



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة احمد دراية ادرار
Université Ahmed Draia – Adrar
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الهندسة الكهربائية
Département de Génie Electrique



Polycopié de Cours

Diagnostic des défaillances des systèmes de commande

Destiné aux étudiants de Master CE-LMD Domain ST

Rédigé par :

Dr. BERBAOUI Brahim

Année Universitaire : 2023 / 2024

Avant-propos

Ce polycopié conforme aux programmes officiels du système LMD, est un support pédagogique destiné aux étudiants de Master CE-LMD domaine des Sciences et de la Technologie ST.

Le diagnostic des défaillances industrielles se base sur la connaissance du (des) symptôme (s) pour déterminer la ou les cause (s). Cette matière permet à l'étudiant d'acquérir des connaissances indispensables à l'évitement de pannes dans un souci de fiabilité et de continuité de service dans un système de commande électrique.

Le document est subdivisé en quatre chapitres :

Chapitre 1 : Introduction aux techniques de diagnostic de panne

Définitions : A quoi ça sert un diagnostic, Fonctionnement normal, Panne et défaut, Défaillance, Perturbation, Résidu, Détection, Localisation de défauts, Identification des défauts, Signature, Surveillance, Supervision.

Méthodologie de diagnostic : Comment faire un diagnostic ?

Étapes logiques d'une recherche de panne, Localisation de l'élément défectueux hors tension et sous tension, Diagnostic et recherche de la cause.

Méthodologie d'intervention: Surveillance permanente, Inspection, Remplacement de l'élément défectueux et vérifications, Compte rendu d'intervention, Classification de défaut: Emplacement, Modélisation, Caractéristiques temporelles, Surveillance utilisant les modèles: Redondance physique (matérielle), Redondance analytique, Détection et isolation des défauts (*FDI*), Principe du diagnostic: Architecture de diagnostic, Génération de résidus à base modèles: Obtention des tables de signatures, Méthodes de diagnostic à base de modèles, Approches à base d'observateurs d'états.

Chapitre 2 : Outils du diagnostic de défaillances

Capteurs, Visualisation des signaux, Traitement du signal, Analyse spectrale :

Outils, et techniques.

Chapitre 3 : Maintenance préventive des équipements

Lecture de schémas électriques composés de circuits de puissance, commande et/ou télécommande.

Vérification périodique des serrages des connecteurs, de l'état des conducteurs, des échauffements.

Contrôle des courants de fuite, de l'intensité nominale, de la tension.

Chapitre 4 : méthodes de diagnostic

Chapitre 5 : Génération de résidu

CHAPITRE I : TECHNIQUE DE DIAGNOSTIC DES PANNES	6
I.1 DÉFINITIONS ET CONCEPTS.....	1
I.1.1 Une anomalie :	1
I.1.2 Une panne :	1
I.1.3 Un défaut :	1
I.1.4 Une défaillance :	1
I.1.5 Une perturbation :	1
I.1.6 Un résidu :	1
I.1.7 Un symptôme :	1
I.1.8 Le diagnostic :	1
I.2 PROCÉDURE DE DÉTECTION ET D'ISOLATION DES DÉFAUTS	2
I.2.1 La détection :	2
I.2.2 L'isolation :	2
I.2.3 L'identification :	2
I.3 LES CLASSES DE DÉFAUTS.....	3
I.3.1 Selon leur emplacement.....	3
I.3.1.1 Défauts actionneurs.....	3
I.3.1.2 Défauts capteurs	3
I.3.1.3 Défauts système	4
I.3.2 Selon leur modélisation.....	4
I.3.3 Selon leur caractéristique temporelle.....	4
I.3.3.1 Défaut brusque	4
I.3.3.2 Défaut intermittent	4
I.3.3.3 Défaut graduel.....	5
I.4 ÉTAPE DE DIAGNOSTIC.....	5
CHAPITRE II : OUTILS DU DIAGNOSTIC DE DÉFAILLANCES	6
II.1 OUTILS DE BASE D'UN DIAGNOSTIC INDUSTRIEL.....	7
II.1.1 Capteurs.....	7
II.1.1.1 Capteur de vibration	7
II.1.1.2 Capteurs de déplacement (prosimètres).....	7
II.1.2 Capteurs de vitesse (véloci-métrie)	8
II.1.2.1 Capteurs d'accélération (accéléromètres)	9
II.1.3 Acquisition et visualisation des signaux.....	10
II.1.3.1 Acquisition et traitement des signaux vibratoires.....	10
II.1.4 Capteurs d'émissions acoustiques	11
II.1.5 Capteurs de température	12
II.1.6 Capteurs de courant	13
II.1.6.1 Les shunts.....	13
II.1.6.2 Transformateur de courant	13
II.1.6.3 Capteur à sonde de Rogowski	14
II.1.6.4 Capteur à sonde de Rogowski planaire (sonde PRiME).....	15
II.1.6.5 Capteurs de courant à effet Hall	16
II.1.6.6 Capteurs de courant Fluxgate (porte de flux)	18
II.2 TECHNIQUES DE TRAITEMENT DU SIGNAL	19
II.2.1 Analyse temporelle.....	20
a- La valeur efficace (RMS: Root Mean Square).....	20
b- La valeur du Peak	20
c- Le facteur de crête.....	21
d- Le Kurtosis.....	21
II.2.2 Analyse fréquentielle.....	22
II.2.2.1 Transformation de Fourier discrète "DFT"	22

II.2.2.2	Transformée de Fourier rapide "FFT"	22
II.2.2.3	Analyse d'enveloppe	22
II.2.3	Analyse temps-fréquence.....	24
II.3	LE DIAGNOSTIC DE PANNE	24
II.3.1	La méthodologie du diagnostic	24
II.3.1.1	Hypothèses de départ.....	24
II.3.1.2	ETAPE 1 : MISE EN EVIDENCE DE LA DEFAILLANCE	25
II.3.1.3	ETAPE 2 : L'ANALYSE DES RISQUES.....	26
II.3.1.4	ETAPE 3 : RECHERCHE DE LA CHAINE FONCTIONNELLE.....	26
II.3.1.5	ETAPE 4 : LISTE DES MAILLONS DE LA CHAINE	27
II.3.1.6	ETAPE 5 : LISTE DES MODES DE DEFAILLANCES	28
II.3.1.7	ETAPE 6 : CRITERES DE TEST.....	29
II.3.1.8	ETAPE 7 : PROCEDURES DE TEST.....	30
II.3.1.9	ETAPE 8 : REPARATION	31
II.3.1.10	ETAPE 9 : COMPTE-RENDU	31
CHAPITRE III : MAINTENANCE PRÉVENTIVE DES ÉQUIPEMENTS		32
III.1	LES OPTIONS DE LA MAINTENANCE.....	33
III.1.1	La maintenance corrective.....	33
III.1.2	La maintenance préventive.....	33
III.1.3	Maintenance systématique	34
III.1.4	Maintenance conditionnelle	34
III.1.5	Termes et définitions relatifs à la maintenance	34
III.1.5.1	Termes généraux	34
III.1.5.2	Opérations de maintenance préventive	35
III.1.5.3	Les opérations de maintenance corrective.....	36
III.1.5.4	Autres activités du service maintenance	36
III.2	LES CINQ NIVEAUX DE MAINTENANCE (NORME AFNOR X 60 011).....	38
III.3	LES SCENARIOS DE LA MAINTENANCE (NORME AFNOR X 60 011).....	39
III.4	LES DIVERSES OPÉRATION DE LA MAINTENANCE (SELON AFNOR).....	40
III.5	DÉROULEMENT DES OPÉRATIONS DE MAINTENANCE	41
III.6	DISCISION D'APPLICATION D'UN TYPE DE MAINTENANCE	41
III.7	DÉROULEMENT D'UNE ACTION DE MAINTENANCE CORRECTIVE.....	43
III.8	DÉROULEMENT D'UNE ACTION DE MAINTENANCE PRÉVENTIVE	45
III.9	RELATION ENTRE ANOMALIE-PARAMÈTRES-MOYEN.....	46
III.10	LECTURE D'UN SCHÉMA ÉLECTRIQUE	47
III.10.1	Définition.....	47
III.10.2	But d'un schéma électrique	47
III.10.3	Les symboles	48
III.10.4	Classification des schémas	49
III.10.4.1	Représentation unifilaire.....	50
III.10.4.2	Représentation multifilaire	50
III.10.5	Installation électrique industrielle.....	51
III.10.6	Partie électrique	51
III.10.6.1	Structure du circuit de puissance	52
III.10.6.2	Structure du circuit de commande	52
CHAPITRE IV : LES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC		53
IV.1	INTRODUCTION	54
IV.2	APPROCHE À BASE DE REDONDANCE MATÉRIELLE.....	54
IV.3	APPROCHE À BASE DE REDONDANCE ANALYTIQUE	54
IV.4	CLASSIFICATION DES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC À BASE DE REDONDANCE ANALYTIQUE	55
IV.4.1	Les méthodes à base de modèles :	55

IV.4.1.1 Les modèles quantitatifs	56
IV.4.1.2 Les méthodes à base de modèles qualitatifs	56
IV.4.2 Les méthodes sans modèles.....	56
IV.4.2.1 Méthodes qualitatives.....	57
IV.4.2.2 Méthodes quantitatives.....	57
IV.5 LE DIAGNOSTIC DE DÉFAUTS À BASE DE MODÈLES	58
IV.5.1 La génération de résidus et la prise de décision	58
IV.5.2 Evaluation de résidus	58
IV.6 RAPPEL SUR LES OBSERVATEURS D'ÉTAT LINÉAIRES	60
IV.6.1 Observabilité des systèmes linéaires	60
IV.6.1.1 Définition de l'observabilité.....	60
IV.6.1.2 Le Critère d'observabilité.....	60
IV.6.2 Principe d'un observateur d'état.....	60
IV.6.2.1 Définition d'un observateur.....	60
IV.6.3 Classification des observateurs pour systèmes linéaires	61
IV.6.3.1 Observateur de Luenberger	61
IV.6.3.2 Observateur à entrées inconnues	63
CHAPITRE V : GÉNÉRATION DU RÉSIDU	68
V.1 PRINCIPE DE GÉNÉRATION DE RÉSIDUS	69
V.2 DÉTECTION ET LOCALISATION DES DÉFAUTS :	71
V.3 PRINCIPE DE GÉNÉRATION DE RÉSIDUS A BASE D'OBSERVATEURS :	73
V.3.1 Structure des résidus générés à base d'observateur :.....	74
V.3.1.1 Structure d'observateurs simplifiés (SOS)	74
V.3.1.2 Structure d'observateurs dédiés (DOS)	75
V.3.1.3 Structure d'observateurs généralisés (GOS).....	75

*Chapitre I : Technique de diagnostic
des pannes*

I.1 Définitions et concepts

I.1.1 Une anomalie :

Est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique.

I.1.2 Une panne :

Est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.

I.1.3 Un défaut :

Est une anomalie de comportement au sein du système. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut.

I.1.4 Une défaillance :

Est une anomalie altérante ou empêchant l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir la fonction souhaitée. Une défaillance correspond à un passage d'un état à un autre, par opposition à une panne qui est un état. Par abus de langage, cet état de panne on pourra l'appeler mode de défaillance.

I.1.5 Une perturbation :

Consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, non ou mal, représenté par un modèle de référence.

I.1.6 Un résidu :

Est un signal conçu pour être un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence.

I.1.7 Un symptôme :

Est un caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.

I.1.8 Le diagnostic :

Consiste à déterminer le type, la taille, le lieu et l'instant d'occurrence d'un défaut, il suit la détection de défauts et inclut l'isolation et l'identification.

Défaut.....Défaillance.....Panne

Le système de diagnostic doit être capable de détecter et de localiser un défaut avant que celui-ci ne conduise à une défaillance ou une panne qui entrainerait l'arrêt du système.

Exemple de défauts :

- Dérive de capteur

- Fuite dans un reservoir.
- Blocage d'une vanne.
- Endommagement bille dans un roulement
- Court-circuit entre spires d'un enroulement moteur ;etc.

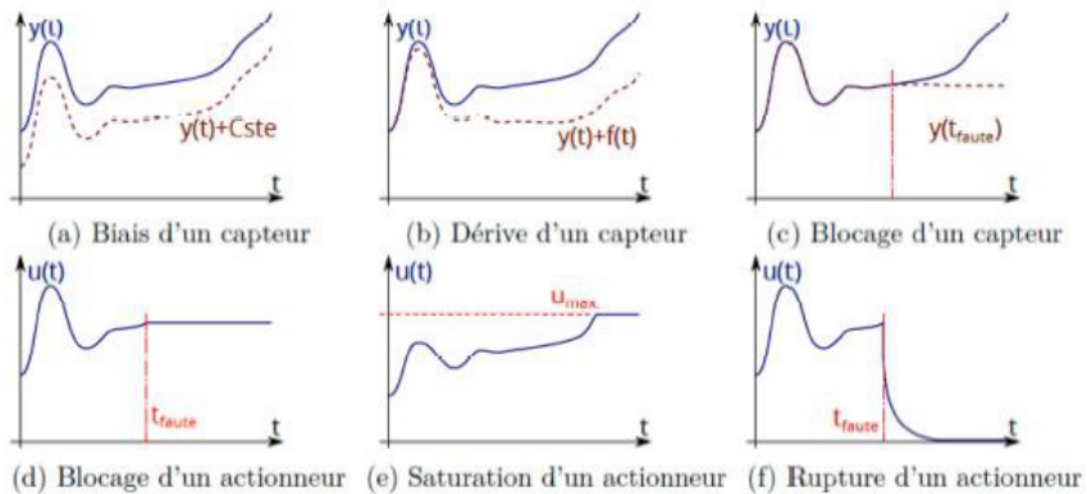


Figure 1 : Exemple de défauts.

I.2 Procédure de détection et d'isolation des défauts

La procédure de détection et d'isolation des défauts passe par trois étapes essentielles :

I.2.1 La détection :

C'est l'étape qui décide si le système est soumis à un défaut ou pas. Elle consiste dans la plupart des cas à générer le vecteur résidu, qui est nul en fonctionnement normal et est comparé en ligne aux signatures de pannes. La détection est réalisée en vérifiant le dépassement d'un seuil par les résidus.

I.2.2 L'isolation :

Cette étape permet de localiser le défaut et donc de déterminer quelle partie du système est affectée par l'anomalie. La détection de pannes est souvent suivie d'une procédure d'isolation de pannes, qui sert à distinguer (isoler) une panne particulière. Un seul résidu peut suffire pour détecter les pannes, cependant plusieurs résidus (ou un vecteur de résidus) sont souvent requis pour l'isolation de pannes.

I.2.3 L'identification :

L'ampleur et le type des défauts sont estimés dans cette phase.

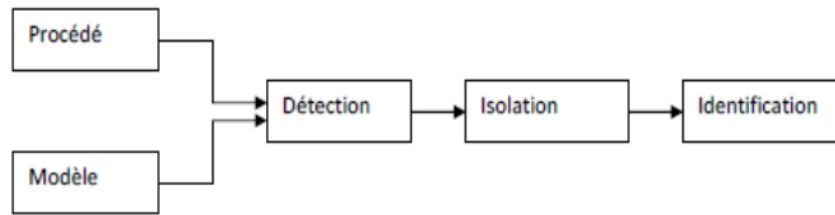


Figure 2 : Procédure de détection et d'isolation des défauts.

I.3 Les classes de défauts

Les défauts sont classés selon leur emplacement, leur modélisation, et leurs caractéristiques temporelles :

I.3.1 Selon leur emplacement

La figure 3 nous montre les types de défauts selon leur emplacement :

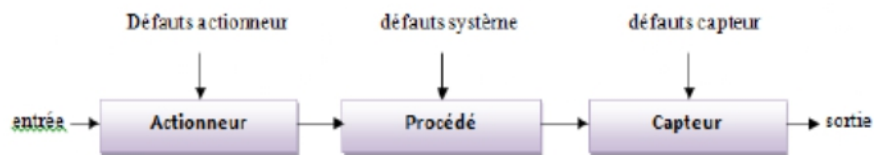


Figure 3. Différents types de défauts agissants sur un système

I.3.1.1 Défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent défaillance totale ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Un exemple de perte totale d'un actionneur est un actionneur qui est resté "collé" sur une position entraînant une incapacité à commander le système par le biais de cet actionneur. Les défauts actionneurs partiels sont des défauts d'actionneurs réagissant de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une certaine dégradation dans leur action sur le système.

I.3.1.2 Défauts capteurs

Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture. Un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer.

I.3.1.3 Défauts système

Ce type de défaut provient du système lui-même ; bien souvent les défauts n'appartenant pas à un défaut à la catégorie des défauts capteur ou actionneur sont classés de manière arbitraire dans cette catégorie. 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.

I.3.2 Selon leur modélisation

Suivant la manière dont les défauts sont modélisés, ils sont classés en additif et multiplicatif, comme représenté sur la figure 4 :

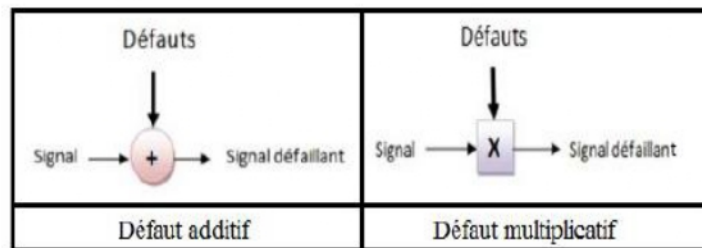


Figure 4. Les défauts selon leurs modélisations

Un défaut est dit additif quand il est modélisé par l'ajout d'une variable, quant au défaut multiplicatif, il affecte un système à travers la multiplication de l'entrée E du système par un défaut.

I.3.3 Selon leur caractéristique temporelle

I.3.3.1 Défaut brusque

Il apparaît à un instant t_d voir figure 5, il est d'une amplitude constante non nulle.

I.3.3.2 Défaut intermittent

Il apparaît à des instants imprévisibles, c'est un défaut difficile à détecter à cause de son caractère aléatoire.

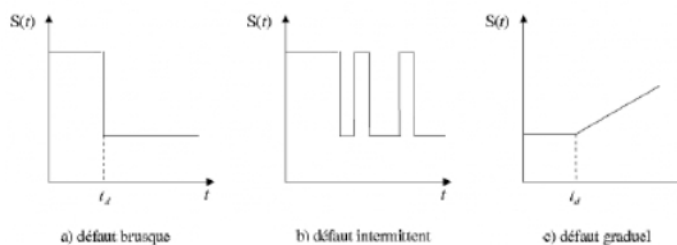


Figure 5. Répartition des défauts selon le comportement temporel.

I.3.3.3 Défaut graduel

Il apparaît à un instant t_d . Son amplitude n'est pas constante, elle augmente proportionnellement avec le temps.

I.4 Étape de diagnostic

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

La détection des défauts consiste à décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normal.

A l'issue de la détection d'un défaut, il s'agit de déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut. Pour réaliser un système de diagnostic, cela nécessite au préalable une surveillance (monitoring) de celui-ci. La surveillance consiste à déterminer l'état réel du procédé (normal ou non) à partir des observations. Puis, il s'agit de chercher à détecter et localiser les éventuelles défaillances (FDI : fault detection and Isolation).

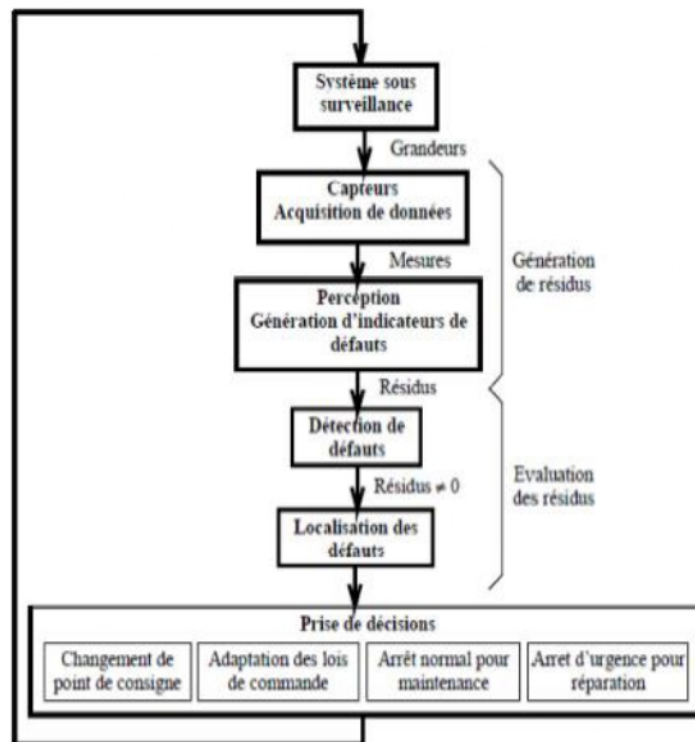


Figure 6. Les différentes étapes du diagnostic

Chapitre II : Outils du diagnostic de défaillances

II.1 Outils de base d'un diagnostic industriel**II.1.1 Capteurs**

Un capteur est un dispositif chargé de transformer une grandeur physique d'entrée en une grandeur exploitable par un système de traitement de données. Le capteur est un élément essentiel de la chaîne de mesure,

II.1.1.1 Capteur de vibration

L'analyse vibratoire fournit un nombre important de renseignements sur l'état de l'équipement. Elle consiste à analyser en fonction du temps les oscillations mécaniques d'un système autour d'une position de référence au moyen d'un ou de plusieurs capteurs. Ce capteur permet de transformer des grandeurs telles que le déplacement, la vitesse, ou l'accélération des vibrations en signal électrique exploitable.

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent. Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations, on retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), le vélocimétrie (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération).

II.1.1.2 Capteurs de déplacement (proximètres)

Il existe en effet des capteurs : (Inductifs, Capacitifs et à courants de Foucault). C'est ce dernier principe qui s'est imposé dans le monde entier.

Le proximètre, ou sonde capteur de déplacement, est constitué d'une bobine et d'un câble de raccordement. Ce câble, pour des raisons d'ordre pratique, présente le plus souvent un (connecteur).



Figure II.1 : Capteurs de déplacement

La chaîne de mesure des déplacements d'après le principe des courants de Foucault est

constituée de deux parties essentielles :

- le capteur
- le conditionneur (oscillateur démodulateur)

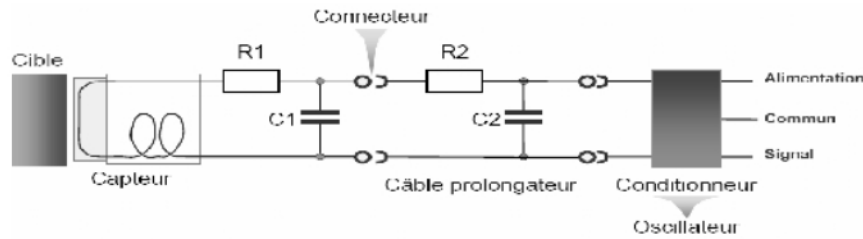


Figure II.2 : Schéma d'une chaîne de mesure à courants de Foucault

La bobine et le conditionneur forment ensemble un circuit électronique oscillant. La figure (II.2) montre clairement que le câble du capteur aussi bien que le câble prolongateur sont des composants forcés du circuit oscillant. Une modification de la longueur totale de ces câbles conduit automatiquement à une variation de ses paramètres électriques : résistance et capacité. C'est pour cette raison que les longueurs de câble sont ajustées à des valeurs bien précises, et qu'elles ne doivent jamais être retouchées par la suite.

Le circuit oscillant crée un champ magnétique alternatif dans la bobine du capteur. D'après le principe d'induction, il se crée alors des courants de Foucault dans un corps conducteur que l'on approche du capteur. Ces courants de Foucault agissent à leur tour sur la bobine par l'intermédiaire du champ magnétique et consomment ainsi de l'énergie électrique. Cette transformation d'énergie est d'autant plus importante que le corps métallique est proche de la bobine et que sa susceptibilité magnétique est élevée.

