓ sensibilité : pouvoir détecter des fautes d'amplitudes données ;
- ✓ robustesse : pouvoir détecter malgré les erreurs de modèles du processus ;
- ✓ rapidité de détections, etc.

- Ces exigences sont parfois contradictoires, et il faut alors trouver un compromis.

Une fois que la **faute** est décelée, il s'agit d'interpréter l'état réel du système : est-il **normal** ? **anormal** ? Pourquoi le système est-il dans cet état (**causes**) ? etc. Cela inclue la **surveillance** en cherchant à remonter à la **cause première**.

Pour élaborer une approche globale de FDI ( Fault Detection and Isolation) pour la supervision, la maintenance, la reconfiguration, etc. du système, il est nécessaire :

- de garantir la sûreté du système ;
- de prévoir des modes de fonctionnement de remplacement ;
- de détecter tous les défauts ;
- d'isoler les défauts ;
- d'identifier les défauts ;
- de compenser les effets des défauts ;
- **localiser** le (les) composant(s) en défaut :
  - utilisation de modèle(s) du système sous différentes hypothèses ;
  - utilisation de plusieurs caractéristiques, symptômes, etc.
    - Il s'agit ainsi de définir un ensemble d' indicateurs (e.g. des résidus) ayant des propriétés de robustesses/sensibilités aux différents défauts.

Les principales difficultés de la surveillance sont alors :

- Systèmes mal identifiés, mal connus, etc.
- Mesures partielles, bruits de mesure, valeurs incohérentes :
  - des mesures collectées sur un processus physique sont en général affectées d'erreurs/d'incertitudes.
  - les mesures sont nécessaires pour connaître l'état de fonctionnement d'un processus.
  - les mesures sont nécessaires pour la conduite d'un processus et pour l'optimisation de son fonctionnement.
  - la réconciliation de données utilise le principe de redondance massive ou analytique.
    - Des méthodes statistiques « basées modèles » peuvent être établis pour analyser et valider les mesures.

## 4. Méthodes de Diagnostic

Le diagnostic de défaillance est constitué de cinq phases essentielles

- **Détection** : mise en évidence d'événements qui affectent l'évolution du processus. Un événement traduit un changement de situation.
- **Isolation** : analyse des événements pour distinguer ceux qui sont anormaux et localisation précise de la défaillance.
- **Identification** : quantifier la défaillance en estimant sa durée et son amplitude.
- **Pronostic** : on cherche à prévoir l'évolution des fautes détectées.
- **Reconfiguration** : concerne la remise en état de la partie défectueuse du système de façon à lui permettre de satisfaire à sa mission.

Il existe différents moyens pour aider aux diagnostics, tels que :

- Les méthodes sans modèle analytique.
- Les méthodes basées sur les modèles analytiques

Notre objectif sera alors de chercher à détecter et localiser un élément défaillant à partir des connaissances disponibles sur le procédé, en utilisant l'approche FDI. L'approche FDI peut se dérouler comme suit :

1. Représentation du système réel à diagnostiquer ;
2. Modélisation des fautes anticipées ;
3. Synthèse analytique/programmatique de résidus ;
4. Instrumentation du système pour la mise en œuvre des résidus ;
5. Surveillance en ligne de la valeur des résidus ;
6. Détecter et identifier les fautes en fonction des mesures de résidus ;

Pour mener à bien les différentes tâches identifiées permettant d'établir un système de diagnostic, il convient tout d'abord de s'assurer de la génération de signaux, représentatifs des défauts visés et, dans un deuxième temps, de la possibilité d'une prise de décision sur la base des informations contenues dans ces signaux (cf. Fig. 3). Pour construire un système de diagnostic, il est alors nécessaire de surveiller les comportements du système, en vue de détecter et localiser la défaillance (FDI : Fault Detection and Isolation). Notamment, la détection d'un défaut consiste à décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normal (ou non). À l'issue de la détection du défaut, il faut alors déterminer le (ou les) élément(s) à l'origine du défaut.

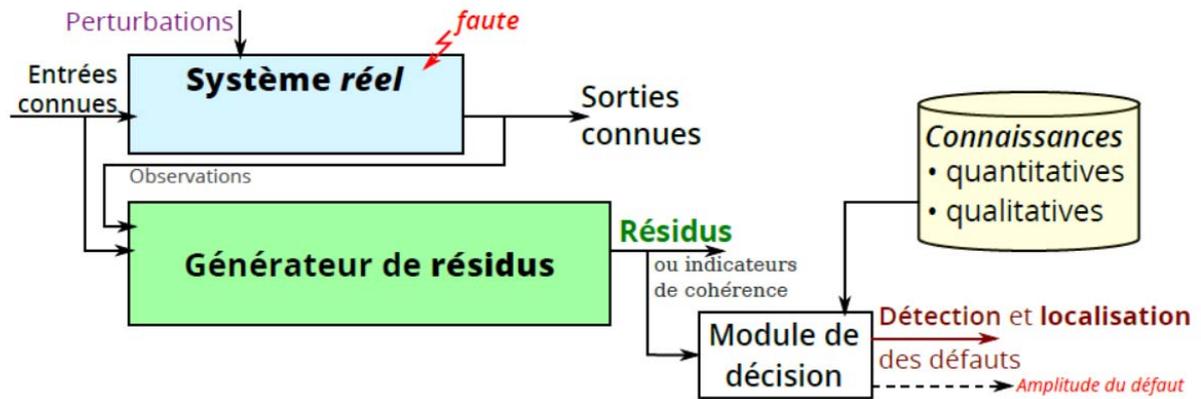


Figure 3 : Principe de la synthèse de diagnostic.

Un système de diagnostic doit réaliser des tests de cohérence entre des informations (observations) et des connaissances a priori (modèles de comportement). La différence entre la valeur mesurée et estimée (e.g. par un modèle) correspond à **un résidu** ou indicateur de défaut.

Un *résidu* est un signal  $r(t, x, u, y)$  qui reflète la cohérence (e.g.  $|r(t)| < Seuil$ ) des données mesurées de  $x, u, y$  vis-à-vis d'une connaissance.

- Classiquement « Seuil » est issue d'une connaissance a priori sur le procédé (e.g. limites, références, etc.).