Elle se traduit alors dans le conditionneur par une diminution de la tension. Cet effet est démodulé dans le conditionneur et transformé en un signal de mesure proportionnel à la distance objet/bobine. La sensibilité la plus utilisée est de 8 mV/ μm .

II.1.2 Capteurs de vitesse (véloci-métrie)

Le capteur de vitesse, est un capteur électrodynamique, auto-générateur d'une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement de la bobine. Le mouvement de la pièce métallique dans les spires provoque une variation de flux, donc une induction de courant dans la bobine.



Figure II.3 : Capteurs de déplacement

Un aimant permanent (1) génère une induction magnétique constante B . Les lignes de champ se referment par l'intermédiaire du boîtier (3). Une bobine (4) suspendue par des membranes (5) et (6) peut se déplacer dans la direction des lignes de champ. Une force électromotrice (fem) d'induction e est alors générée, qui est le produit de la vitesse v de vibration, de l'induction magnétique B et de la longueur l de l'enroulement :

$$e = B \cdot l \cdot v$$

et pour B et l constantes ($B \cdot l = k$) :

$$e = k \cdot v$$

La f.e.m d'induction est proportionnelle à la vitesse de vibration.

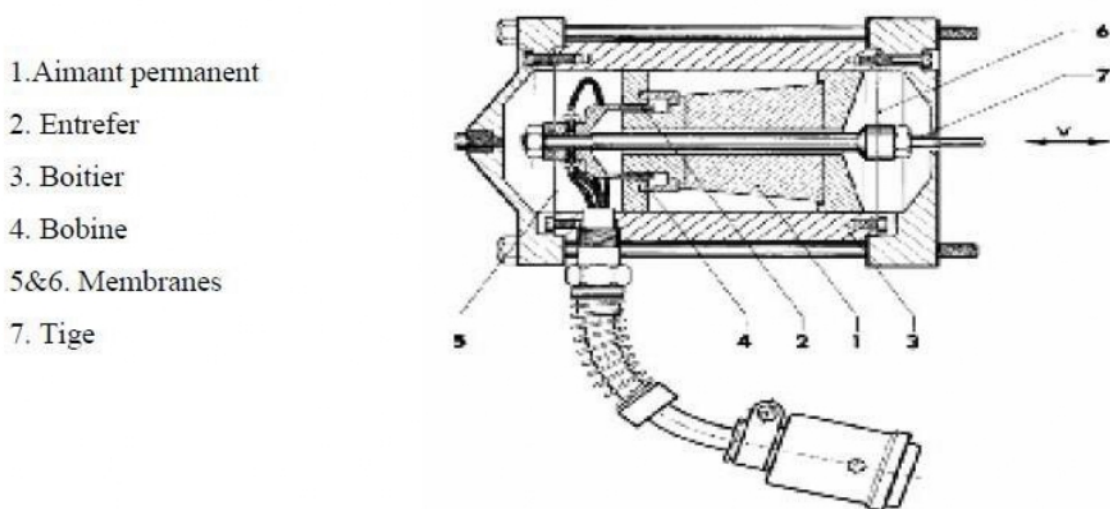


Figure II.4 : Vélodimètre fonctionnant selon le principe électrodynamique

II.1.2.1 Capteurs d'accélération (accéléromètres)

L'accéléromètre piézo-électrique est le capteur le plus utilisé pour mesurer les vibrations.

Les qualités des accéléromètres sont nombreuses : coût modéré, résistance aux chocs et à l'environnement, fonctionnement autonome. Une caractéristique de l'accéléromètre est sa très grande dynamique, c'est à dire sa capacité à détecter simultanément des phénomènes de très grande et de très faible amplitude.



Figure II.5 : Capteurs d'accélération (accéléromètres)

Les éléments actifs de ce type de capteur sont des disques de cristal piézo-électrique présentant la propriété de transformer une sollicitation mécanique (pression ou cisaillement) en charges électriques. Ces disques sont pris entre deux masses relativement importantes par l'intermédiaire d'un ressort de tarage élevé. Lorsque le capteur est soumis à une vibration, les masses exercent une pression alternative sur les disques qui, grâce à leur effet piézoélectrique, créent une variation de charge électrique proportionnelle à la force appliquée et donc à l'accélération des masses.

La méthode de montage de l'accéléromètre sur la surface de mesure est l'un des facteurs le plus critique pour l'obtention de résultats exacts à partir de mesures des vibrations pratiques. Il est nécessaire de repérer le point de mesure à l'endroit le plus proche possible du composant vibrant.

La fixation du capteur sur la structure peut avoir une réelle influence sur la qualité du signal recueilli. Il peut être fixé de diverses façons sur la machine : vissé à même la structure, vissé sur une embase collée, magnétique pour les structures ferriques, ou accolé avec une pointe touche. Cette fixation joue un rôle important sur le résultat des mesures, et la largeur de bande peut s'en trouver affectée

II.1.3 Acquisition et visualisation des signaux

L'acquisition consiste à collecter des informations de façon automatique à partir de sources de mesures afin de suivre des paramètres physiques sur un équipement. Ces paramètres doivent être sensibles à l'apparition et/ou à l'évolution du défaut. Le traitement du signal permet d'extraire le meilleur indicateur. Ces procédés sont réalisés grâce à une chaîne d'acquisition et à des logiciels de traitement.

II.1.3.1 Acquisition et traitement des signaux vibratoires

L'analyse vibratoire repose sur la prise de mesure vibratoire à l'aide de capteurs piézoélectriques placés sur l'équipement. Ces capteurs sont reliés à un système d'acquisition qui assure le rôle d'interface avec le PC. Ce dernier comporte un logiciel d'enregistrement des mesures et de traitement ; cet ensemble d'éléments est appelé chaîne d'acquisition et de traitement des signaux vibratoires.

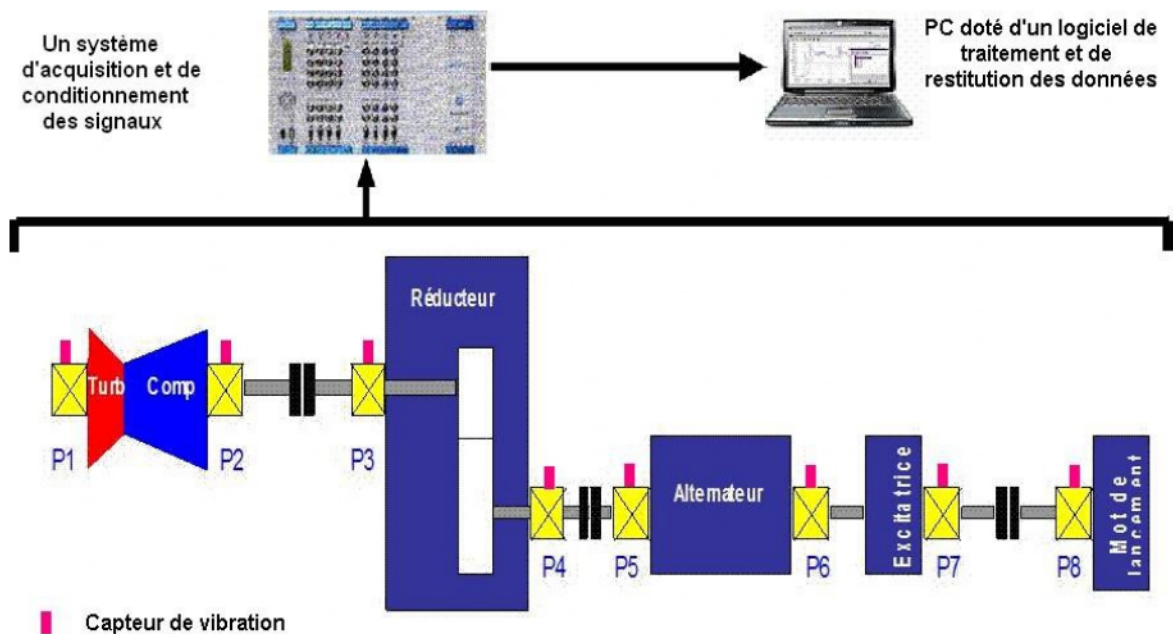


Figure II.6 : Chaîne d'acquisition et de traitement des signaux vibratoires
 Les éléments nécessaires à la chaîne d'acquisition et de traitement :

- Un capteur de vibration (déplacement, vitesse ou accélération).
- Un système d'acquisition et de conditionnement des signaux issus des capteurs.
- Une carte comprenant les circuits de conversion analogique numérique des signaux vibratoires.

Le signal provenant du capteur est conditionné, numérisé puis transféré sous forme de données au PC afin d'y être traité.

- Un logiciel de traitement des signaux numérisés. Les signaux vibratoires sont enregistrés dans le PC. Ces signaux contiennent des informations utiles, mais très souvent cachées sur l'état mécanique de l'équipement. Le traitement du signal offre des outils capables, dans plusieurs cas de défauts, de faire ressortir des informations le plus précocement possible. Il s'agit donc de repousser sans cesse les limites à une détection rapide et précise.

II.1.4 Capteurs d'émissions acoustiques

Les émissions acoustiques sont un phénomène mesurable alternatif aux vibrations. Les capteurs ultrasonores transforment les ondes acoustiques en un signal électrique. Dans la figure II.7, on peut voir une chaîne de mesure des émissions acoustiques. Sur le plan commercial, il y a plusieurs gammes de capteurs d'émissions acoustiques (Figure II.8). La plupart des capteurs travaillent dans une gamme fréquentielle de 20 kHz à 1 MHz. La mesure des émissions acoustiques (EA) prend de l'ampleur dans les systèmes de surveillance préventive des machines.

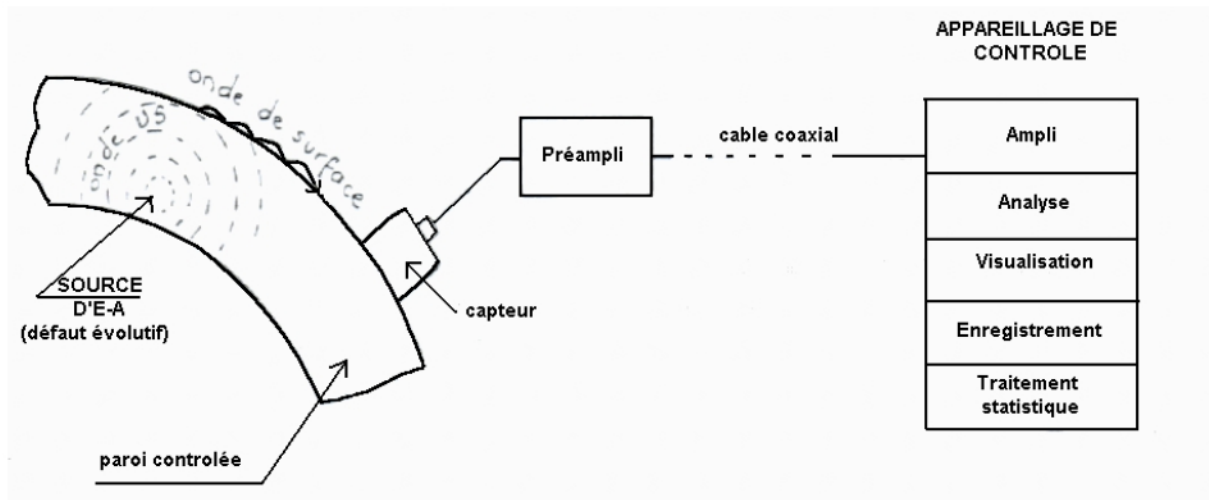


Figure II.7 : Chaine d'acquisition d'émissions acoustiques



Figure II.8: Capteurs d'émissions acoustique

II.1.5 Capteurs de température

Mesurer la température est une méthode assez facile pour déterminer le niveau de dégradation d'un équipement. Cette mesure peut être effectuée par plusieurs méthodes comme en installant des thermocouples ou bien par thermographie infrarouge. L'idée de ce type d'analyse est de surveiller la tendance de la température d'une composante dans le temps. Une élévation anormale de la température d'une composante reflète la présence d'un défaut. Un thermocouple est constitué de 2 conducteurs métalliques de natures différentes, soudés en un point, la soudure chaude. Les autres extrémités des fils sont branchées sur l'appareil de mesure. Cela constitue la soudure froide (le point de référence), qui sert de référence à la mesure. Elle doit être maintenue à température constante. Entre ces 2 points, il se crée une force électromotrice dite fem., qui augmente à mesure que la température croit. Les thermocouples peuvent être munis de câbles de prolongation



Figure II.9 : Thermocouple

II.1.6 Capteurs de courant

II.1.6.1 Les shunts

Les shunts sont les seuls capteurs opérant une mesure directe de courant. Un shunt est une résistance calibrée et connue, placée en série avec le conducteur traversé par le courant à mesurer. La mesure de la tension (loi d'Ohm) à ses bornes permet de déterminer ce dernier.

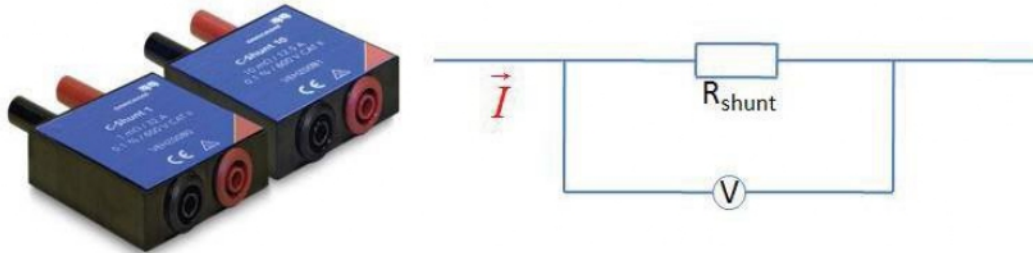


Figure II.10 : Capteur de courants de type « shunt » et schéma associé

On distingue les shunts réalisés en technologie planaire (circuit en couche épaisse) de ceux réalisés en technologie coaxiale (figure II.11). Les premiers sont destinés à être implantés dans des circuits imprimés et les seconds sont utilisés pour la mesure de courant à très hautes fréquences.

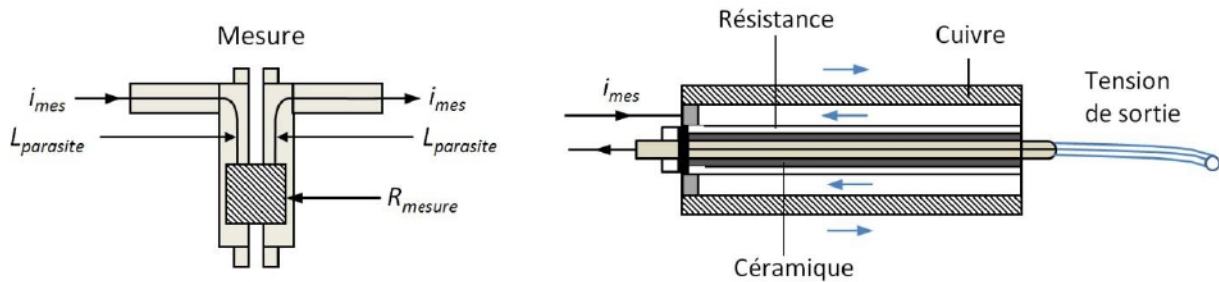


Figure II.11 : Schémas de principe (a) shunt en technologie couches épaisses et (b) shunt coaxial

Cette méthode permet une bonne précision en basse et moyenne fréquences. La résistance de mesure et le circuit qui lui est associé doivent présenter une bonne stabilité en température ainsi qu'une bonne précision. Les impédances parasites (inductance série, capacité répartie) ainsi que l'effet de peau doivent être négligeables afin de ne pas dégrader les performances en haute fréquence. La limitation essentielle du shunt est donc due à l'absence d'isolation. Les autres limitations sont dues aux pertes d'insertion pour la mesure de forts courants et à la bande passante limitée vers les hautes fréquences.

II.1.6.2 Transformateur de courant

Le transformateur de courant est une des solutions les plus simples pour mesurer un courant avec l'assurance d'une isolation galvanique entre le mesurant et la mesure. Il permet de

mesurer l'intensité dans un seul conducteur à la fois et il ne permet pas de mesurer un courant continu. Les transformateurs de courant sont classés en deux catégories:

- Les transformateurs de courant à faible coût pour la mesure industrielle à fréquence fixe 50 Hz, 60 Hz et 400 Hz (réseau avionique).
- Les transformateurs de courant appelés transformateurs d'instrumentation qui ont une bande passante beaucoup plus importante, de l'ordre de 20 MHz pour les modèles standard et une précision de 0,1 % à 0,5 %.

Le transformateur de courant comporte un enroulement primaire de N_1 spires parcouru par le courant à mesurer i_{mes} et un enroulement secondaire comportant un nombre N_2 élevé de spires terminé par une charge résistive R (figure II.12).

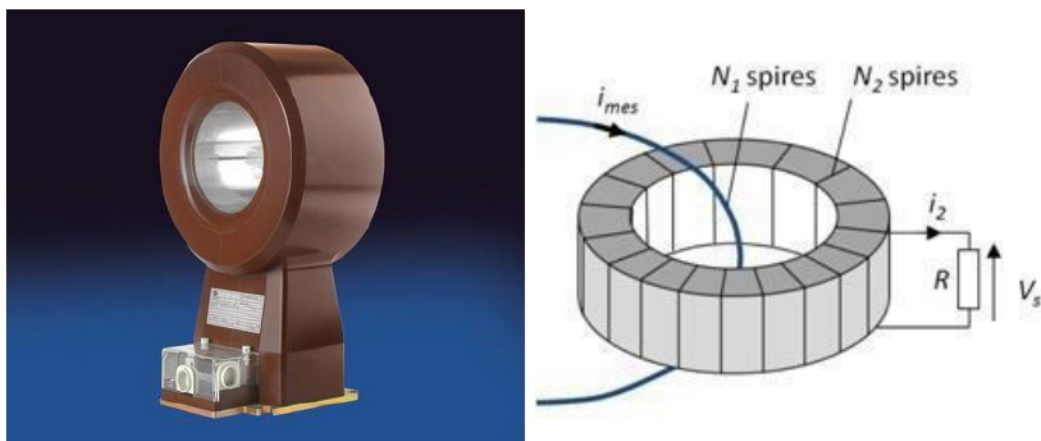


Figure II.12 : Transformateur de courant et son principe de fonctionnement à droite

Son principe repose sur le théorème d'Ampère et la loi de Lenz : le premier veut que le courant parcourant le conducteur primaire crée une induction qui, pour peu que son flux varie, engendre, en vertu de la seconde, une force électromotrice (f.e.m) variable aux bornes du secondaire. Il en résulte aux bornes de la charge R une tension V_s proportionnelle à i_{mes} , telle que la sensibilité du transformateur vérifie la relation :

$$\frac{V_s}{i_{mes}} = R \frac{N_1}{N_2}$$

En général, le circuit primaire ne comporte qu'une spire (il est constitué d'un fil de section importante : $N_1=1$). Le circuit magnétique peut être soit de forme torique soit d'une autre forme et il est éventuellement ouvrable.

II.1.6.3 Capteur à sonde de Rogowski

Les performances des capteurs de courant sont fréquemment limitées par les perturbations introduites par les matériaux magnétiques (saturation, hystérésis, non-linéarités et pertes). C'est pourquoi la conception des capteurs sans circuit magnétique a été envisagée.

Les capteurs à sonde de Rogowski sont dépourvus de noyau ferromagnétique. Elles se présentent comme un enroulement hélicoïdal, généralement de plusieurs centaines à plusieurs milliers de spires, dont une extrémité du fil est ramenée par le centre du noyau jusqu'à l'autre extrémité (figure II.13). Le conducteur – primaire - parcouru par le courant à mesurer est encerclé par le bobinage. La tension induite en sortie de l'enroulement est proportionnelle à la dérivée de la variation du courant (loi de Lenz). Pour s'affranchir de l'opération de dérivée, un circuit intégrateur est placé en sortie du capteur (il en constitue le circuit de conditionnement). La tension de sortie est ainsi proportionnelle au courant et en phase avec celui-ci.

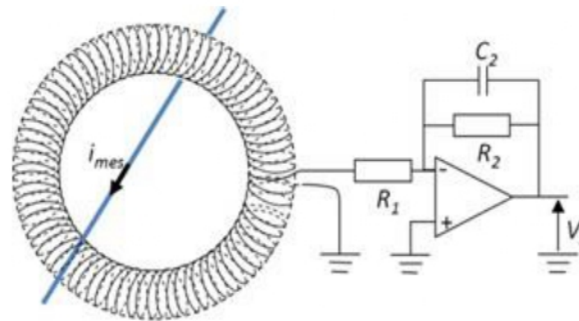


Figure II.13 : Schéma de principe d'une bobine de Rogowski munie d'un intégrateur

Les bobines de Rogowski se présentent généralement sous forme de capteurs ouvrants que l'on vient « clipser » autour du câble parcouru par le courant à mesurer. Cette facilité d'installation est d'un grand intérêt pratique. Un exemple de produit commercialisé par la société LEM est présenté dans la Figure II.14 ci-dessous.



Figure II.14 : Sonde de Rogowski produite par la société LEM

II.1.6.4 Capteur à sonde de Rogowski planaire (sonde PRiME)

Un autre capteur sans circuit magnétique destiné à la mesure des courants alternatifs est la sonde dite « PRiME » (ou sonde de Rogowski planaire), qui est un dispositif plus performant que la sonde de Rogowski filaire, et basée sur le même principe que cette dernière. Il s'agit d'une bobine de détection qui est couplée magnétiquement au flux créé par le courant à mesurer. Une tension est induite dans la bobine de mesure, proportionnelle à la dérivée temporelle du flux et donc à la dérivée temporelle du courant à mesurer. Tout comme le transformateur de

courant ou la sonde de Rogowski filaire, ce capteur ne peut être utilisé pour mesurer une éventuelle composante continue du courant.

Le capteur de courant « PRiME » est commercialisé aujourd'hui par la société LEM. Cette technologie est une amélioration par rapport à celle utilisée par les sondes de Rogowski, notamment en raison d'une plus grande immunité aux perturbations extérieures. Le capteur comprend un circuit imprimé principal (figure II.15) sur lequel sont disposés N capteurs élémentaires (réalisés sur des circuits imprimés multicouches). Chacun des capteurs élémentaires comprend deux bobines distinctes qui sont perpendiculaires au circuit imprimé principal. Les N capteurs élémentaires sont connectés en série, formant deux boucles concentriques : la boucle intérieure et la boucle extérieure. Le nombre N de capteurs élémentaires dépend des exigences en matière de précision, de sensibilité à la position du conducteur et de réjection des champs externes.

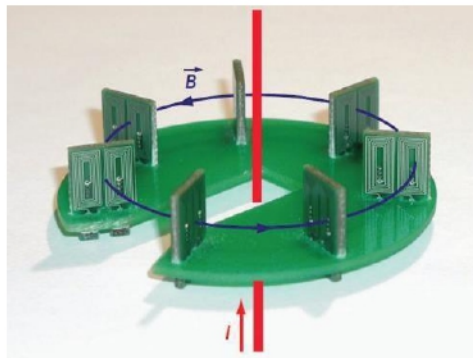


Figure II.15 : Capteur de courant PRiME développé par LEM

II.1.6.5 Capteurs de courant à effet Hall

Ce type de capteur de courant exploite l'effet Hall pour produire une tension qui est l'image exacte (avec un facteur de proportionnalité connu) du courant à mesurer.

On appelle *effet Hall* l'apparition d'un champ électrique transversal et, par suite, d'une différence de potentiel dans un semi-conducteur parcouru par un courant électrique lorsqu'on l'introduit dans un champ d'induction magnétique perpendiculaire à la direction du courant.

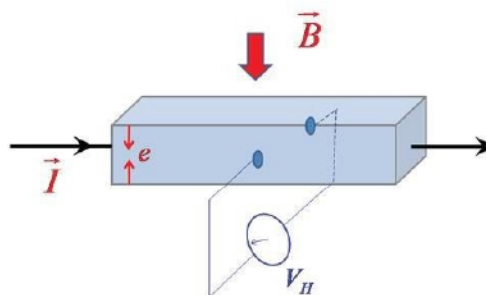


Figure II.16 : Principe de l'effet Hal

Finalement la tension de Hall V_H dépend du courant I , du champ d'induction magnétique B , de la surface et de l'épaisseur du matériau e ainsi que du type de matériau.

Il existe plusieurs technologies exploitant l'effet Hall pour la mesure du courant alternatif et continu. *Les pinces ampèremétrique* étant probablement l'application industrielle la plus répandue. Ces appareils présentent aujourd'hui la plupart des fonctionnalités de base des multimètres numériques portables.

Deux grandes familles existent :

- celles de type transformateur, capables de mesurer uniquement des courants alternatifs.
- celles, dit à effet Hall, aptes à mesurer des courants alternatifs et continus.



Figure II.17 : Pinces Ampèremétrique

Les pinces pour courant alternatif et continu sont développées suivant le principe de Hall avec un circuit électronique pour obtenir une sortie linéaire et un système de compensation pour la température. Une ou deux cellules de Hall peuvent être utilisées suivant le type de pince.

D'autres technologies ou variantes des précédentes sont aussi utilisées, selon le principe des circuits magnétiques saturés :

▪ Capteurs à effet Hall en boucle ouverte

Les capteurs boucle ouverte à effet Hall disposent d'un élément de détection Hall placé dans l'entrefer. La conception est telle que l'induction magnétique détectée par la cellule Hall est théoriquement proportionnelle au courant primaire à mesurer. Ils sont capables de mesurer des formes d'onde de courants continus, alternatifs et complexes tout en assurant une isolation galvanique. Ils se distinguent par leur faible consommation d'énergie, un poids et une taille réduits et ils sont particulièrement intéressants pour les courants élevés. Par contre, ils présentent l'inconvénient d'avoir une bande passante et un temps de réponse modestes et une précision de mesure qui varie beaucoup avec la température. Dans certaines applications spécifiques, les pertes de courant de Foucault à haute fréquence risquent également d'être un facteur restrictif.

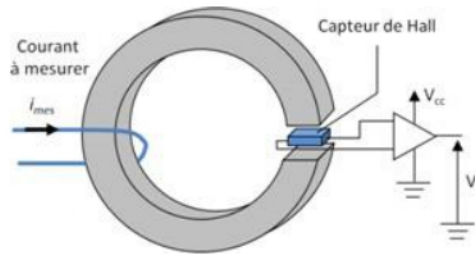


Figure II.18 : Schéma de principe d'un capteur de Hall

▪ Capteurs à effet Hall en boucle fermée

Les transducteurs de courant à boucle fermée, dits aussi à flux nul, possèdent un circuit de compensation intégré qui améliore notablement les performances. La cellule Hall des transducteurs en boucle fermée est utilisée comme signal de contre réaction régulant le courant I de la bobine secondaire de manière que le champ magnétique dans l'entrefer soit égal à zéro. L'enroulement secondaire comprend plus de tours que l'enroulement primaire.

La figure ci-dessous illustre un transducteur de courant en boucle fermée. Le primaire constitué d'une seule spire ($n_1=1$) est parcouru par un courant I_1 . Le secondaire possède n_2 spires et est parcouru par un courant i_2 .

Un capteur Hall, placé dans l'entrefer du circuit magnétique permet la mesure du flux circulant dans ce dernier, Le flux est une image de la solénoïde totale $n_1 I_1 + n_2 I_2$.

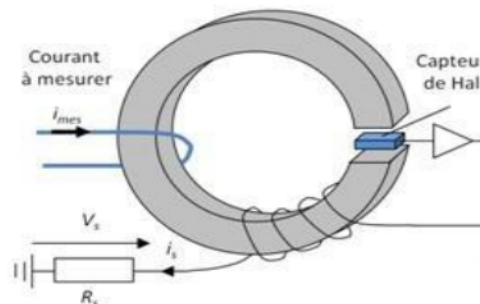


Figure II.19 : Schéma de principe d'un capteur de Hall en boucle fermée

Les transducteurs à effet Hall en boucle fermée se distinguent par d'excellentes précisions et linéarité, une faible dérive en température, un temps de réponse rapide, aucune perte d'insertion dans le circuit primaire et une sortie de courant très résistante aux interférences électromagnétiques.

II.1.6.6 Capteurs de courant Fluxgate (porte de flux)

Les transducteurs de courant de ce type sont des capteurs à large bande passante utilisés pour des applications particulières nécessitant une très grande précision associée à une excellente résolution. La technologie Fluxgate peut être déployée de différentes manières, utilisant toujours le même principe mais donnant des performances diverses suivant la complexité de la conception.

Le principe de fonctionnement d'un transducteur standard intégrant la technologie Fluxgate est similaire à celle d'un transducteur de courant à sonde de Hall en boucle fermée. La sonde de Hall placée dans l'entrefer du circuit magnétique étant remplacée par un (ou plusieurs) élément magnétique saturable entouré d'un enroulement. L'inductance vue aux bornes de l'enroulement de l'élément saturable varie fortement en fonction du courant qui le traverse mais également en fonction du flux produit par une ou plusieurs sources magnétiques extérieures.

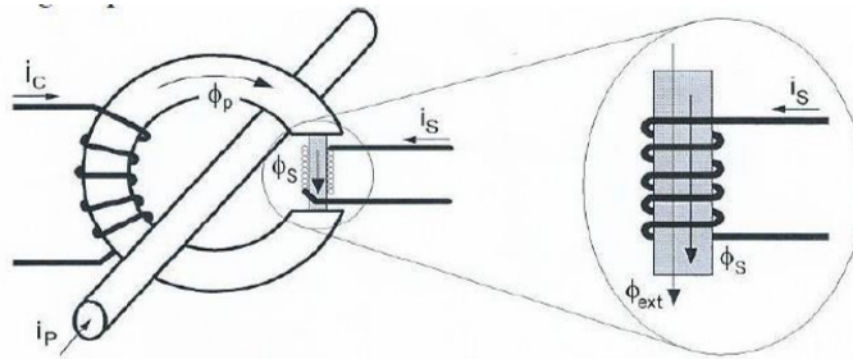


Figure II.20 : Schéma de principe d'un capteur Fluxgate

On en distingue trois grandes variantes :

- Le Fluxgate standard.
- Le Fluxgate à deux noyaux magnétiques, dont les performances sont nettement améliorées en utilisant un des deux tores magnétiques comme élément saturable, sans espace d'air entre les deux. Pour ce qui est du comportement aux hautes fréquences, un second tore bobiné est utilisé comme transformateur de courant, ici non plus il n'y a pas d'entrefer.
- Les Fluxgates à trois noyaux magnétiques, qui apportent une amélioration supplémentaire de performances en dédoublant la tête de détection du champ, en utilisant deux tores bobinés séparément. La bobine d'excitation est enroulée autour de chaque tore. Pour les hautes fréquences, l'amélioration est apportée en optimisant la conception du transformateur.

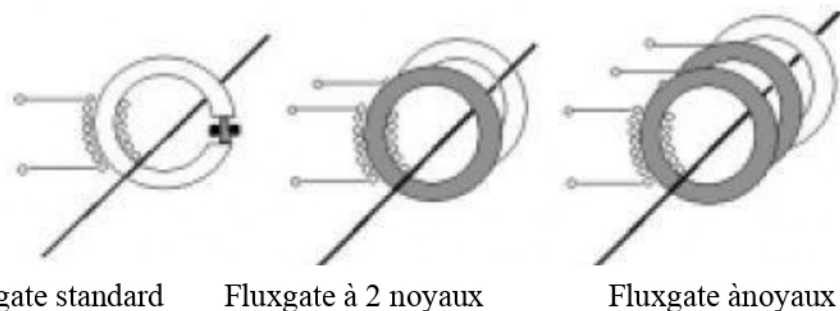


Figure II.21: Principales configurations de capteurs Fluxgate

II.2 Techniques de traitement du signal

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un

certain nombre de symptômes tels que le bruit, la température, les vibrations, etc., en s'appuyant sur leur expérience. Ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables. Les données peuvent être discernées en utilisant une variété de techniques de traitement de signal, qui sont classées dans cinq groupes différents: l'analyse temporelle, l'analyse fréquentielle, l'analyse d'enveloppe, l'analyse temps- fréquence ou temps-échelle.

II.2.1 Analyse temporelle

L'analyse dans le domaine temporel se concentre principalement sur les signaux variant dans le temps. Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli. Ces méthodes utilisent des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant du signal. Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut. L'analyse la plus simple, dans le domaine temporel, calcule la valeur efficace (RMS), la valeur du Peak, le facteur crête (Crest Factor) d'un signal. D'autres caractéristiques couramment utilisées sont l'amplitude crête-à-crête, l'écart-type, le facteur d'asymétrie, le kurtosis et la moyenne synchrone temporelle (TSA).

a- La valeur efficace (RMS: Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire très utilisé bien qu'il présente des inconvénients. Il permet de réaliser la surveillance et le suivi par la méthode du niveau global, qui consiste à suivre l'état de la machine par prélèvement de la valeur efficace des vibrations et de la comparer à des seuils de jugements afin de donner un avis sur l'état de la machine. La valeur efficace s'écrit sous la forme:

$$V_{efficace} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}$$

Où $x(n)$ est le signal temporel mesuré, N_e représente le nombre d'échantillons prélevés sur le signal.

b- La valeur du Peak

La valeur crête d'une vibration est la valeur maximale prise dans l'un des sens positifs ou négatifs, elle peut également être notée Peak. Le Peak augmente au fur et à mesure que le défaut se développe, en fin de vie de l'équipement, la valeur crête se stabilise, le Peak est représenté par la formule suivante :

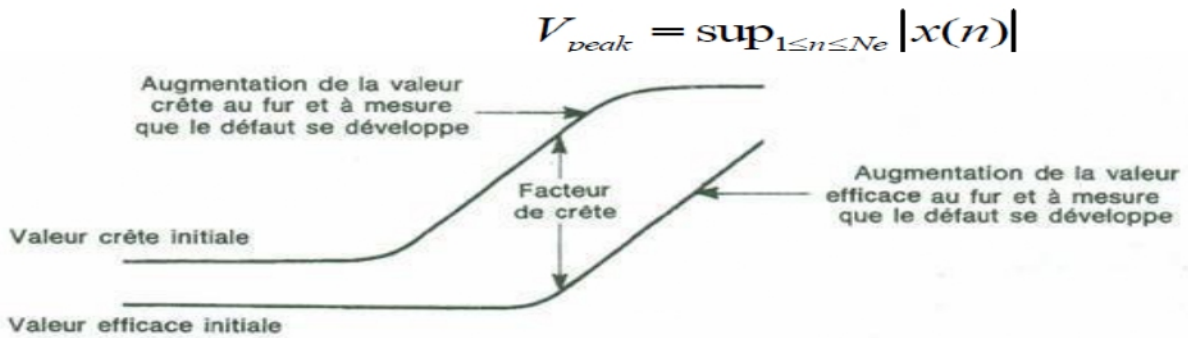


Figure II.22 : Evolution des valeurs crête et efficace

c- Le facteur de crête

Un autre type d'indicateur, similaire au précédent, permet une détection plus précoce. Il s'agit du facteur de crête, ce facteur est le rapport de la valeur crête sur la valeur efficace. Le facteur de crête suit une évolution caractéristique au fil de l'aggravation du défaut. À l'apparition du défaut, il reste constant, puis avec l'augmentation des chocs la valeur crête devient plus élevée alors que la valeur efficace n'est pas influencée. Il en résulte une augmentation significative du facteur de crête.

$$FC = \frac{V_{peak}}{V_{efficace}}$$

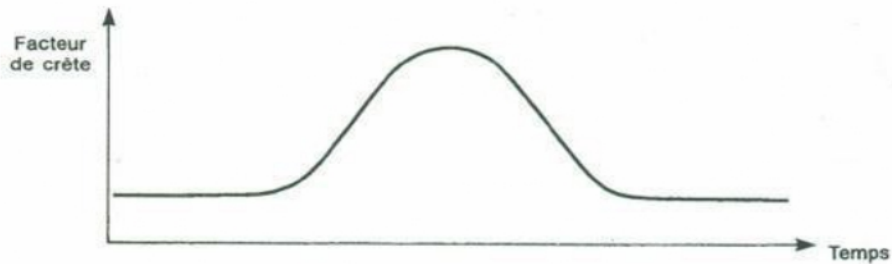


Figure II.23 : L'évolution du facteur de crête

d- Le Kurtosis

Le Kurtosis est le moment d'ordre quatre normé de la distribution statistique du signal. C'est un indicateur qui permet de caractériser la nature impulsive d'un signal. Le Kurtosis évolue donc toujours de façon croissante en fonction de l'augmentation de la dimension de la fissure.

Le Kurtosis peut être facilement utilisé afin de déterminer à quel instant il est nécessaire de changer le composant mécanique. Cependant, dans un cas général, cette technique pourrait être mal adaptée parce que le défaut pourrait être masqué par des excitations provenant des autres éléments de la machine. Le Kurtosis s'écrit sous la forme :

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (x(n) - \bar{x})^4}{\sigma_x^4}$$

Avec : \bar{x} la valeur moyenne et σ_x la déviation standard.

II.2.2 Analyse fréquentielle

Les techniques dans le domaine fréquentiel sont basées sur le fait qu'un défaut localisé génère un signal périodique avec une fréquence caractéristique unique. Les méthodes d'analyse dans le domaine fréquentiel sont en mesure de surmonter les inconvénients de l'analyse dans le domaine temporel.

L'analyse fréquentielle s'appuie sur la transformée de Fourier qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral, et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence associée au défaut. Dans la pratique, on utilise la transformée de Fourier discrète ou rapide.

II.2.2.1 Transformation de Fourier discrète "DFT"

C'est une méthode classique d'estimation de la densité spectrale de la puissance d'un signal. La transformée de Fourier discrète, d'une suite finie de P échantillons $\{p(0), p(1), \dots, p(P-1)\}$ se calcule grâce à la relation :

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_s(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}$$

Pour $k = 0, \dots, N-1$

Où le terme N représente le nombre de points de calcul de la DFT.

II.2.2.2 Transformée de Fourier rapide "FFT"

C'est une transformée basée sur un algorithme de calcul rapide de la DFT. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2. Ceci permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la DFT :

$$Gain = \frac{N}{\log_2(N)}$$

Cette transformée de Fourier rapide est très utilisée lorsqu'il est indispensable d'obtenir une analyse fréquentielle en ligne dans certains processus à travers d'une fenêtre glissante d'observation.

II.2.2.3 Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une autre technique de diagnostic des défauts, très utilisée en industrie. Le principe consiste à relever la vibration dans une bande fréquentielle bien définie, le signal est souvent filtré autour d'une fréquence de résonance. Une transformée d'Hilbert est réalisée pour relever son enveloppe et ainsi séparer, le signal modulé du signal modulant lié au

défaut ciblé. L'utilité du spectre enveloppe est donc de visualiser les basses fréquences de modulation, camouflées dans le spectre haute fréquence.

Certains défauts d'organes mécaniques comme les roulements produisent des modulations de phase (ou fréquence) et d'amplitude. Le phénomène de modulation de phase provoque dans le spectre des bandes latérales autour des fréquences principales du système (fréquence d'engrènement et harmoniques par exemple). Le cepstre est un outil permettant d'identifier l'espacement en fréquence séparant ces bandes, et donc l'origine de l'anomalie. Cependant, une autre technique existe, permettant un diagnostic plus précoce, il s'agit de *l'analyse d'enveloppe*, opération de *démodulation de phase* consistant à isoler les fréquences modulantes.

L'étude du signal enveloppe permet d'analyser la forme du signal, notamment lorsque le défaut recherché excite un mode de résonance de la structure. Elle consiste à filtrer le signal autour d'une fréquence de résonance identifiable sur le spectre, et à en rechercher la modulation provoquée par la répétition des forces générées par le défaut recherché. La détermination des fréquences de modulation, donc des taux de répétition des chocs, associée à la connaissance de la cinématique de l'installation, permet de localiser l'origine du défaut de façon précoce et rapide, même lorsque l'effet du défaut est noyé dans un bruit de fond.

La démarche numérique de calcul de l'enveloppe est la suivante (Figure II.22). On applique la Transformée de Fourier au signal temporel. Le spectre ainsi défini permet d'isoler les résonances du système. Le signal temporel est filtré passe-bande afin d'obtenir un spectre réduit autour de la fréquence principale du système, puis on applique la Transformée d'Hilbert. Par Transformée inverse de Fourier, on obtient le signal enveloppe temporel. Ce signal est rarement directement employé comme outil d'analyse, on utilise plutôt le spectre enveloppe. La transformée de Hilbert d'un signal $x(t)$ peut se traduire par l'équation :

$$H(x(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \frac{1}{t-\tau} d\tau$$

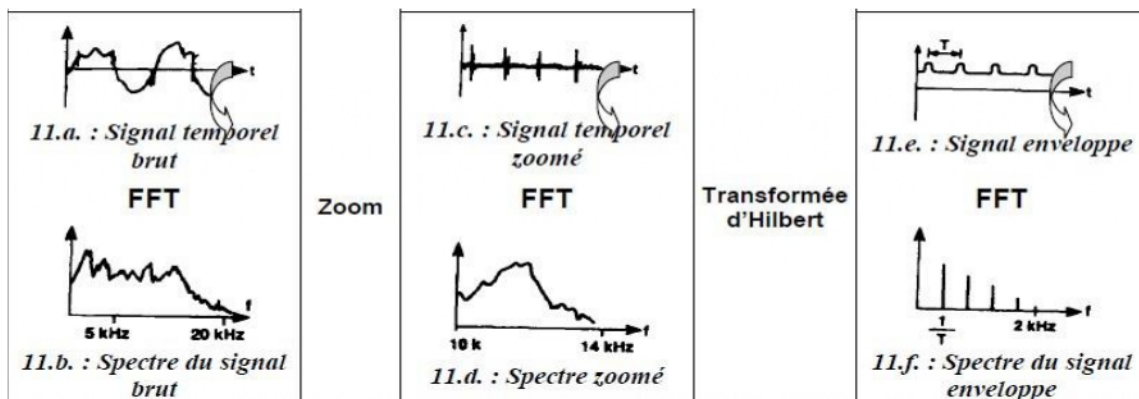


Figure II.24 : Principe de calcul d'enveloppe

II.2.3 Analyse temps-fréquence

Les techniques d'analyse dans le domaine fréquentiel sont très puissantes pour traiter des signaux de types stationnaires où les conditions de fonctionnement sont supposées invariantes par rapport au temps. Cependant, lorsque nous sommes face à un traitement de signaux transitoires ou non-stationnaires, il n'est pas intéressant d'utiliser l'analyse spectrale classique basée sur la transformée de Fourier (FFT). D'autres techniques basées sur une approche temps-fréquence sont plus intéressantes et particulièrement utiles pour l'étude des phénomènes non stationnaires et pour la détection des phases transitoires.

Les techniques temps-fréquence étudient les signaux de forme d'onde à la fois dans le temps et dans la fréquence. Elles abordent donc le problème rencontré dans l'analyse du domaine fréquentiel lorsque les signaux sont non-stationnaires. Les distributions temps- fréquence les plus utilisées sont la transformée de Fourier de courte durée (STFT) et la distribution de Wigner-Ville. L'idée de la STFT consiste à diviser le signal forme d'onde en segments avec fenêtre de courte durée, puis d'appliquer la transformation de Fourier pour chaque segment. Le spectrogramme a une certaine limitation dans la résolution temps- fréquence en raison de la segmentation du signal. Il peut être appliqué à des signaux non stationnaires avec une dynamique lente. Les transformées bilinéaires, telle que la distribution Wigner-Ville, ne sont pas fondées sur la segmentation du signal et donc peuvent surmonter ainsi la limitation de la résolution temps-fréquence du spectrogramme. Cependant, il existe un inconvénient majeur de la transformée bilinéaire en raison des interférences formées par la transformation elle-même. Ces termes d'interférence ou termes croisés rendent l'interprétation de la distribution estimée difficile. Des transformées améliorées telles que la distribution Choi-Williams ont été développées pour remédier à cet inconvénient.

II.3 Le diagnostic de panne**II.3.1 La méthodologie du diagnostic****II.3.1.1 Hypothèses de départ**

Le diagnostic est une phase importante de la maintenance corrective. De sa pertinence et de sa rapidité dépend l'efficacité de l'intervention.

Si en général 90% des pannes sont faciles à identifier (le technicien de maintenance a l'habitude de sa machine) il n'en reste pas moins qu'un grand nombre de défaillances n'ont pas de cause évidente. Il est alors nécessaire de procéder à un diagnostic afin de rechercher cette cause.

Cette recherche n'est pas aléatoire car pour être efficace, elle doit s'appuyer sur une

méthode.

Ce document a pour but d'expliciter la méthode, mais pour que la méthode soit applicable dans son intégralité il est nécessaire de poser les conditions suivantes :

- Tout intervenant effectuant un diagnostic sur un système se doit de parfaitement bien connaître le fonctionnement de ce système ainsi que le procédé qu'il permet de réaliser. Cette connaissance doit inclure le but de la machine, son cycle, sa composition et les risques liés à son fonctionnement dans tous les modes de marche, notamment en mode réglage et en mode manuel : l'intervenant doit faire preuve de responsabilité dans ses manipulations.
- La documentation du système est disponible et à jour. Cette hypothèse n'est malheureusement que trop rarement vérifiée dans le monde industriel (doc incomplète, voire inexistante ou ne comportant pas les modifications apportées au système au fil du temps). Rappelons que la maintenance de la documentation est tout aussi vitale que celle du système et qu'il incombe souvent au service maintenance de garantir la fraîcheur de cette documentation.

II.3.1.2 ETAPE 1 : MISE EN EVIDENCE DE LA DEFAILLANCE

La défaillance peut être mise en évidence :

- de façon visuelle (appel d'un opérateur qui signale la panne en donnant des indications plus ou moins vagues)
- de façon automatique par détection d'une situation anormale (ex : écoulement d'un temps de recouvrement de mouvement avec émission d'une alarme par l'automatisme). La signalisation d'un problème va alors de l'allumage d'un simple voyant, jusqu'à la remontée à une supervision, en passant par un affichage local sur la machine.

Dans tous les cas, il faut se poser les questions suivantes :

- de quelle manière se manifeste la défaillance ? (arrêt de la machine, mouvement non conforme, moteur ne tournant pas, vérin ne bougeant pas, ...). A quel stade du cycle le système est-il devenu défaillant ?
 - que peut-on observer à ce stade ?
 - voyants sur l'automate et sur la machine
 - messages (s'il y a un afficheur)
 - état de la machine
- a-t-on déjà une première idée permettant de cerner la zone en défaillance ?

Les réflexions menées à cette étape vont orienter la recherche qui va suivre. On comprend quelle est l'importance de la connaissance de la machine pour que cette orientation soit la bonne.

Le but du diagnostic est de cercler autour de la défaillance en réduisant le diamètre du

cercle à chaque nouvelle étape de la méthode, et ce jusqu'à ce que la panne soit identifiée.

II.3.1.3 ETAPE 2 : L'ANALYSE DES RISQUES

Avant d'entreprendre le travail il faut définir les mesures de sécurité à prendre. Le but est ici de :

- se protéger soi-même
- protéger les autres (les curieux qui mettent les mains n'importe où protéger la machine s'il y a risque de casse)
- Les dangers à prendre en compte ont différentes sources :
- Fluides sous pression
- Sources thermiques
- Energie électrique
- Flux de production entrants et sortants de la machine
- Dangers mécaniques

On peut donc envisager la mesure suivante :

- utilisation de matériel de protection (gants, lunettes, tapis, outils isolés, ...)
- balisage de la zone de travail pour en empêcher l'accès
- apposition d'un panneau d'avertissement
- établissement éventuel d'un bon de travail
- consignation de l'appareil si nécessaire
- vérification des instruments de mesure

Si des mesures doivent être faites (tension, intensité) il ne faut pas consigner tout de suite : ne consigner (si nécessaire) ou condamner la partie en défaut que pour les interventions de réparation.

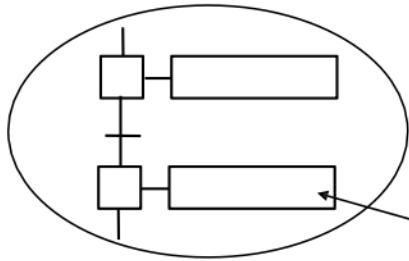
En cas de consignation ou de condamnation, vérifier l'absence de tension.

N'oubliez pas que vous devez posséder **une habilitation** pour les interventions de nature électriques.

II.3.1.4 ETAPE 3 : RECHERCHE DE LA CHAÎNE FONCTIONNELLE

Il s'agit ici d'interpréter les observations en se basant sur sa connaissance de la machine et du déroulement du cycle afin d'identifier toutes **les chaînes fonctionnelles** ayant un rapport avec la défaillance.

C'est ici le point d'analyse le plus délicat.



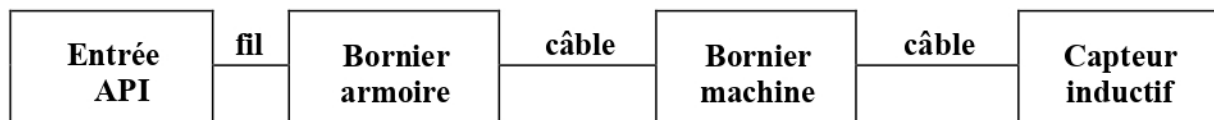
La réflexion doit permettre d'identifier cette partie du cycle comme étant la zone de la défaillance

ex : l'action 2 ne se fait pas

Ainsi on met en cause une ou plusieurs chaînes fonctionnelles :

- chaînes de commande qui génèrent les actions
- chaînes d'acquisition qui reçoivent les informations combinées dans la réceptivité

On pourra représenter ces chaînes sous forme de schémas bloc par exemple.



Il reste alors à terminer le raisonnement pour dire **quelle est la chaîne parmi toutes celles identifiées qui est en défaillance**. Ce raisonnement doit être logique et doit s'appuyer sur la connaissance du cycle machine ainsi que sur la documentation technique disponible.

On peut pour cela s'aider des voyants des cartes E/S automate (ex : voyants d'entrée et de sortie éteints = chaîne capteur en défaut ; voyants d'entrée et de sortie allumés = chaîne actionneur en défaut).

Certains tests globaux simples permettent de confirmer le raisonnement :

- une chaîne fonctionnelle capteur peut être facilement testée en sollicitant le capteur manuellement (avec la main pour une cellule ou un contact mécanique, avec un objet métallique pour un capteur inductif, ...). Il suffit de constater si l'information arrive jusqu'à l'automate en examinant le voyant d'entrée correspondant
- un actionneur peut être testé manuellement (dans la mesure où la sécurité n'est pas compromise = l'intervenant sait ce qu'il fait). Un forçage manuel des contacts d'un contacteur permet de constater le bon ou le mauvais fonctionnement de la chaîne de puissance électrique en aval (attention, ce forçage doit être bref pour éviter tout risque de casse machine). Un forçage de distributeur pneumatique permet de constater le bon ou le mauvais fonctionnement du circuit pneumatique en aval de ce distributeur.

Remarque : l'utilisation de la console de programmation s'avère ici très utile pour qui sait s'en servir.

II.3.1.5 ETAPE 4 : LISTE DES MAILLONS DE LA CHAÎNE

La chaîne fonctionnelle étant identifiée, il faut en lister les maillons, c'est à dire les

éléments qui la composent et ce de façon exhaustive :

Chaîne d'acquisition (entrée)

- carte d'entrée API
- fils et embouts
- bornes et connecteurs
- contacts avec leurs connexions
- capteurs avec leur réglage

Chaîne de commande (sortie)

- carte de sortie API
- fils et embouts
- bornes et connecteurs
- contacts de relais et de contacteurs avec leurs connexions
- bobines de relais et de contacteurs avec leurs connexions
- électrodistributeurs (connecteur, bobine, électrovanne, distributeur)
- tubes pneumatiques ou tuyaux hydrauliques
- raccords
- limiteurs de débit
- vérins
- moteurs
- accouplements mécaniques

Un dossier technique à jour s'avère des plus utiles à ce point (électrique, pneumatique, hydraulique, mécanique)

II.3.1.6 ETAPE 5 : LISTE DES MODES DE DEFAILLANCES

Il s'agit, pour chaque élément de la chaîne, de déterminer les modes de défaillances qui expliquent la panne constatée.

Ex: le moteur ne tourne pas : fil entre sortie automate et bobine de contacteur coupé

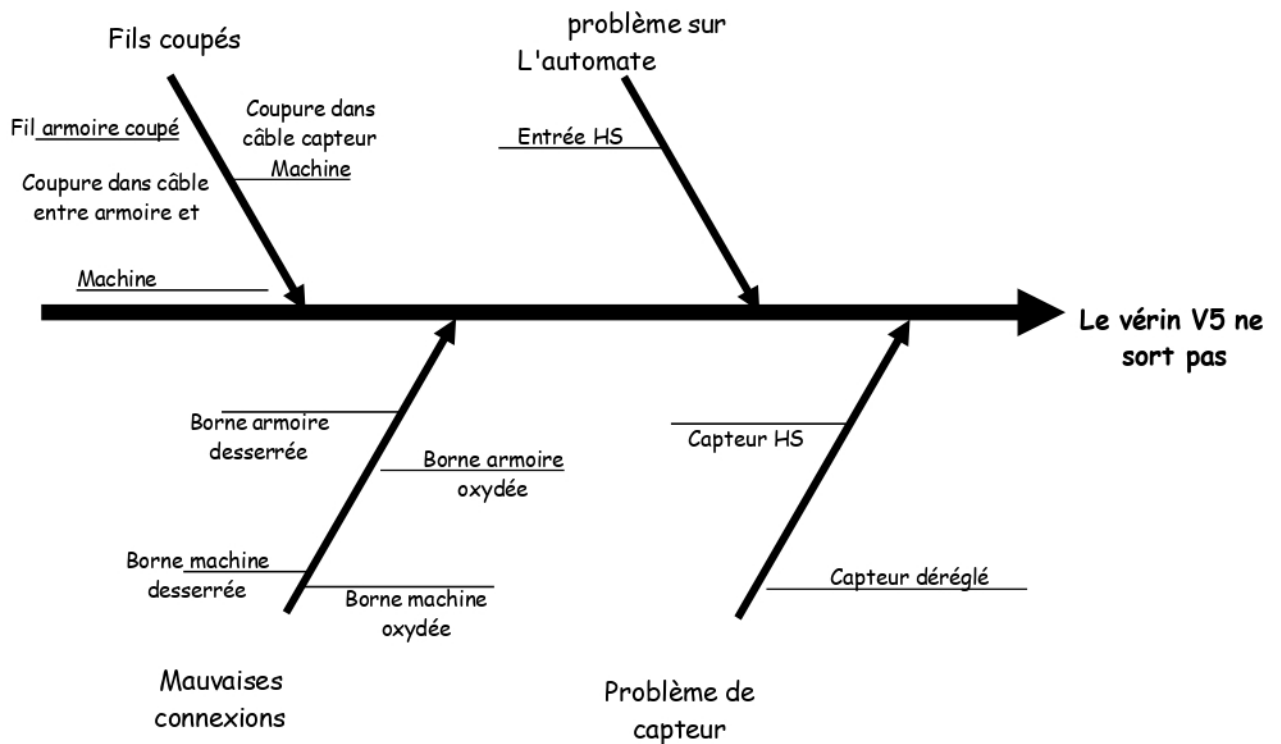
N'oublions pas qu'un dérèglement mécanique est aussi une panne (cellule photoélectrique mal orientée, accouplement desserré, ...)

Cette étape peut être présentée sous une forme conviviale :

- tableau de cause à effet
- diagramme d'Ishikawa
- autre

Exemple de diagramme d'Ishikawa :

La chaîne fonctionnelle incriminée est une chaîne d'acquisition. La conséquence de la panne est que le vérin V5 ne sort pas et bloque le cycle.



II.3.1.7 ETAPE 6 : CRITERES DE TEST

Chaque élément de la chaîne étant identifié par ses modes de défaillance, il faut classer les tests selon des critères permettant de réduire le temps d'intervention :

- rapidité
- probabilité
- accessibilité
- Sur les parties
- électrique
- pneumatique
- hydraulique
- mécanique

Ex : si l'ampoule ne s'allume pas il est raisonnable de penser qu'elle est grillée (probabilité et rapidité) plutôt que de défoncer le mur à la recherche d'une coupure du câble.

Les tests du type "visuel" sont à privilégier dans un premier temps : on vérifie sans instrument de mesure. (Exemple : vérification de l'état des connexions).

Les tests nécessitant un démontage se feront en dernier lieu.

Pour les tests avec mesures d'une grandeur électrique, il est préférable de privilégier les mesures de tension à celles de continuité. En effet, la mesure de continuité nécessite l'isolement des circuits à tester. Les mesures d'intensité ne se feront que si c'est absolument nécessaire, car elles imposent la mise en série de l'appareil dans le circuit de mesure, et de plus il faut respecter les limites d'ampérage pour l'appareil.

II.3.1.8 ETAPE 7 : PROCEDURES DE TEST

Pour chaque mode de défaillance identifié à l'étape 5, il faut maintenant imaginer un test. Tous ces tests doivent être présentés (du premier au dernier) selon l'ordre défini à l'étape 6

On peut présenter ces tests sous forme de tableau Dans ce tableau on précise :

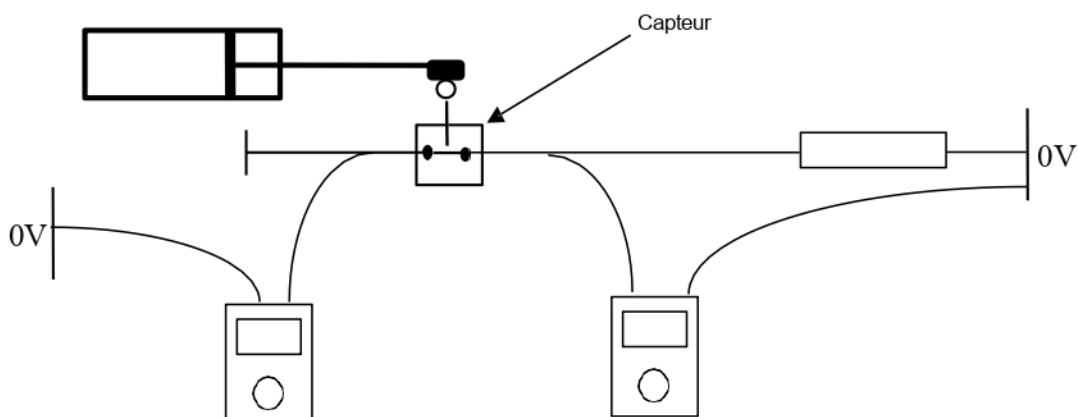
- l'élément à tester
- le principe du test (visuel, avec instrument)
- l'instrument utilisé s'il y a lieu
- les point précis du test (ex : où placer les sondes du voltmètre)
- les résultats normalement attendus de ce test
- une observation éventuelle

**Ex : mesure de tension à l'aide du multimètre entre le 0V et la borne X1/7 :
on devrait trouver du 24V**

Lorsque tous les tests ont été défini de manière exhaustive, on peut passer à la phase active du diagnostic, c'est à dire l'examen et la mesure.

Les tests sont réalisés l'un après l'autre en commençant par le premier de la liste. Les résultats sont notés dans le tableau dans la colonne mesure. Lorsque le résultat est différent du résultat attendu, c'est qu'on a trouvé l'élément défaillant.

Exemple : dans cette configuration de test, le contact du capteur est censé être fermé.



Si le capteur est bien fermé, la mesure au test 2 donne normalement 24V aux bornes de l'entrée. Si on obtient une mesure de 0V, c'est que le capteur est défaillant ou mal réglé, ou qu'une connexion est défaillante au niveau du capteur.

II.3.1.9 ETAPE 8 : REPARATION

Les tests étant tous définis, il s'agit de les réaliser jusqu'à ce que la panne soit trouvée.

Il ne reste plus alors qu'à remplacer l'élément défectueux et à essayer à nouveau la machine.

Si la réparation est temporairement impossible (manque de pièce en stock), il est nécessaire de déterminer les possibilités en marche dégradée si on ne veut pas que la production reste bloquée.

II.3.1.10 ETAPE 9 : COMPTE-RENDU

L'intervention de maintenance corrective doit laisser une trace dans l'organisation du système de maintenance de l'entreprise. Cette trace se fait sous forme de compte-rendu écrit ou informatisé et vient alimenter un historique qui pourra servir d'outil d'analyse.

Les documents et supports de saisie propres à l'entreprise sont utilisés dans ce cas, mais un minimum d'informations est requis :

- référence de la machine
- nature de l'intervention
- date (et heure) de l'intervention
- identification de l'auteur
- durée de l'intervention
- pièces changées s'il y a lieu
- coût éventuel des pièces

Chapitre III : Maintenance préventive des équipements

III.1 LES OPTIONS DE LA MAINTENANCE

Les options susceptibles d'être mises en œuvre par le service maintenance relèvent de deux concepts principaux :

- 1- La maintenance corrective
- 2- La maintenance préventive

III.1.1 La maintenance corrective

La maintenance corrective (ou curative) correspond à une attitude passive d'attente de la panne ou de l'incident. Elle n'est entreprise qu'après constat d'un état de panne. La réaction consiste alors à éliminer le défaut, grâce à un dépannage ou une réparation. C'est donc l'improvisation avec toutes les conséquences qui en résultent (pertes de temps, arrêts prolongés des machines, absences de schémas de dépannage), elle est appelée aussi maintenance de catastrophe. C'est la politique d'entretien la plus coûteuse vue sous l'aspect coûts directs et coûts indirects.

III.1.2 La maintenance préventive

La maintenance préventive correspond à la volonté de prévoir la dégradation du bien (matériel ou équipement), afin d'éviter d'être pris au dépourvu par la panne. Dans ce type de maintenance, on n'attend pas que le matériel ou l'équipement tombe en panne. Elle est effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou d'une dégradation d'un service rendu. Elle consiste à :

- Procéder à des visites systématiques en cours de marche ou à l'arrêt pour suivre les usures des pièces. Ces visites sont à caractère périodiques et déterminées d'avance;
- faire des contrôles en cours de marche ou à l'arrêt ;
- opérer à des réglages et resserrage et changer éventuellement des pièces défectueuses.

Il existe alors deux solutions :

a. Solution 1 : Le changement ou la réparation systématique d'organes : c'est la maintenance systématique qui consiste à bien connaître les processus de dégradation.

b. Solution 2 : Le changement ou la réparation des organes en fonction de leur état de dégradation : c'est la maintenance conditionnelle qui impose une surveillance de la progression du défaut ;

c. Solution 3 : L'élimination définitivement des défaillances. C'est la maintenance améliorative. Elle nécessite une réflexion pour :

- Déterminer les causes réelles du problème

- Envisager les remèdes adaptés à leur suppression.

III.1.3 Maintenance systématique

C'est une maintenance préventive effectuée selon un échancier établi suivant le temps d'usage ou le nombre d'unités d'usage (la loi de dégradation doit être connue). Dans ce type de maintenance, les opérations de maintenance sont effectuées suivant un calendrier (journalier, hebdomadaire, mensuel) et concernant tous les produits consommables, tels que les huiles, les graisses, les liquides de coupe et les composants de faibles durées de vie par rapport aux machines. Ce type de maintenance demande de la rigueur pour être planifiée.

III.1.4 Maintenance conditionnelle

C'est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.) révélateur de l'état de dégradation du bien. Elle s'applique aux organes dont la dégradation peut être mise en évidence par des indicateurs. Cette forme moderne de maintenance permet d'assurer le suivi continu du matériel en service, dans le but de prévenir des défaillances attendues. 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 en approche d'un seuil de dégradation prédéterminé. La condition première est que le matériel s'y prête (existence d'une dégradation progressive et détectable) et qu'il mérite cette prise de charge (criticité du matériel). Par exemple elle est peu exploitée pour surveiller les machines de production des industries type atelier (taux de pollution des huiles de graissage, le PH des liquides d'arrosage, les vibrations, les bruits, etc.). Mais, elle est largement pratiquée sur les machines de production des industries type process.

III.1.5 Termes et définitions relatifs à la maintenance

III.1.5.1 Termes généraux

1. **Bien** : C'est un produit industriel conçu et réalisé pour assurer un service donné. Les biens peuvent être classés en biens d'équipement, biens intermédiaires et biens de consommation. Ils peuvent être aussi classés en fonction de leur durabilité.
2. **Durée de vie** : C'est la durée pendant laquelle un bien a accompli la fonction qui lui a été assignée. La durée de vie d'un bien s'exprime en unité de temps (années, heures, cycle, ...)
3. **Panne** : C'est l'état d'une entité inapte à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation données.

4. **Défaillance** : C'est une altération ou une cessation de l'aptitude d'un bien à remplir une fonction requise. Les défaillances peuvent être qualifiées et classées de différentes manières. soit : en fonction de la rapidité de manifestation ; en fonction du degré d'importance ; en fonction des causes; en fonction des conséquences, etc..

5. **Anomalie** : C'est une déviation par rapport à ce qui est attendu. L'anomalie justifie une investigation qui peut déboucher sur la constatation d'une non-conformité ou d'un défaut.

6. Taux de défaillance ou taux d'avarie

$(\lambda(t))$ C'est une probabilité de défaillance dont l'allure de la courbe est donnée par la courbe suivante :

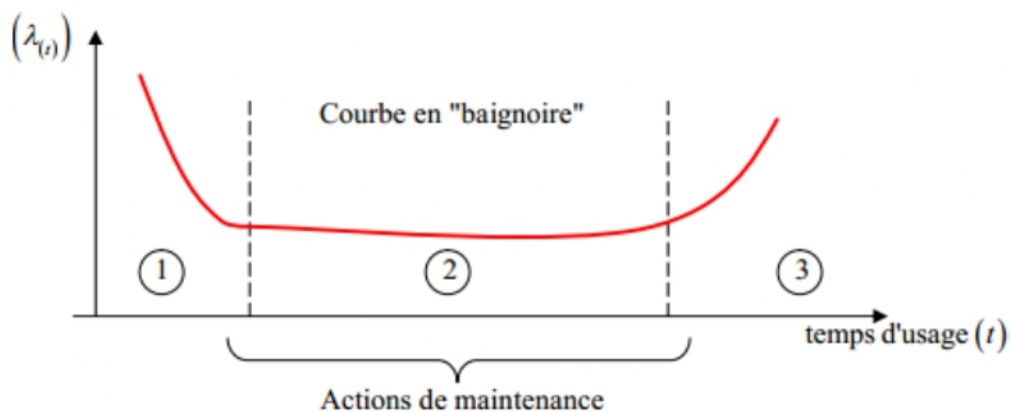


Figure III .1 : Taux de défaillance

- Période de défaillance précoce (ou période de jeunesse)
- Période de défaillance à taux constant (ou zone de maturité)
- Période de défaillance par vieillissement (période de fin de vie ou zone d'usure)

III.1.5.2 Opérations de maintenance préventive

Les opérations suivantes sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

1- Inspection

- C'est une activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie.
- Elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies.
- Elle peut être effectuée sous forme de "rondes" et à pour but la détection de défaillances mineures :

2- Défauts de lubrification (contrôles des niveaux)

- défauts de pression, de températures, de vibrations.
- détection visuelle de fuites,

- détection d'odeurs, de bruits anormaux.

3- Dépannages simples : réglage de tension de courroie, échanges de lampes...

4- Contrôle : C'est une activité qui consiste à la vérification de la conformité du bien par rapport à des données préétablies, suivie d'un jugement. L'activité de contrôle peut :

- Comporter une activité d'information,
- Inclure une décision (décision de non-conformité, d'acceptation, d'ajournement);
- Déboucher sur des actions correctives

5- Visite : C'est une activité consiste à faire un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite partielle ou limitée) des différents éléments d'un bien. Elle peut :

- Entraîner certains démontages;
- déclencher des opérations correctives des anomalies constatées ;
- Impliquer des opérations de maintenance de 1er niveau.

III.1.5.3 Les opérations de maintenance corrective

1- **Dépannage :** C'est l'action sur un bien en panne en vue de le remettre en état de fonctionnement, provisoirement avant réparation compte tenu de l'objectif. Une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors cycle de procédure de coût et de qualité et dans ce cas, sera suivie de la réparation de dépannage. L'opération de maintenance corrective n'a pas de condition d'applications particulières.

2- **Réparation :** C'est une intervention définitive et limitée dans le temps de maintenance corrective après une panne ou une défaillance partielle. Pour l'application de la réparation, l'opération de la maintenance corrective peut être décodée après décision soit :

- A la suite d'un incident ou d'une défaillance ;
- Après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

III.1.5.4 Autres activités du service maintenance

1- **La révision :** est une opération de maintenance préventive ou corrective selon qu'elle est déclenchée par un échéancier, par la mesure d'une usure ou par une défaillance. C'est l'ensemble des actions d'examen, de contrôle et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique pendant un temps ou pour un nombre d'unité d'usage donné.

2- **La rénovation :** Les travaux de rénovation comprennent :

- L'inspection complète de tous les organes ;

- La reprise dimensionnelle complète (réparation des éléments usés) ou remplacement des pièces déformées ;
- Vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles

3- **Défaillants.** La rénovation apparaît comme l'une des suites possibles d'une révision générale au sens strict de sa définition.

4- **La reconstruction :** C'est une remise en l'état défini par le cahier des charges qui impose le remplacement des pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes. Elle intervient à la fin de vie du bien. Toutes les pièces sensibles sont remplacées par des pièces d'origine. On peut prévoir des performances supérieures à celles d'origine. En plus de la maintenance et de la durabilité, Les modifications apportées peuvent concerner: la capacité de production, l'efficacité, la sécurité, etc..

5- **La modernisation :** C'est une activité d'amélioration de l'aptitude à l'emploi d'un bien par des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine. Elle concerne le remplacement d'équipements, d'accessoires, d'appareils. Ils consistent à remplacer des équipements, des accessoires, des appareils et composants âgés ou à leurs adjoindre des composants ou des logiciels d'une génération nouvelle. L'opération de modernisation peut aussi être exécutée dans le cas d'une rénovation ou d'une reconstruction.

6- **Les travaux neufs :** Ils contiennent, entre autres, les tâches suivantes :

- avis sur le choix du matériel.
- réception technique et vérification de la conformité.
- Installation.
- mise au point (réglages, essais préliminaires...).
- mise en service.

III.2 Les cinq niveaux de maintenance (Norme AFNOR X 60 011)

NIVEAUX	TYPES DE TRAVAUX	PERSONNEL D'INTERVENTION	MOYENS
1er niveau	Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage d'équipement, ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité.	Pilote ou conducteur du Système	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
2ème niveau	Dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou d'opérations mineures de maintenance préventive (rondes)	Technicien habilité	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation et pièces de rechanges disponibles sans délai
3ème niveau	Identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures.	Technicien spécialisé	Outillage prévu et appareils de mesure, banc d'essai, contrôle...
4ème niveau	Travaux importants de maintenance corrective ou préventive	Équipe encadrée par un technicien spécialisé	Outillage général et spécialisé, matériels d'essais, de contrôle...
5ème niveau	Travaux de rénovation, de reconstruction ou réparation importantes confiées à un atelier central	Équipe complète et polyvalente	Moyens proches de la fabrication

III.3 Les scénarios de la maintenance (Norme AFNOR X 60 011)

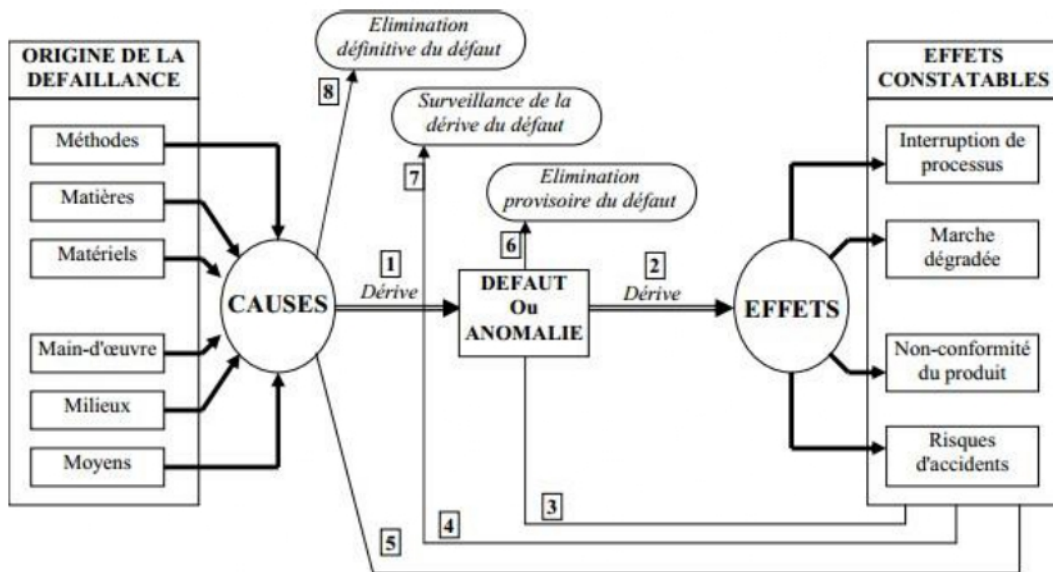


Figure III .2: Les différentes attitudes de la fonction maintenance

Chemin [1]-[2]-[3]-[6] □ Scénario (A) : Attitude corrective □ Action sur le défaut

Chemin [1]-[2]-[4]-[7] □ Scénario (B) : Attitude préventive □ Action sur la dérive, en amont du défaut

Chemin [1]-[2]-[5]-[8] □ Scénario (C) : Attitude améliorative □ Action sur la cause initiale

III.4 Les diverses opération de la maintenance (selon AFNOR)

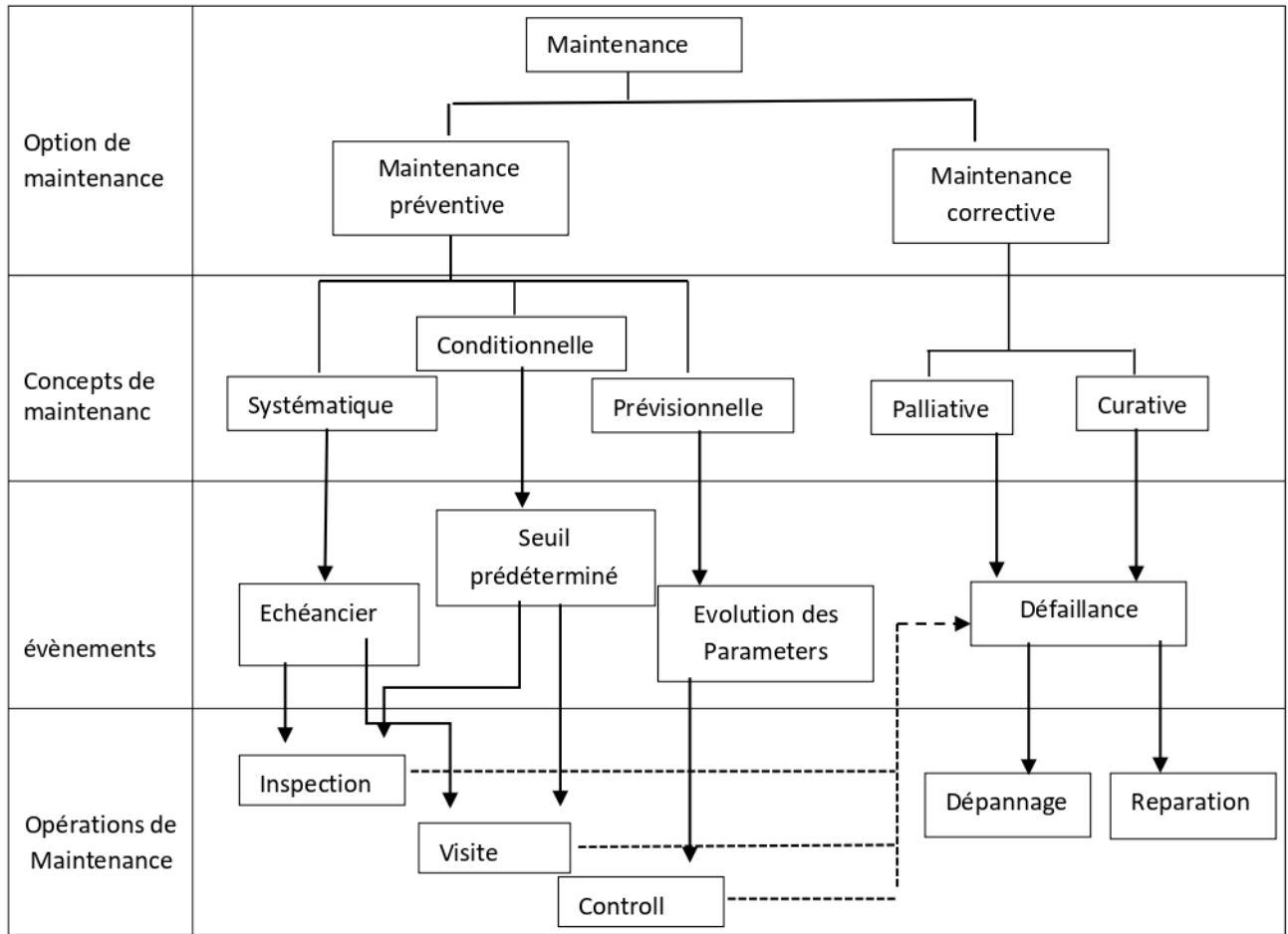


Figure III .3: Synoptique des modes de maintenance

III.5 Déroulement des opérations de maintenance

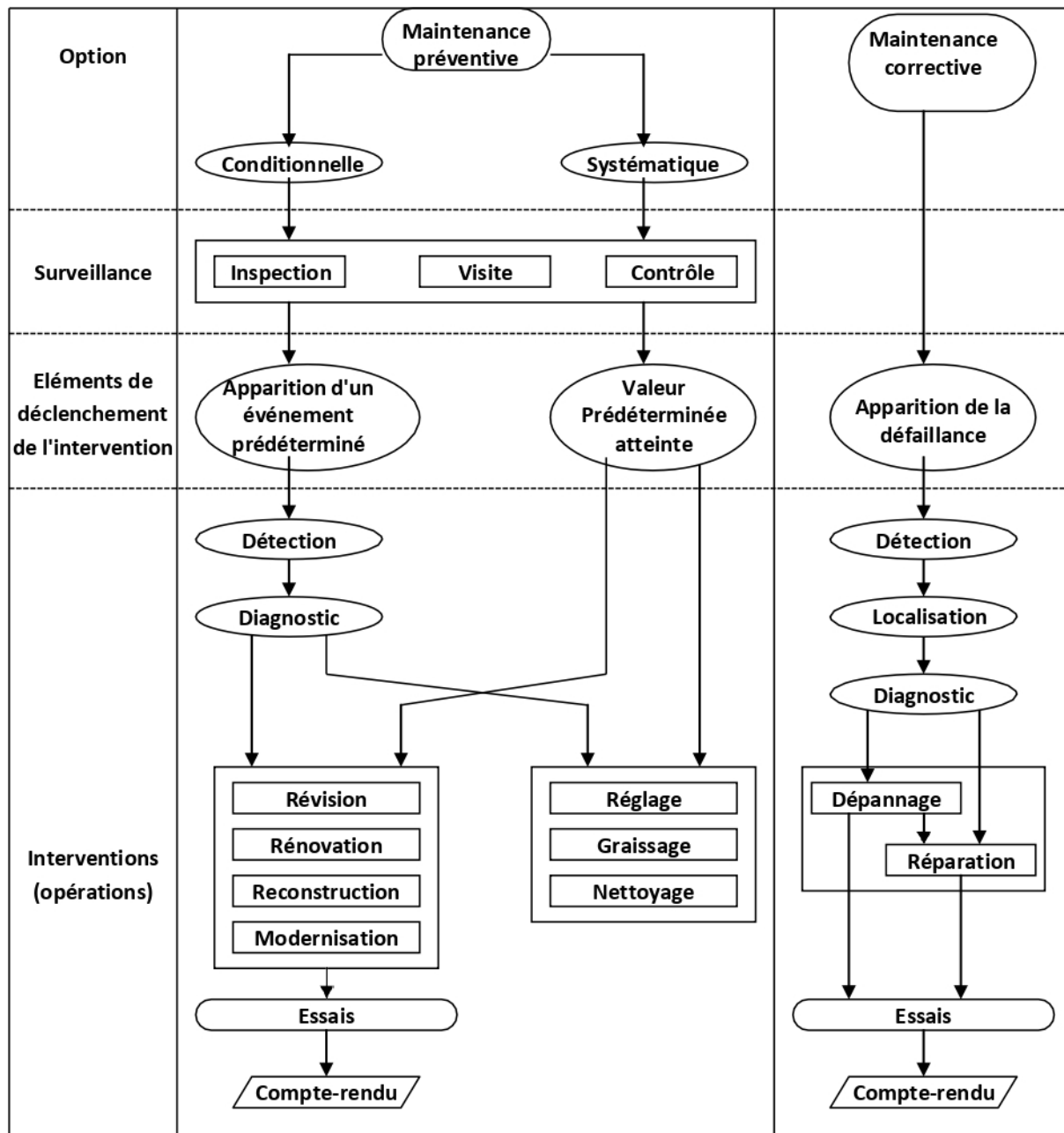


Figure III.4 : Déroulement dès l'opération de la maintenance

III.6 Discision d'application d'un type de maintenance

Concernant le choix de l'application de l'un des concepts de maintenance industrielle, la prise de décision est fonction de certaines question devant être posées et qui sont en relation avec: L'incidence de défaillance sur le système de production ; le coût de la panne; la possibilité d'utilisation des technique de surveillance; la rentabilité des ces techniques de surveillance. Les figures 3-4 et 3-5 donnent le choix du concept de maintenance

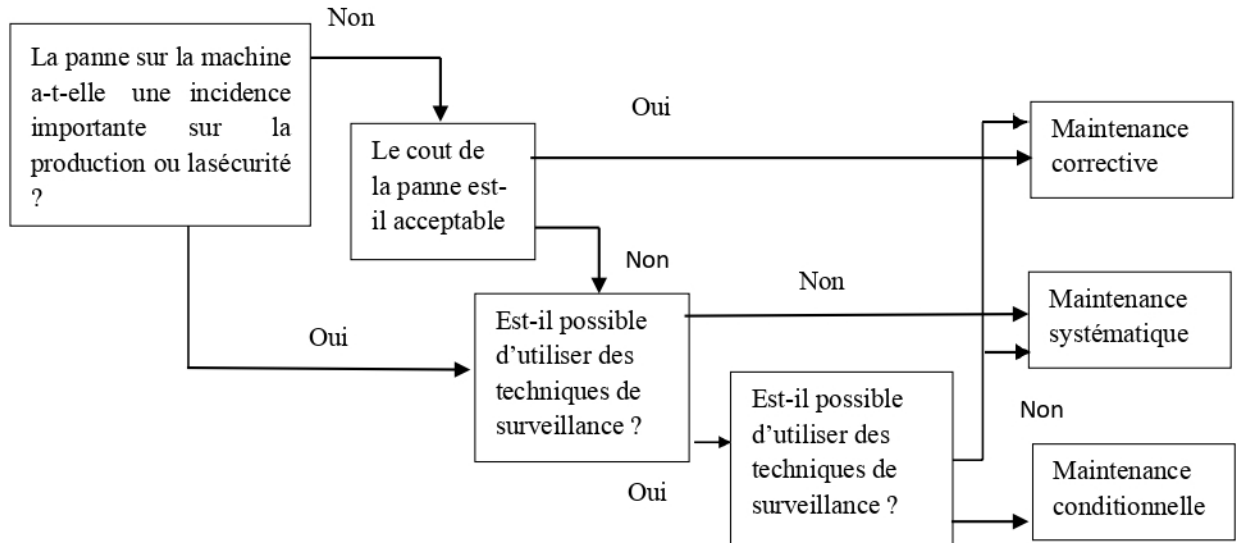


Figure III.5 : Logigramme de décision en fonction du coût

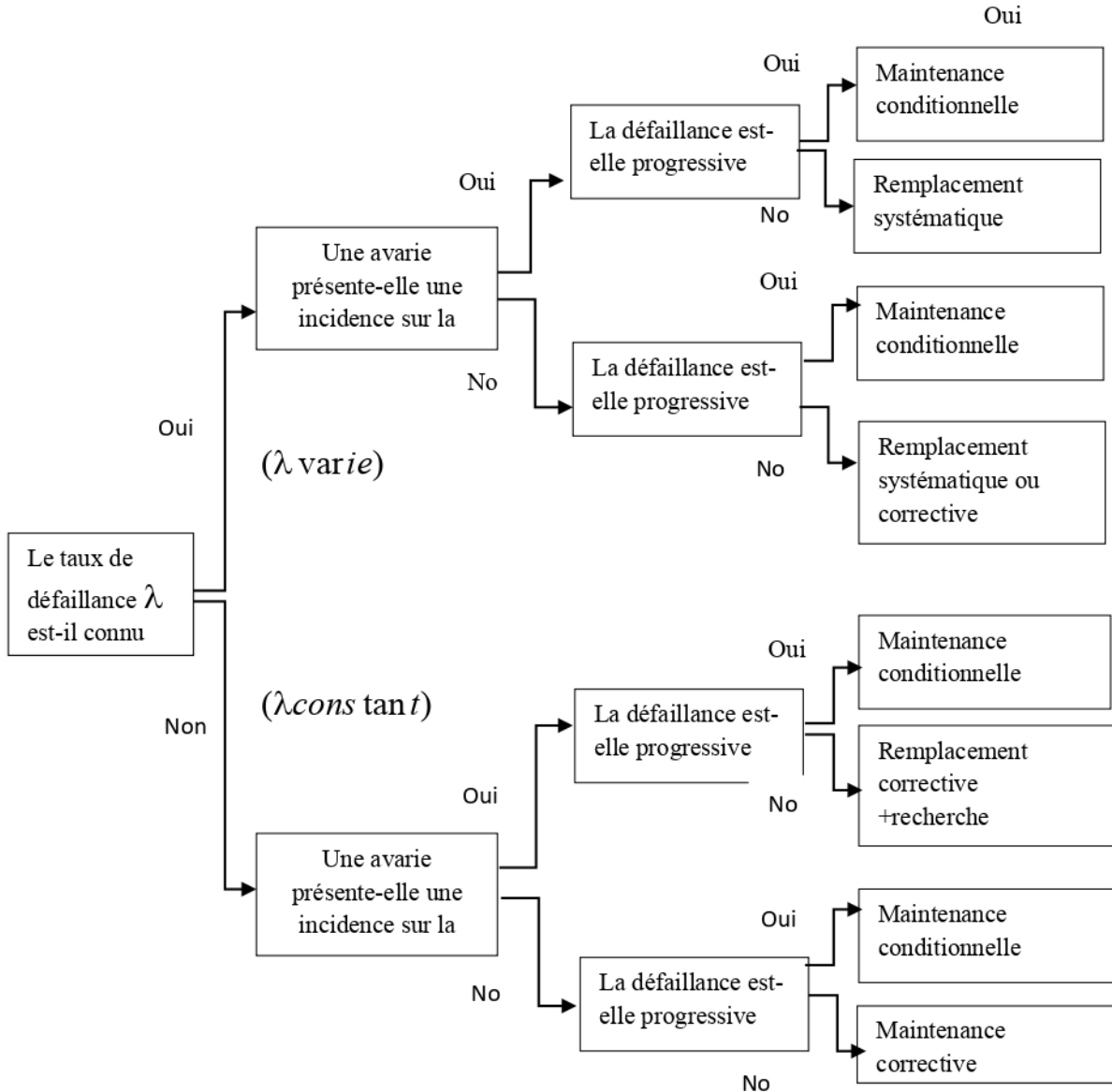
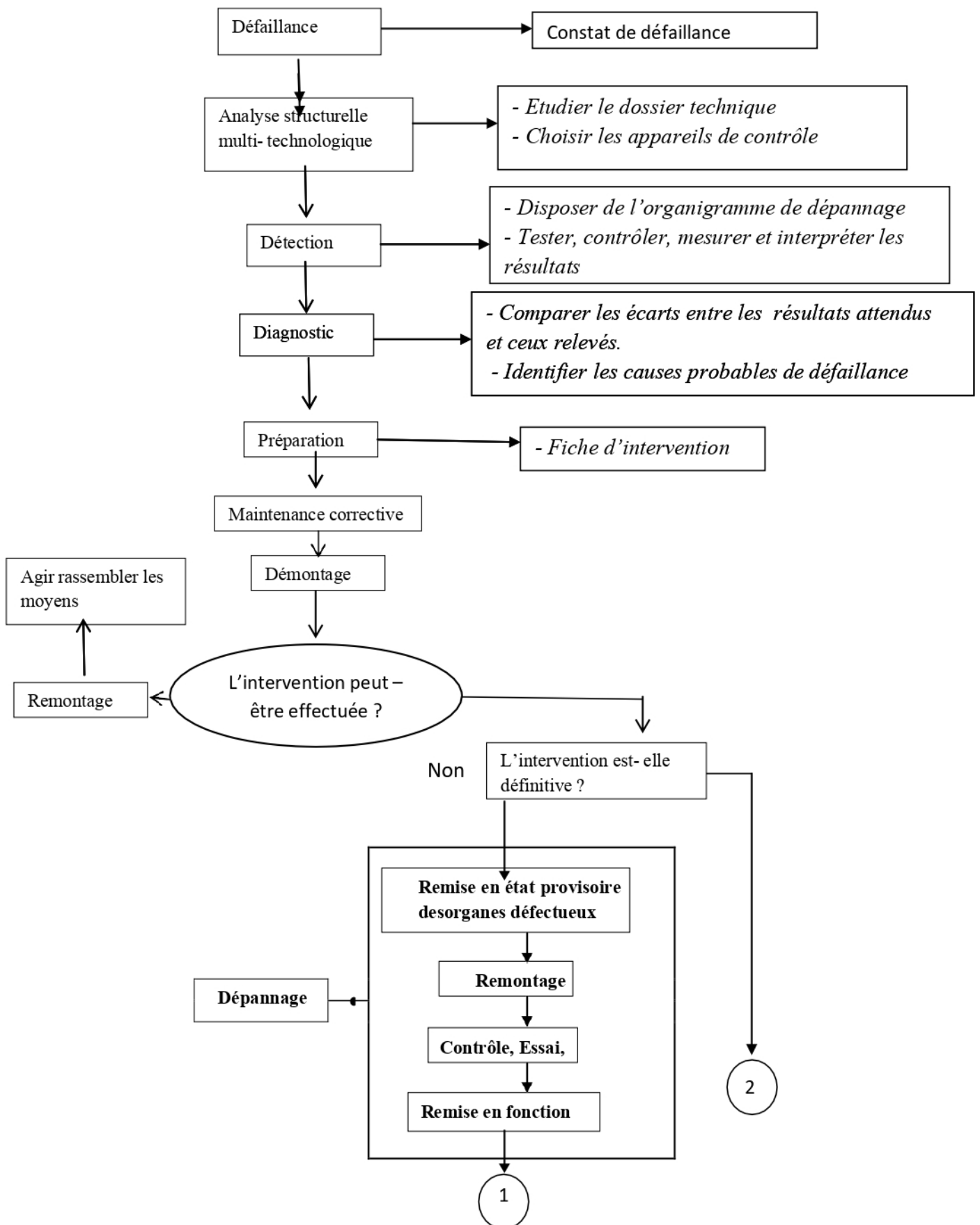
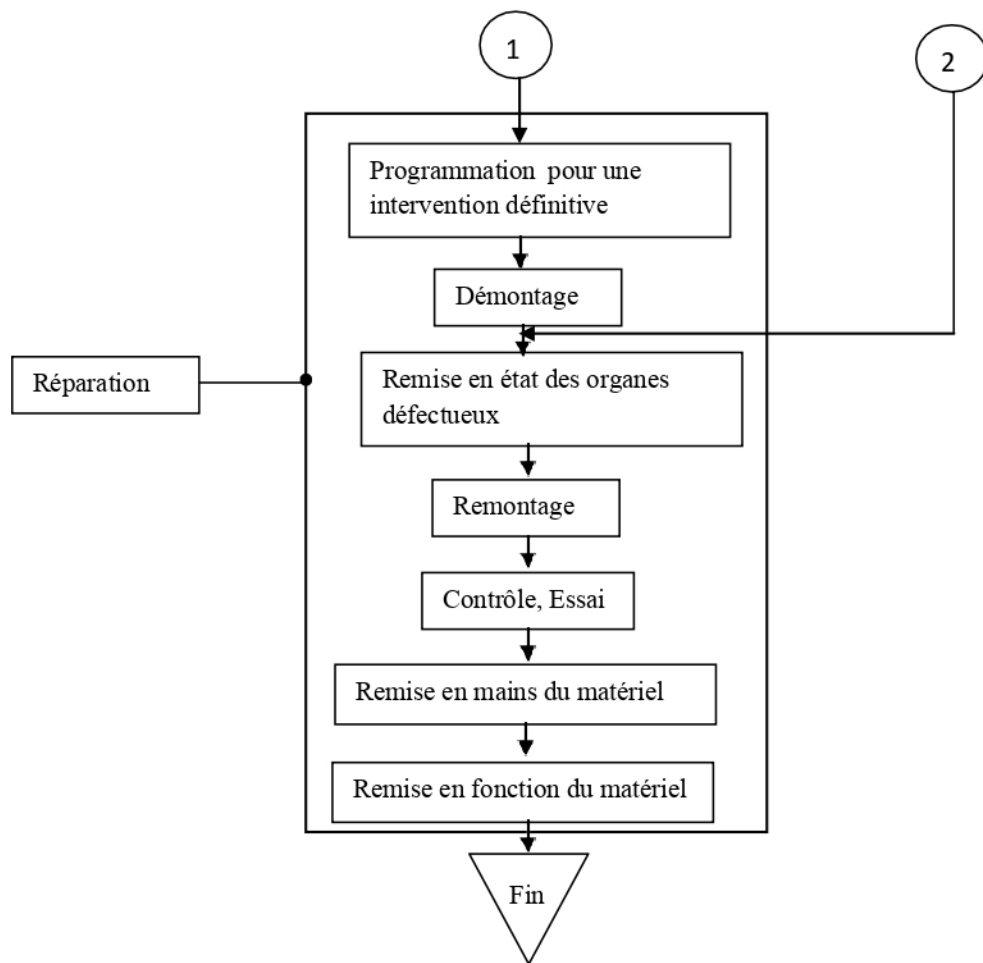


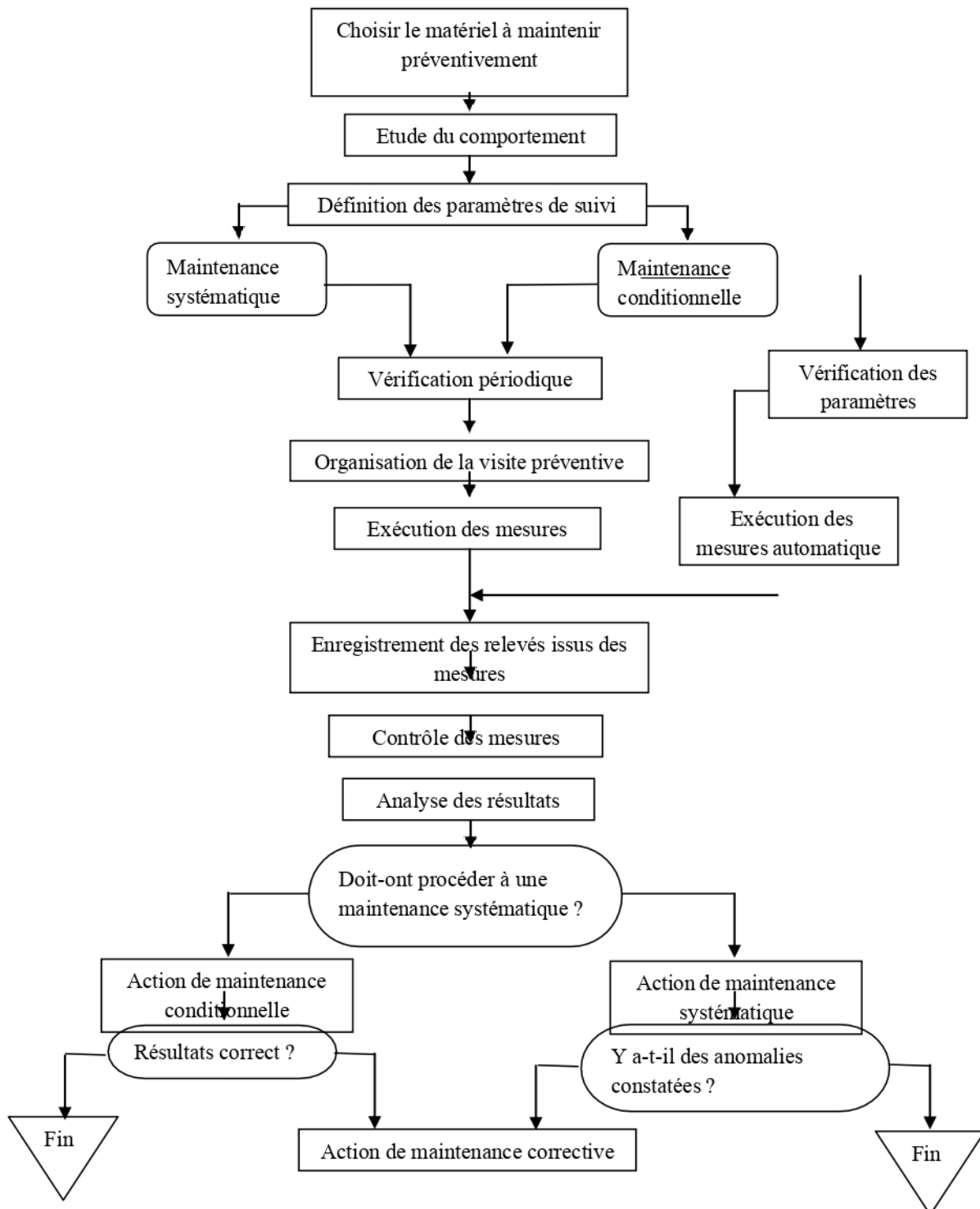
Figure III.6 : Logigramme de décision en fonction de l'incidence de la défaillance

III.7 Déroulement d'une action de maintenance corrective



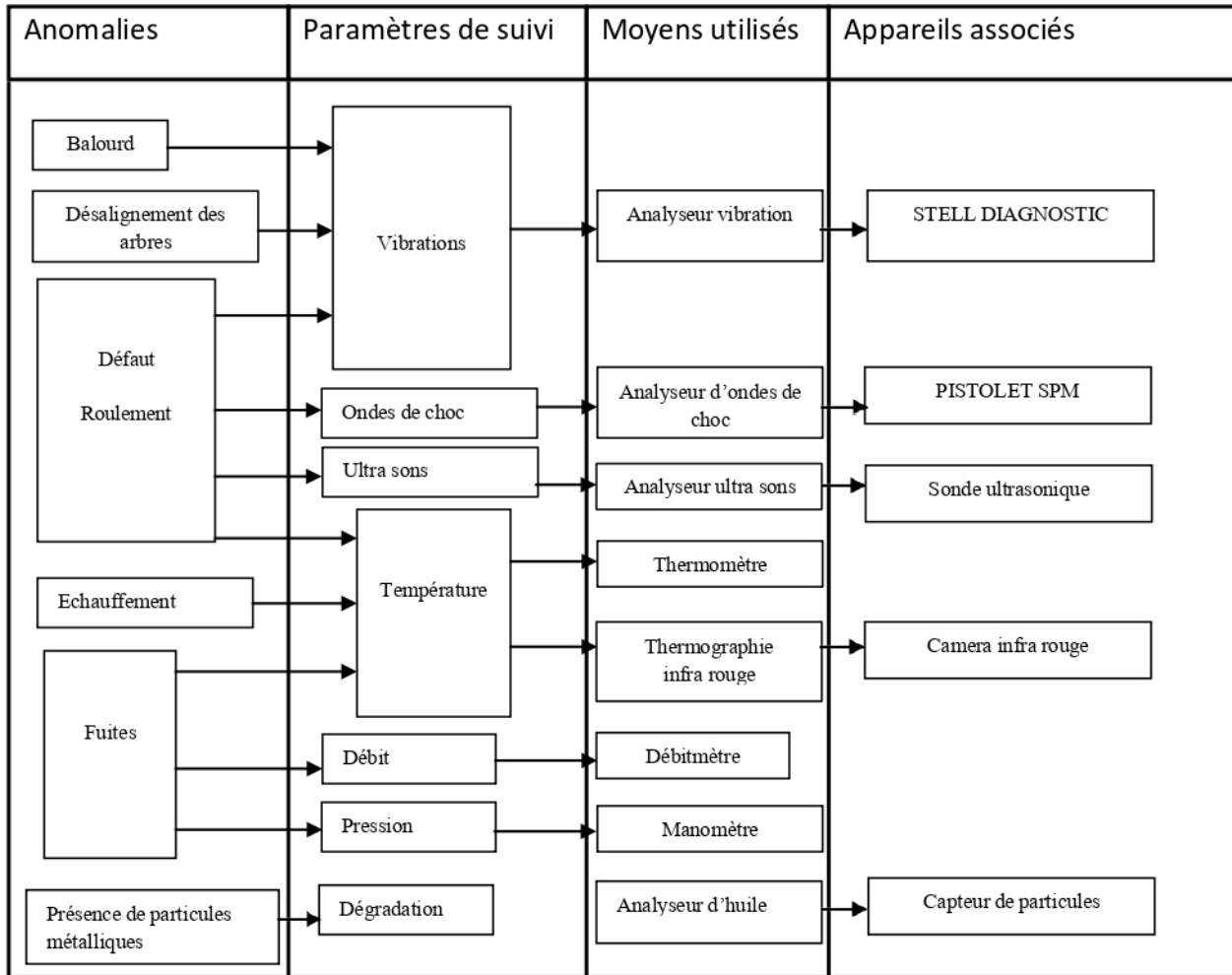


III.8 Déroulement d'une action de maintenance préventive



III.9 Relation entre anomalie-paramètres-moyen

En vue de mettre en place une maintenance préventive systématique ou conditionnelle, le tableau permet de mettre en liaison les anomalies ou les défauts avec les paramètres de suivi et les moyens utilisés.



III.10 Lecture d'un schéma électrique

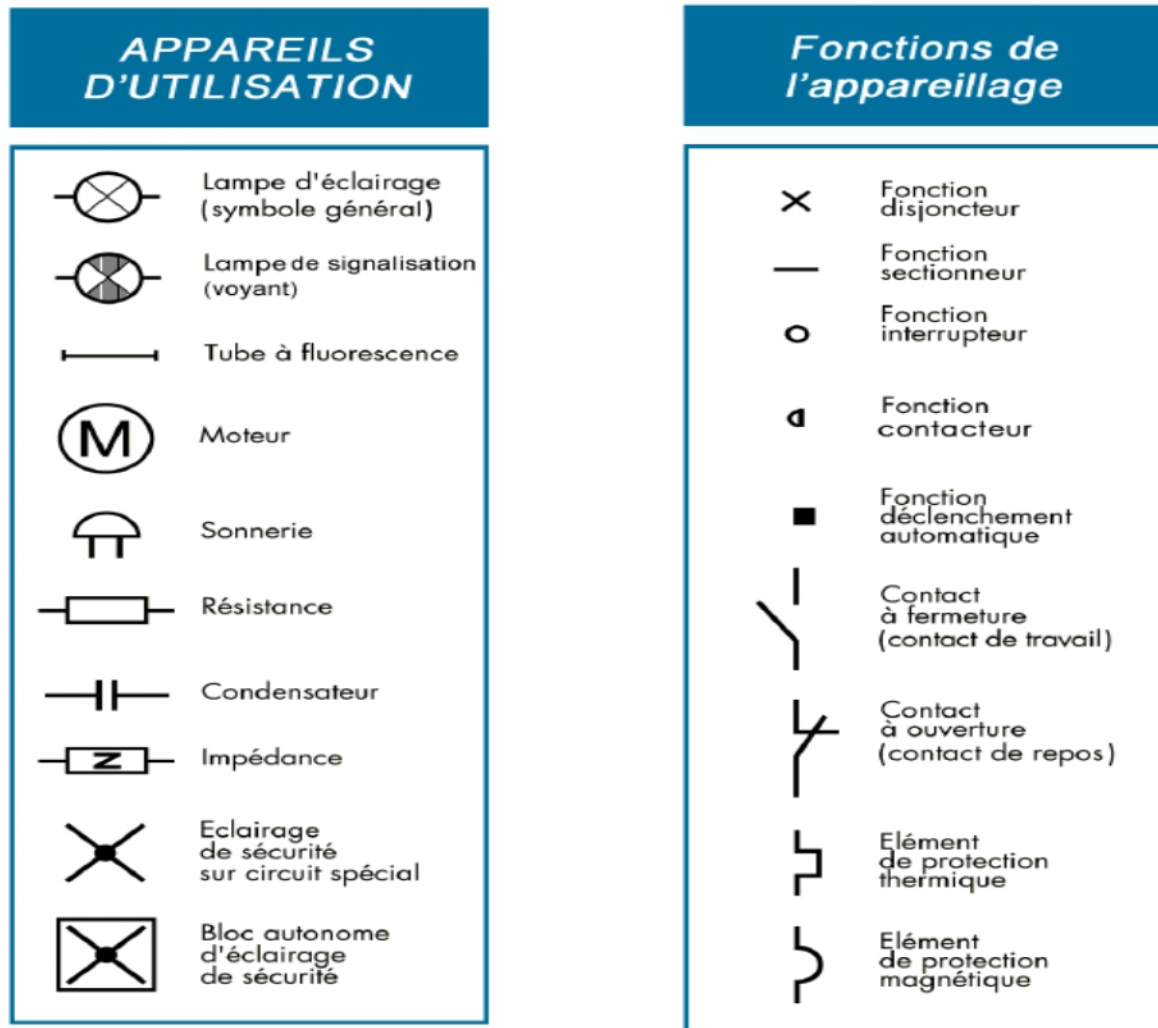
III.10.1 Définition

Un schéma électrique est un dessin qui représente un simple circuit électrique ou une installation électrique complète, voir complexe. Des symboles graphiques représentent les éléments de cette installation mais aussi les connexions qui les relient fonctionnellement. Nous aurons donc, par exemple, des symboles pour représenter un voyant lumineux, un interrupteur et des fusibles. Nous avons aussi des symboles pour représenter des fils électriques qui serviront à relier notre voyant avec son interrupteur et ses fusibles.

Pour représenter les lignes électriques qui alimentent nos installations électriques nous parlons alors de réseau électrique. Un réseau électrique (pour le transport de l'énergie électrique) sera composé de générateurs (centrales de production d'énergie électrique), de transformateurs, de câbles, de poteaux, de points de connexion ou d'interconnexion et des dispositifs de protection pour chacun des éléments précités.

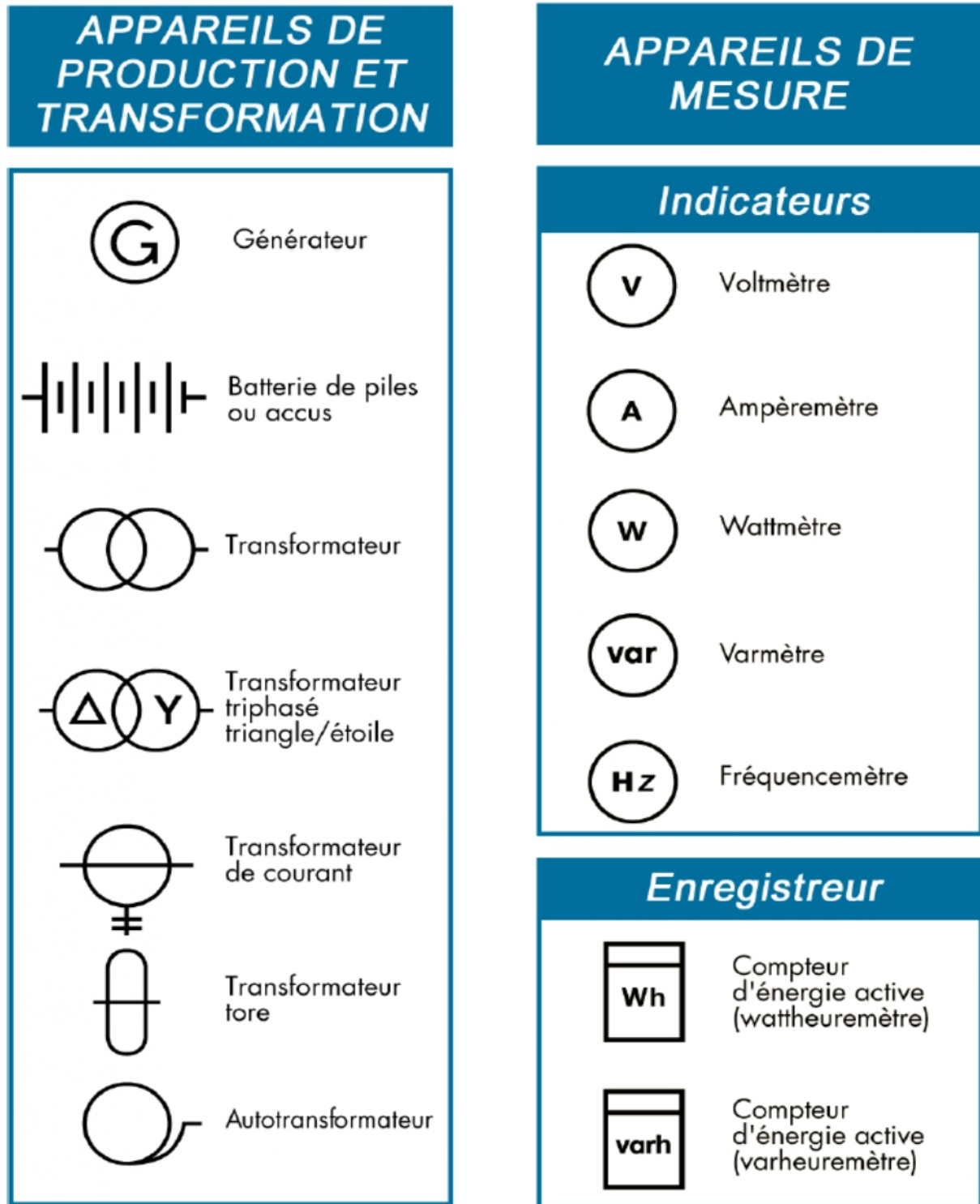
III.10.2 But d'un schéma électrique

- Expliquer le fonctionnement de l'équipement (il peut être accompagné de tableaux, de diagrammes et chronogrammes),
- Fournir les bases d'établissement et de réalisation physique de l'installation,
- Faciliter les essais (mise en service),
- Faciliter la maintenance et les dépannages plus rapidement.



III.10.3 Les symboles

Ce qui est assez impressionnant c'est qu'il existe plusieurs façons de dessiner un même type d'appareillage ou composant. La normalisation des symboles (au moins les plus courant) permet de lire un schéma plus rapidement. Nous pouvons aussi dire que grâce à ces normalisations, ce « langage symbolique » est un langage universel compréhensible par n'importe quel technicien de la planète.








III.10.4 Classification des schémas

A propos de la classification des schémas : Nous pouvons classer les schémas selon leur mode de représentation. Mais chaque mode se divise parfois en plusieurs sous-modes. Par exemple dans la section suivante, la représentation unifilaire et la représentation multifilaire sont classés dans le mode« *selon le nombre de conducteurs* ».

III.10.4.1 Représentation unifilaire

Deux ou plus de deux conducteurs sont représentés par un trait unique. On indique sur ce trait le nombre de conducteurs en parallèle.

Cette représentation est surtout utilisée en triphasé.

		
Terre	Neutre	Trois conducteurs. + terre
 		
Trois conducteurs		

Exemple de schéma unifilaire

Le schéma du circuit de puissance d'un moteur triphasé.

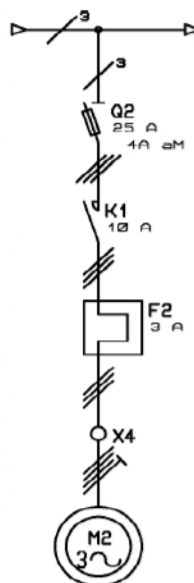


Fig.1 : Schéma de circuit de puissance d'un moteur

III.10.4.2 Représentation multifilaire

Dans la représentation multifilaire chaque conducteur est représenté par un trait. Si vous avez un dispositif électrique alimenté en triphasé, vous dessinez les trois fils de chaque phase. Cela prend plus de place, mais ça permet de faire figurer les numéros attribués au fils et aux

borniers. C'est aussi le schéma qui permet aux câbleurs de suivre facilement l'avancement de leur tâche de câblage et aux dépanneurs ou agents de maintenance de bien identifier les appareillages et conducteurs associés (ou connectés entre eux).

Exemple de schéma multifilaire

Schéma du démarrage direct d'un moteur triphasé (circuit de puissance).

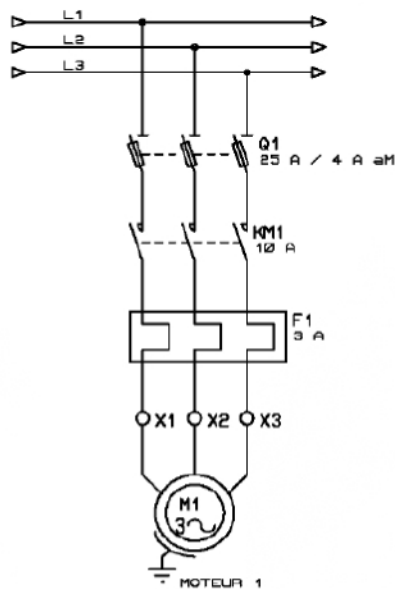


Fig.2 : Démarrage direct du moteur

III.10.5 Installation électrique industrielle

III.10.6 Partie électrique

Elle comprend deux circuits distincts :

- **Le circuit de puissance**, composé des éléments assurant l'alimentation, la protection et la liaison jusqu'au récepteur,
- **Le circuit de commande**, composé des éléments de protection et de commande d'éléments de la partie puissance.

III.10.6.1 Structure du circuit de puissance

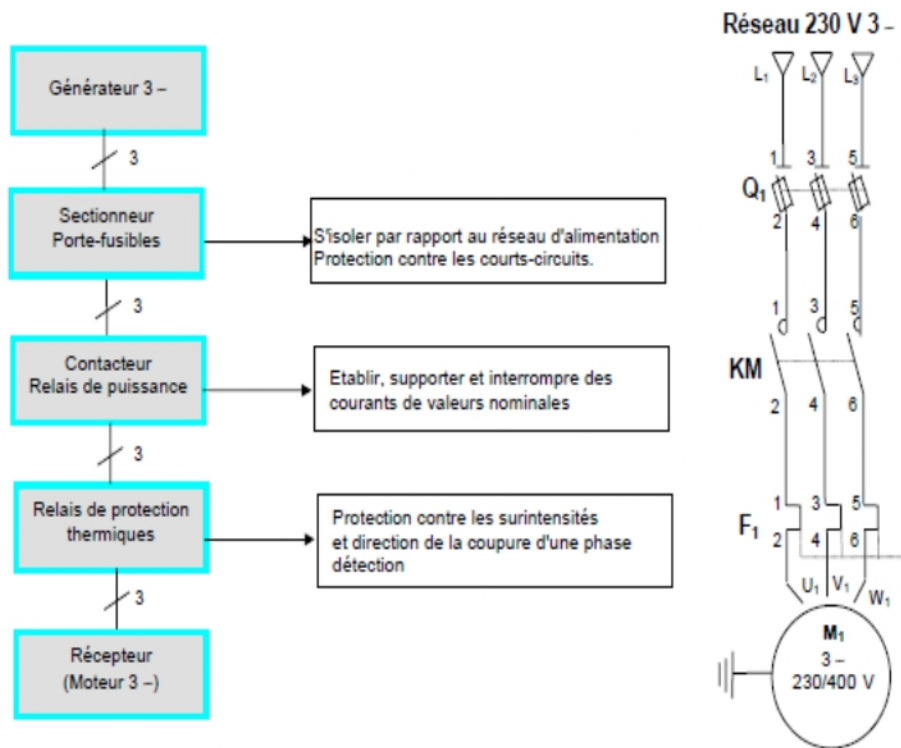


Fig.3 : Schéma du circuit de puissance

III.10.6.2 Structure du circuit de commande

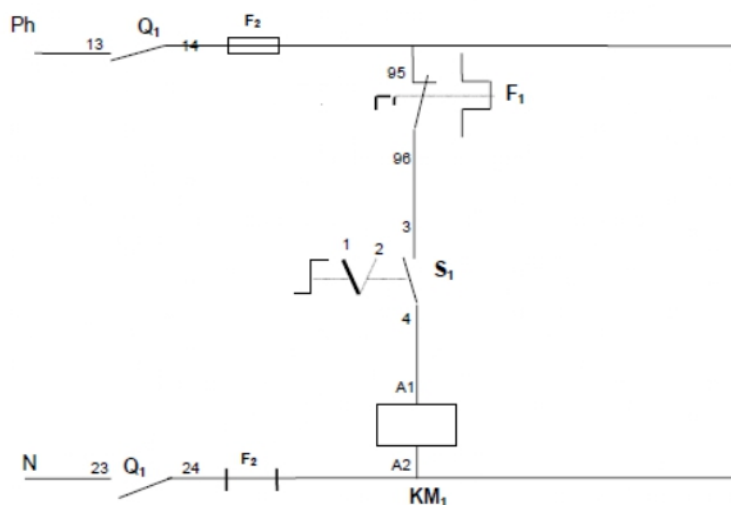


Fig.4 : Schéma du circuit de commande

Chapitre IV :
Les méthodes de diagnostic

IV.1 Introduction

Grâce aux développements rapides de l'électronique, de l'informatique et de la technologie de l'information, les processus industriels modernes deviennent de plus en plus complexes. Ainsi, les problèmes de sécurité et de la sûreté de fonctionnement révèlent une importance considérable vu que la présence d'une défaillance peut entraîner des conséquences désastreuses. Ainsi, il est indispensable de faire appel à des techniques de surveillances modernes combinant le diagnostic et la correction des défauts afin d'améliorer la sécurité et la sûreté des processus, de minimiser les coûts de maintenance et de protéger l'installation dans les états critiques. De nombreuses techniques ont été proposées dans la littérature pour le diagnostic des défauts. La plupart d'entre elles peuvent être classées en deux principales approches :

- Les méthodes basées sur la redondance matérielle,
- Les méthodes basées redondance analytique.

IV.2 Approche à base de redondance matérielle

Les premières méthodes de diagnostic de défaut utilisaient la **redondance matérielle** (capteurs ou actionneurs multiples réalisant la même fonction) associée à de simples logiques à seuils.

Le concept de cette approche consiste à reconstruire un second processus redondant en utilisant les composants matériels utilisés pour le processus principal concerné par le diagnostic. La détection et l'identification des défauts peuvent être obtenues à partir d'une comparaison continue entre les deux sorties du processus à surveiller et de son correspondant redondant. Cette approche permet une meilleure fiabilité et peut ainsi être appliquée dans des applications dont la sécurité est fortement indispensable (l'aérospatial, le nucléaire).

Cependant, les coûts économiquement élevés des composants matériels redondants limitent leurs applications.

IV.3 Approche à base de redondance analytique

Afin de détecter et d'isoler les défauts d'un système, une certaine redondance d'information est nécessaire. Cette redondance est utilisée dans le but d'établir les tests de consistance entre les variables couplées du système. Elle constitue une source de bon et de mauvais fonctionnement. La redondance matérielle fût la première technique de redondance utilisée pour la détection et la localisation des défauts capteurs, essentiellement dans les applications nécessitant un niveau élevé de sécurité. Par ailleurs, cette technique présente de nombreux inconvénients et contraintes majeurs.

La redondance analytique, elle, présente une alternative intéressante à la redondance matérielle. Le problème de génération des relations de redondance analytique a fait l'objet de

très nombreux travaux. La redondance d'information dans ce cas est assurée par un modèle du système ou une base de données à la place du matériel additionnel.

La redondance analytique, c'est l'exploitation des relations entre les grandeurs mesurées ou estimées. Les méthodes développées à partir de ce concept sont communément appelées à base de modèles, à base de connaissances et de traitement du signal.

IV.4 Classification des méthodes de diagnostic à base de redondance analytique

Les méthodes de diagnostic se distinguent selon différents critères :

- la dynamique du procédé (discret, continu ou hybride),
- la complexité du procédé, l'implémentation du diagnostic en ligne et/ou hors ligne,
- la nature de l'information (qualitative et/ou quantitative),
- la profondeur de l'information (structurelle, fonctionnelle et/ou temporelle), sa distribution (centralisée, décentralisée ou distribuée), ...

En général, ces méthodes sont divisées en deux catégories :

- ✓ Les méthodes à base de modèles : **basées sur des modèles quantitatifs et/ou qualitatifs.**
- ✓ Les méthodes sans modèles : **qui sont des méthodes soit à base de connaissances, soit des méthodes empiriques et/ou de traitement du signal.**

IV.4.1 Les méthodes à base de modèles :

Le diagnostic à base de modèles génère des indicateurs de défauts, résidus, contenant des informations sur les anomalies ou les dysfonctionnements du procédé à diagnostiquer. Un écart entre l'état réel du système et celui estimé par le modèle, représentant le fonctionnement nominal, est mesuré. Les résidus doivent alors être assez sensibles aux défauts pour leur détection, localisation et identification.

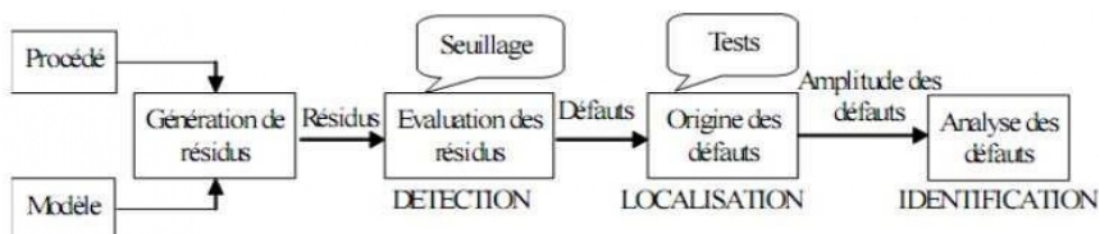


Figure IV.1 : Diagnostic à base de modèle

Parmi les méthodes à base de modèles, on peut distinguer les méthodes basées sur des modèles quantitatifs et les méthodes basées sur des modèles qualitatifs.

IV.4.1.1 Les modèles quantitatifs

Sont utilisés pour l'**estimation de paramètres, d'état ou d'espace de parité** à travers des modèles mathématiques et/ou structurels pour représenter l'information disponible du fonctionnement d'un procédé. Un défaut provoque alors des changements dans certains paramètres physiques du procédé. Les modèles mathématiques comparent les différentes valeurs des variables avec des seuils de détection afin de générer un résidu qui sera fourni au diagnostic. A partir de toutes les signatures de défauts connues par apprentissage, il est possible d'isoler et d'identifier la panne avant de prendre une décision.

IV.4.1.2 Les méthodes à base de modèles qualitatifs

Permettent de représenter le comportement du procédé avec à travers des modèles non plus mathématiques mais des modèles de type symbolique. Les modèles qualitatifs doivent représenter de manière qualitative des systèmes continus, discrets et/ou hybrides pour que le diagnostic soit capable de détecter les déviations du fonctionnement normal, localiser la défaillance et en déterminer la ou les causes. Pour les systèmes continus, les modèles qualitatifs sont fréquemment basés sur **des graphes causaux** et ou **des graphes causaux temporels**. Pour les systèmes à un événement discret, de nombreuses approches sont proposées utilisant des outils tels **que les automates, les équations logiques** ou **les RdP (réseaux de Pétri)** avec observation partielle ou totale du fonctionnement du procédé.

IV.4.2 Les méthodes sans modèles

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.

Les méthodes sans modèles considèrent le système comme une **boîte noire** et elles n'ont besoin d'aucun modèle mathématique pour représenter le fonctionnement du procédé. Elles utilisent uniquement un ensemble de mesures et/ou de connaissances heuristiques sur le système. Au sens strict, ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. 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.

IV.4.2.1 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. Ces méthodes comprennent **les méthodes à base de reconnaissance des formes, ou de réseaux de neurones, Analyse qualitative des tendances, ACP, Analyse spectrale,....**

IV.4.2.2 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. Ces méthodes comprennent **les méthodes à base de systèmes experts, l'AMDEC, l'Arbre de causes a effets ou arbre de défaillances**

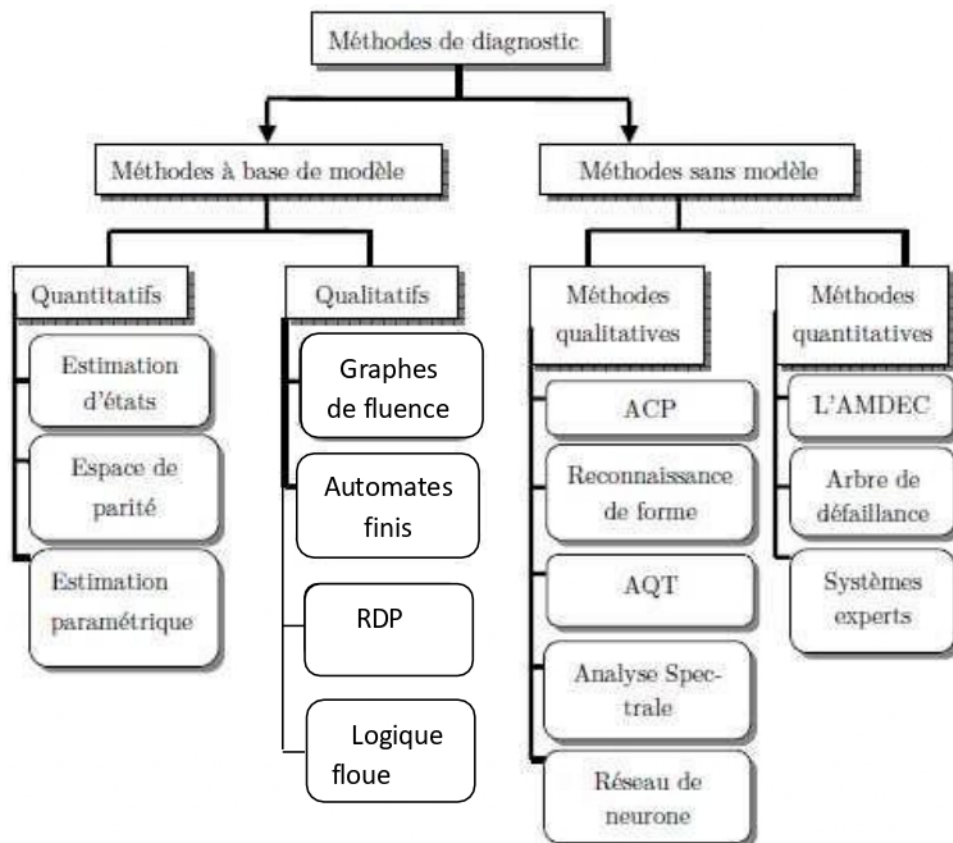


Figure IV. 2 : Classification des méthodes de diagnostic

IV.5 Le diagnostic de défauts à base de modèles

Comme leur nom l'indique ces méthodes sont basées sur l'utilisation de modèle, elles regroupent les techniques d'estimation d'état. L'utilisation de modèles peut être divisée en deux étapes principales :

IV.5.1 La génération de résidus et la prise de décision

Lors de la première étape, les signaux d'entrée et de sortie du système sont utilisés pour générer un résidu, c'est-à-dire un signal mettant en évidence la présence d'un défaut. En général, en régime de fonctionnement normal, ce signal est statistiquement nul et s'écarte notablement de zéro en présence de défauts.

IV.5.2 Evaluation de résidus

Durant la seconde étape, les résidus sont analysés pour décider s'il y a présence de défaut et sur quel composant du système il est intervenu (**opération souvent appelée localisation**) et dans certains cas, déterminer la nature du défaut et sa cause (**identification**). La décision peut

S'effectuer à l'aide d'un simple test de dépassement de seuil sur les valeurs instantanées des résidus.

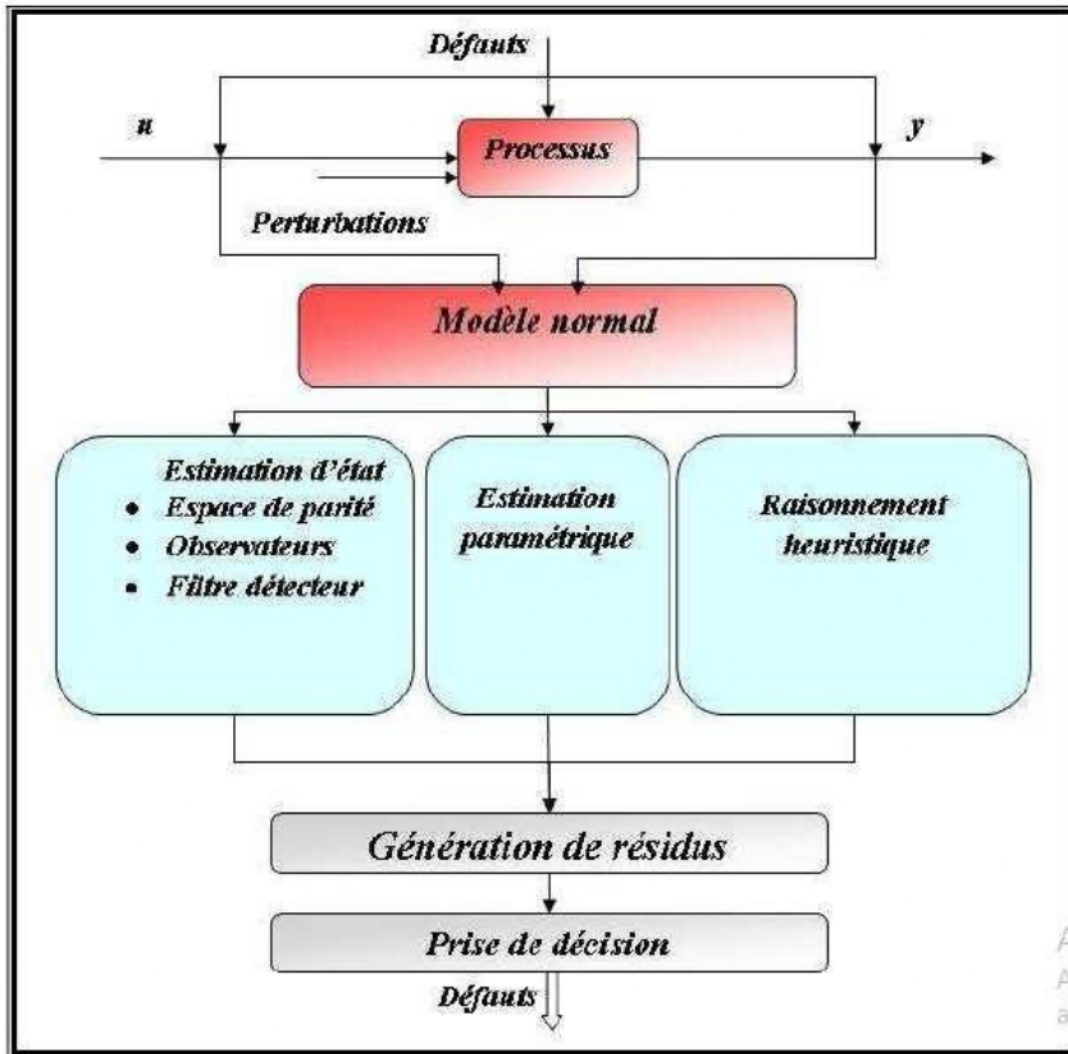


Figure IV.3 : Architecture générale de la détection de défauts à base de modèles.

Ces méthodes reposent sur l'estimation de l'état en utilisant des modèles mathématiques du système 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, nous trouvons principalement l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique. On a distingué trois approches pour la génération de résidus :

- Les approches à base d'observateurs d'états.
- Les approches par les espaces de parité.
- Les approches par l'estimation de paramètres.

IV.6 Rappel sur les observateurs d'état linéaires

IV.6.1 Observabilité des systèmes linéaires

IV.6.1.1 Définition de l'observabilité

Avant la conception d'un observateur pour un système dynamique il est nécessaire de savoir si on peut estimer ses états à partir des informations sur l'entrée et la sortie. L'observabilité d'un système exprime la possibilité de reconstruire les états du système à partir de la seule connaissance des sorties et des entrées pendant un intervalle de temps suffisamment long.

IV.6.1.2 Le Critère d'observabilité

Considérons le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1)$$

Tels que $x(t) \in R^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in R^m$ est le vecteur de commande, $y(t) \in R^p$ est le vecteur de sortie système. A, B, C et D sont des matrices connues avec des dimensions appropriées.

Et la matrice d'observabilité O :

$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Si le rang de la matrice d'observabilité (2) est égale à n , le système (1) est dit observable où la paire (C, A) est observable.

$$\text{rang}(O) = n \quad (3)$$

IV.6.2 Principe d'un observateur d'état

IV.6.2.1 Définition d'un observateur

Un observateur est un système dynamique auxiliaire qui permet de reconstruire l'estimé $\hat{x}(t)$ du vecteur d'état réel $x(t)$ du procédé physique à partir des informations connues qui sont les entrées et les mesures de sorties. Cet état estimé sera utilisé à des fins de commande du système ou de détection et localisation des défauts.

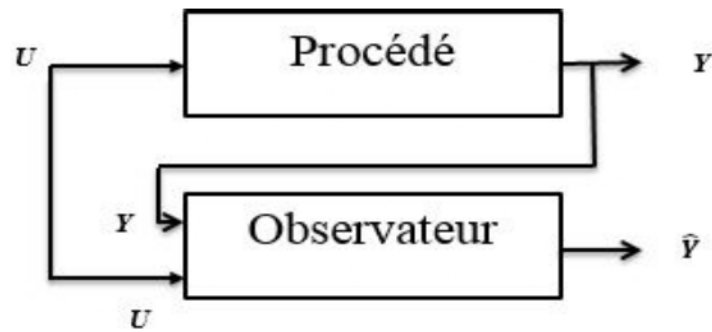


Figure IV.4 : Principe d'un observateur

Considérons le système à surveiller :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4)$$

Le rôle de l'observateur est d'estimer les états du système (t) à partir des grandeurs supposées connues l'entrée (t) et la sortie (t) .

Et l'observateur :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (5)$$

Tel que : $\hat{x}(t)$ et $\hat{y}(t)$ sont respectivement les estimés de $x(t)$ et de $y(t)$ et la matrice L est le gain de l'observateur.

L'erreur d'estimation et l'erreur de sortie sont respectivement :

$$\begin{cases} e_x = x(t) - \hat{x}(t) \\ e_y = y(t) - \hat{y}(t) \end{cases} \quad (6)$$

L'objectif dans la conception d'un observateur est de déterminer le gain L qui assure la convergence de l'erreur d'estimation d'état vers zéro quand $t \rightarrow \infty$.

IV.6.3 Classification des observateurs pour systèmes linéaires

IV.6.3.1 Observateur de Luenberger

L'observateur de Luenberger est l'un des observateurs connus dans les commandes par retour d'état. Il permet de reconstruire l'état du système observable lorsque tout ou une partie du vecteur d'état ne peut être mesurée, comme il peut estimer les paramètres variables ou

inconnus d'un système. Une représentation de l'observateur de Luenberger peut s'exprimer par la figure 5.

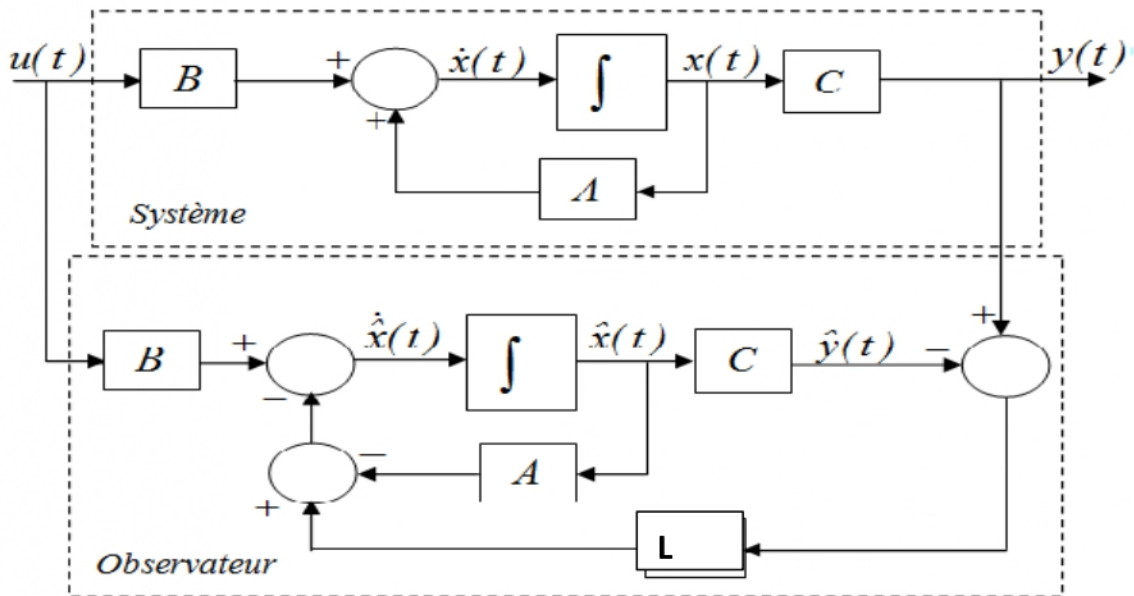


Figure IV. 5 : Structure générale observateur de Luenberger

Comme on est dans le domaine déterministe alors les bruits sont nuls donc notre système sera sous cette forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (7)$$

Et l'observateur :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (8)$$

L'erreur d'estimation est $e_x = \hat{x}(t) - x(t)$ (9)

La dynamique de l'erreur est : $\dot{e}_x = \dot{\hat{x}}(t) - \dot{x}(t)$ (10)

$$\dot{e}_x = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) - (Ax(t) + Bu(t)) \quad (11)$$

Comme on a : $y(t) = Cx(t)$ et $\hat{y}(t) = C\hat{x}(t)$

On aura :

$$\dot{e}_x = (A - LC) e_x \quad (12)$$

La construction d'un observateur de Luenberger revient donc à déterminer la matrice du gain L telle que les valeurs propres de $A - LC$ soient strictement négatives, c'est-à-dire stable.

Généralement on choisit la dynamique de l'observateur en moins 03 fois plus rapide que celle du système.

IV.6.3.2 Observateur à entrées inconnues

Les processus physiques sont souvent soumis à des perturbations, ces perturbations ont des effets néfastes sur le comportement normal du processus, elles sont appelées entrées inconnues lorsqu'elles affectent l'entrée du système et leur présence peut rendre difficile l'estimation de l'état du système. Le principe de construction d'un observateur à entrées

inconnues consiste à rendre l'erreur d'estimation indépendante des perturbations non mesurables.

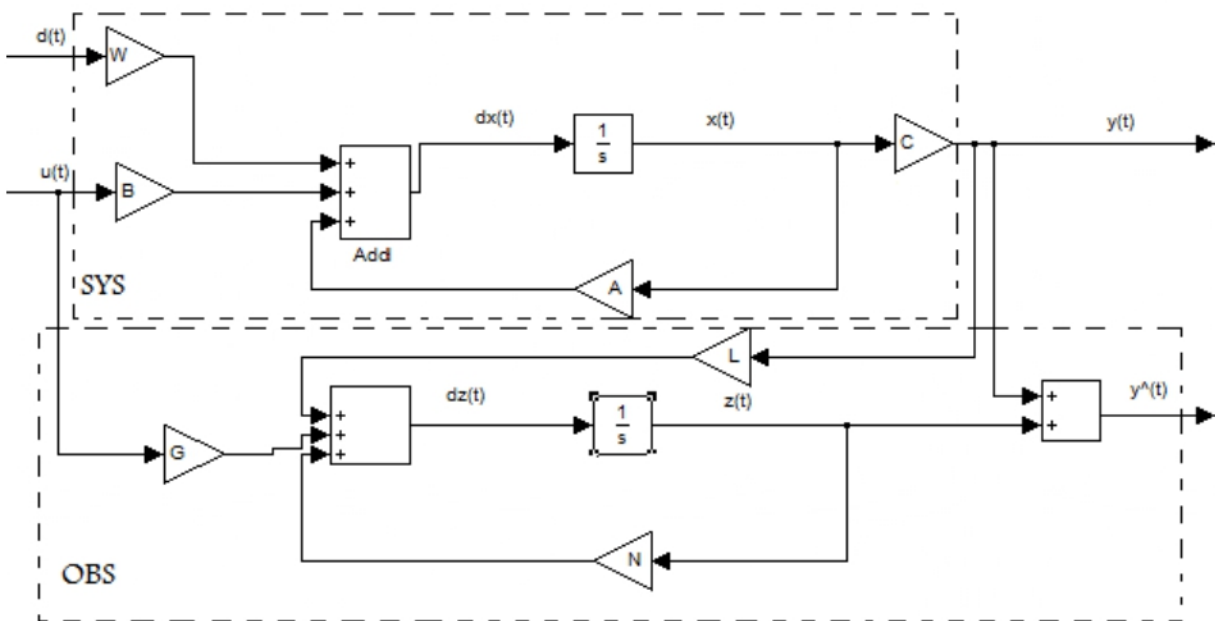


Figure IV. 6 : Schéma fonctionnel de l'observateur à entrées inconnues

Considérons le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Wd(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \tag{13}$$

Où $x(t)$ est le vecteur d'état de dimension n , $u(t)$ est l'entrée de commande, $d(t)$ est la perturbation considérée comme entrée inconnue, $y(t)$ est la sortie.

Et l'observateur à entrées inconnues s'écrit :

$$\begin{cases} z'(t) = Nx(t) + Gu(t) + Ly(t) \\ \dot{\hat{x}}(t) = z(t) + Hy(t) \\ \hat{y}(t) = C \hat{x}(t) \end{cases} \quad (14)$$

Où $\hat{x}(t)$ est l'estimation du vecteur d'état $x(t)$.

Conditions d'existence : L'observateur à entrées inconnues existe si et seulement si les deux conditions suivantes sont vérifiées

1. **Condition de découplage :** $\text{rang}(CW) = \text{rang}(W) = p$
2. **Condition de détectabilité :** \geq

$$\text{rang} \begin{pmatrix} \lambda I - A & -w \\ C & 0 \end{pmatrix} = n + p \quad \forall \Re(\lambda) \geq 0$$

Où p est la dimension de d et n celle de l'état.

N, G, L et H sont des matrices à déterminer pour que l'erreur d'estimation converge vers zéro.

La dynamique de l'erreur d'estimation :

$$\begin{aligned} e'(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) & (15) \\ e'(t) &= Ne(t) + (PA - NP - LC)x(t) + (PB + G)u(t) + PWd(t) & (16) \end{aligned}$$

Où : $P = I - HC$ (17)

Pour construire l'observateur (14) il faut que les conditions suivantes soient satisfaites :

Matrice de Hurwitz

$$PA - NP - LC = 0 \quad (18)$$

$$PB - G = 0 \quad (19)$$

$$PW = 0 \quad (20)$$

Alors, si les conditions (18), (19) et (20) sont satisfaites on aura :

$$e'(t) = Ne(t) \quad (21)$$

Calcul des matrices de l'observateur :

Si : $(CW) = Rang(W)$ (22)

Alors W possède une pseudo inverse

Donc :

$$(CW)^+ = [(CW)^{-T} (CW)]^{-1}(CW) \quad (23)$$

Alors :

$$H = -W (CW)^+ \quad (24)$$

Calcul de $P = I - HC$,

Pour déterminer G à partir de (19). Tel que : $G = PB$

De (17) et (18)

$$N = PA - (L + NH) \quad (25)$$

On pose $\tilde{A} = PA$ et $\tilde{L} = L + NH$

Alors

$$N = \tilde{A} - \tilde{L}C \quad (26)$$

Si le couple (\tilde{A}, C) est observable alors on passe à la détermination de \tilde{L} qui se fait avec la technique de placement de pôles tel que les valeurs propres de $\tilde{A} - \tilde{L}C$ soient égales à des valeurs propres choisies stables.

Puis on déduit N et L.

Exemple :

On a :

$$x'(t) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} U(t) + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} d(t)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x(t)$$

Calcul de :

On calcule CW :
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \bullet$$

$Ra(W) = ran(CW) = 1$

Puisque la condition est vérifiée alors on calcule la pseudo inverse.

$(CW)^+ = [(CW)^{-T} (CW)]^{-1} (CW)^{-T} \quad (CW)^+ = [-1 \ 0]$

On a :

$$H = W(CW)^+ = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [-1 \ 0] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Calcul de :

$P = I - HC$

$$P = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Calcul de G:

$G = PB$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Calcul de N et L :

Vérification de la Condition d'observabilité du couple (\tilde{A}, C)

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

On calcule la matrice d'observabilité O , tel que :
$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix}$$

Donc :

$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA^{\sim} \\ CA^{\sim 2} \end{pmatrix}$$

Donc :

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Le rang $(O) = 3$.

$n = 3$

Alors le couple (A^{\sim}, C) est observable.

On choisit les pôles désirés $[-4 ; -5 ; -6]$

On trouve $L^{\sim} = [-4 \quad 0 ; -1 \quad -30 ; 0 \quad 0]$

Donc $N = [-4 \quad 0 \quad 0 ; 0 \quad 0 \quad 30 ; 0 \quad -1 \quad -4]$

Et $L = [0 \quad 0 ; -1 \quad -30 ; 0 \quad 0]$.

Chapitre V : Génération des résidus

V.1 Principe de Génération de résidus

Le principe général des algorithmes de diagnostic consiste à confronter les données relevées au cours du fonctionnement réel du système avec la connaissance que l'on a de son fonctionnement nominal (pour la détection) ou de ses fonctionnements défectueux (pour la localisation et l'identification). Toutes ces procédures se composent essentiellement d'un générateur de résidu qui est engendré à partir des grandeurs mesurées issues du modèle des signaux appelés résidus. Ces derniers vont être traités par la procédure de décision pour détecter et isoler l'élément défectueux. Donc la conception d'un système diagnostic dépend principalement de la qualité du modèle utilisé ; cependant, il est important d'utiliser un modèle précis décrivant le comportement du processus physique. Dans un cas général, un système comportant les effets des défauts et des perturbations de type additives est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D_x d(t) + F_x f(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_y f(t) \end{cases}$$

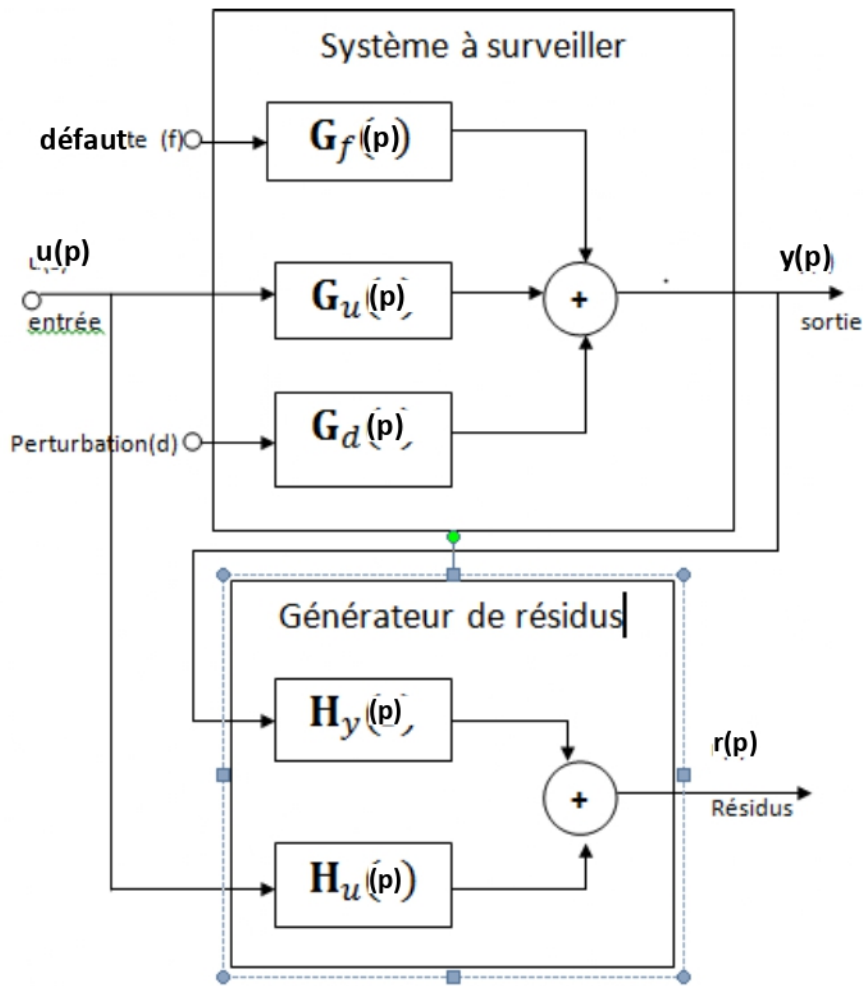
La représentation du système (1) par matrices fonctions de transfert est donnée par la relation suivante :

$$Y(p) = G_u(p) \cdot U(p) + G_f(p) \cdot F(p) + G_d(p) \cdot D(p) \quad (2)$$

$$G_u(p) = (pI - A)^{-1}B, \quad G_f(p) = C(pI - A)^{-1}F_x + F_y \text{ et } G_d(p) = C(pI - A)^{-1}D_x \quad (3)$$

Le problème de génération de résidus consiste à construire un dispositif, appelé générateur de résidus, permettant d'élaborer, à partir des grandeurs d'entrées et de sorties mesurées un vecteur d'indicateurs de défauts appelé vecteur de résidus et nommé $r(t) \in \mathbb{R}^n$, tel que :

$$\begin{cases} r(t) \neq 0 \text{ si } f(t) \neq 0 \\ r(t) = 0 \text{ si } f(t) = 0 \end{cases}$$



FigureV.1 : Structure générale d'un générateur de résidus

Le rôle d'un générateur de résidus est de générer des signaux (résidus) qui ne sont sensible qu'aux fautes.

Tant qu'il n'y a pas de défauts

$$r(p) = 0 \quad (4)$$

et dès qu'il y'a un défaut on aura un signal généré sur le résidus, tel que :

$$r(p) = H_y(p)y(p) + H_u(p)u(p) \quad (5)$$

Avec: $y(p) = G_u(p)u(p) + G_f(p)f(p) + G_d(p)d(p)$

On remplace y(p) dans (5) on aura :

$$r(p) = H_u(p).u(p) + H_y(p).(G_u(p).(p) + f(p).F(p) + (p) d(p)) \quad (6)$$

H_u et H_y doivent satisfaire les deux relations suivantes:

$$\begin{cases} H_y(p).G_d(p) = 0, & H(p).G_f(p) \neq 0 \\ H_y(p).G_u(p) + H_u(p) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Si les deux relations sont vérifiées alors :

$$r(p) = H_y(p).G_f(p).F(p) \quad (8)$$

$$Q(p) = H_y(p).G_f(p) \quad (9)$$

Donc :

$$r(p) = Q(p).f(p) \quad (10)$$

(p) est la matrice de transfert entre le vecteur des défauts et le vecteur des résidus, cette matrice de transfert permet de nous renseigner sur la possibilité d'isoler les défauts en nous fournissant une table logique de signatures des défauts.

Remarque : les matrices (p) et $H(p)$ doivent être stables et propres.

La synthèse du générateur de résidus consiste en un choix correct des matrices (p) et (p) toute en respectant les conditions données par (7).

V.2 Détection et localisation des défauts :

L'étape de détection permet de décider si le système est dans un état de fonctionnement normal ou non.

Exemple : on considère un système soumis à 03 défauts f_1 , f_2 et f_3 pour lequel on dispose d'un générateur de résidus à 03 composantes : r_1 , r_2 et r_3 .

Et on considère que la matrice de transfert $(p).G_f(p)$ entre le vecteur des résidus et le vecteur de défauts définie par :

$$r(p) = H_y(p).G_f(p)F(p) = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & g_{13} \\ 0 & g_{22} & 0 \\ 0 & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Avec g_{11} , g_{13} , g_{22} , g_{32} et g_{33} sont des fonctions de transferts stables et propres.

D'après cette relation si $f(t) = 0$ alors $r(t)=0$ et lorsque un des défauts est non nul alors $r(t)$ est non nul.

En réalité, les grandeurs mesurées sont souvent entachées de bruits, alors le vecteur de résidus $r(t)$ est toujours non nul même en absence de défauts. Dans ce cas, en considérant les différentes sources d'incertitudes comme des entrées de perturbations notées e_p , la relation (11) va se réécrire sous la forme :

$$r(p) = H_y(p).G_f(p)f(p) + e_p(p) = \begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ r3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g11 & 0 & g13 \\ 0 & g22 & 0 \\ 0 & g32 & g33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{p1} \\ e_{p2} \\ e_{p3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

La relation (12) montre bien que le résidu est non nul en absence de défauts.

La procédure de détection de défauts peut être réalisée en comparant les résidus à un certain seuil de détection S , qui dépend de e_{p1} , e_{p2} et e_{p3} . Ce seuil de détection doit vérifier la relation :

$$S > |e_{pi}(t)| \text{ pour } i=1,2,3. \quad (13)$$

La détection de défauts se fait alors comme suit :

$$\begin{cases} |r(t)| \leq S, & \text{alors } f(t) = 0 \\ |r(t)| > S, & \text{alors } f(t) \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

Le résultat de comparaison à un seuil est une grandeur booléenne.

On écrira symboliquement que le résidu $ri(t)=1$ si $|ri(t)| > S$ et $ri(t)=0$ si $|ri(t)| \leq S$.

Lorsque un défaut est détecté, il s'agit de le localiser, cette localisation est réalisée à partir de la table des signatures, définie par la matrice de transfert $(p) Gf(p)$.

La table de signatures de l'exemple précédent s'écrit :

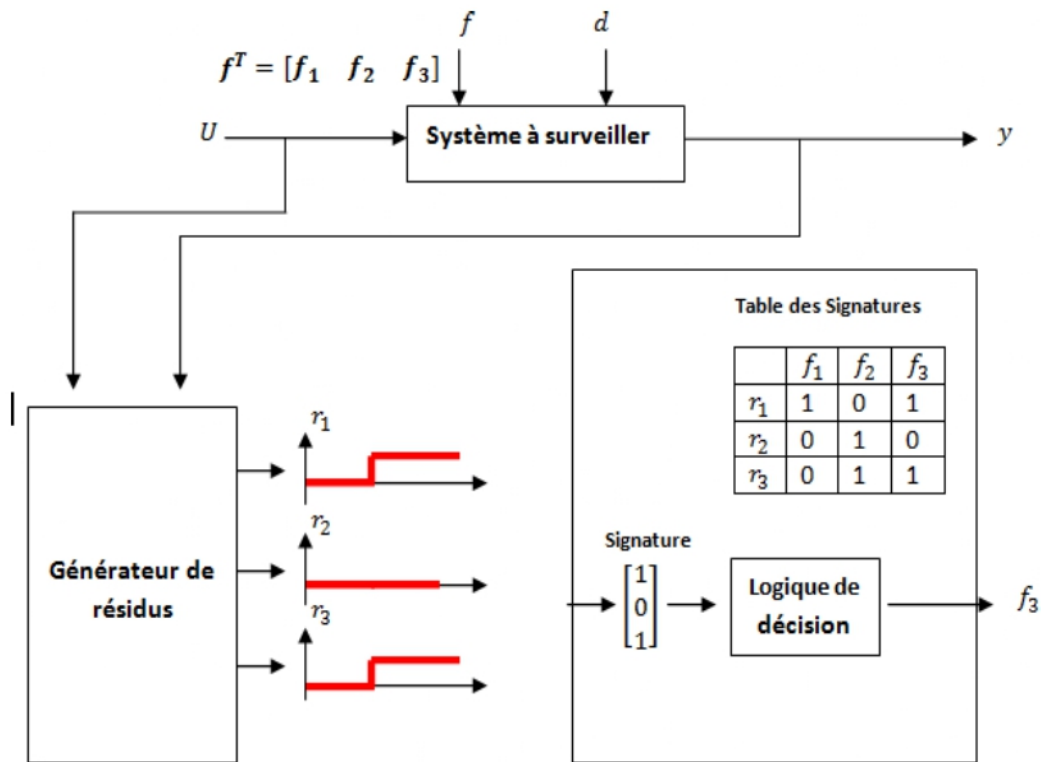
	f1	f2	f3
r1	1	0	1
r2	0	1	0
r3	0	1	1

FigureV.2 : Table de signatures

D'après cette table, la signature $[1\ 0\ 0]^T$ est associée au défaut f_1 .

D'une manière générale, la signature d'un défaut correspond à l'une des colonnes de la table de signatures.

C'est ainsi que l'identification de la signature à l'une des colonnes de la table permet de localiser le défaut.



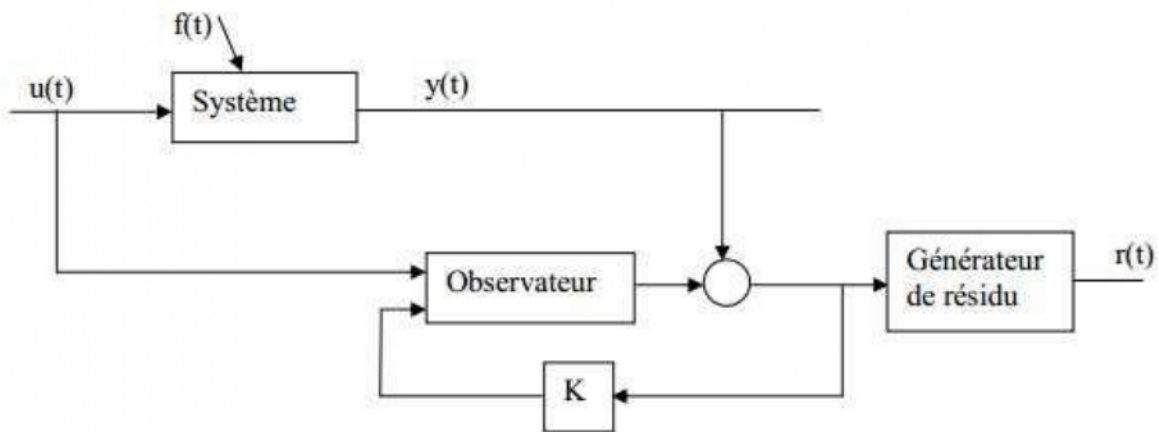
FigureV.3 : Détection et localisation de défauts.

La figure 3 résume les étapes du diagnostic, le générateur de résidus permet de générer les signaux résidus sensible aux défauts ce qui nous fournit une signature qui comparée à la table signature permet alors la localisation des défauts.

V.3Principe de génération de résidus a base d'observateurs :

Le principe de génération de résidu a base d'observateur consiste a estimer une partie ou l'ensemble des grandeurs mesurables du système a surveiller. Le résidu est calcule alors en faisant la différence, éventuellement filtrée, entre les sorties réelles et celles estimée.

L'observateur revient alors a un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie. Ce principe est illustre sur la figure suivant :



FigureV4 Schéma de principe du diagnostic des défauts à base d'observateurs.

Cette approche offre des propriétés très intéressantes car elle donne lieu à des résidus très flexibles et souples, dans le choix des paramètres, permet de s'affranchir de certaines entrées inconnues, améliorant ainsi les caractéristiques des résidus telles que leur robustesse vis-à-vis perturbations et leur sensibilité aux défauts.

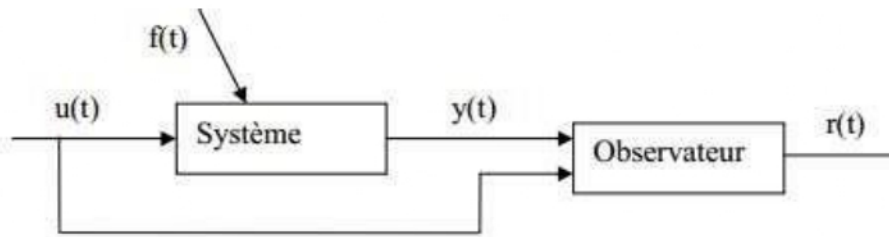
V.3.1 Structure des résidus générés à base d'observateur :

Il est important d'obtenir une structure du résidu permettant son évaluation. Les résidus doivent être produits, de manière que pour chaque défaut un ou un ensemble de résidus soient affectés.

Cependant, même si l'apparition de défauts multiples est peu probable, les résidus doivent être capables de situer chacun des défauts arrivant simultanément, en occurrence, il devrait être garanti que le recouvrement des effets résultants de la combinaison des défauts ne mène pas à une décision fautive, par exemple détection manquée d'un défaut ou mauvaise isolation du défaut. Il existe plusieurs manières de définir les résidus structurés afin de parvenir à une évaluation correcte du résidu. Les résidus structurés sont conçus de manière à être chacun affecté par un sous ensemble de défaut et robuste (non affecté) par rapport aux défauts restantes. Ainsi, lorsqu'un défaut apparaît, seul un sous ensemble de résidus réagit. Le résidu est dit structuré par rapport à un vecteur de défaillances f_1 s'il n'est affecté que par les défaillances f_1 s'il est robuste aux autres. Dans la littérature, on distingue trois structures de génération de résidus à base d'observateur ou chacune est définie par un schéma particulier.

V.3.1.1 Structure d'observateurs simplifiés (SOS)

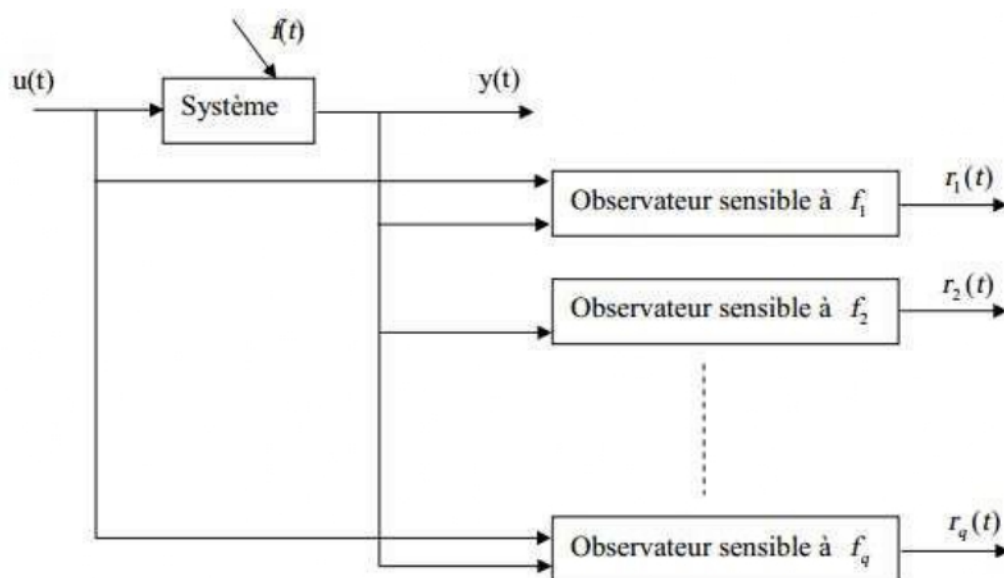
Dans cette structure le banc est constitué d'un seul observateur. Il est synthétisé de façon à n'être sensible qu'à un groupe de défauts. Dans le cas où un des défauts auquel il est sensible apparaît alors les estimations seront faussées. Dans le cas contraire, elles seront exactes.



FigureV 5 Structure d'observateur simple.

V.3.1.2 Structure d'observateurs dédiés (DOS)

Dans ce type de structure, il est question de construire autant d'observateur que de défaut à détecter, chacun d'entre eux génère un résidu insensible à tous les défauts sauf un. Ainsi, l'observateur recevant une mesure défaillante fournit une mauvaise estimation des variables estimées, tandis que les estimations des autres observateurs convergent vers les mesures des sorties correspondantes sauf sur la sortie erronée. Ce schéma reste valable même dans le cas de plusieurs défauts simultanés.



FigureV 6 Structure d'observateurs dédiés.

Mais, si cette structure donne parfois des bons résultats sa conception reste très limitée car elle ne permet pas de s'affranchir des entrées inconnues et des bruits.

V.3.1.3 Structure d'observateurs généralisés (GOS)

Dans ce genre de structure, il s'agit de synthétiser un certain nombre d'observateurs où chacun d'entre eux étant insensible à un seul défaut. Si un défaut apparaît alors, toutes les estimations d'états seront erronées sauf celles issues de l'observateur insensible à ce seul défaut.

Ce schéma offre plus de degrés de liberté pour la conception de l'observateur et permet d'augmenter la robustesse. Cependant, en plus de ne pas être généralement pas capables de résoudre les problèmes de localisation des défauts, La problématique de cette approche reste dans les interactions entre les sous-systèmes. En effet, si ces interactions sont faibles (voire nulle), un défaut n'affectera que l'estimation de l'observateur local correspondant. Il est alors possible de localiser le composant défaillant. En revanche, si les interactions sont grandes, un défaut d'un des composants se propagera aux observateurs des autres composants.

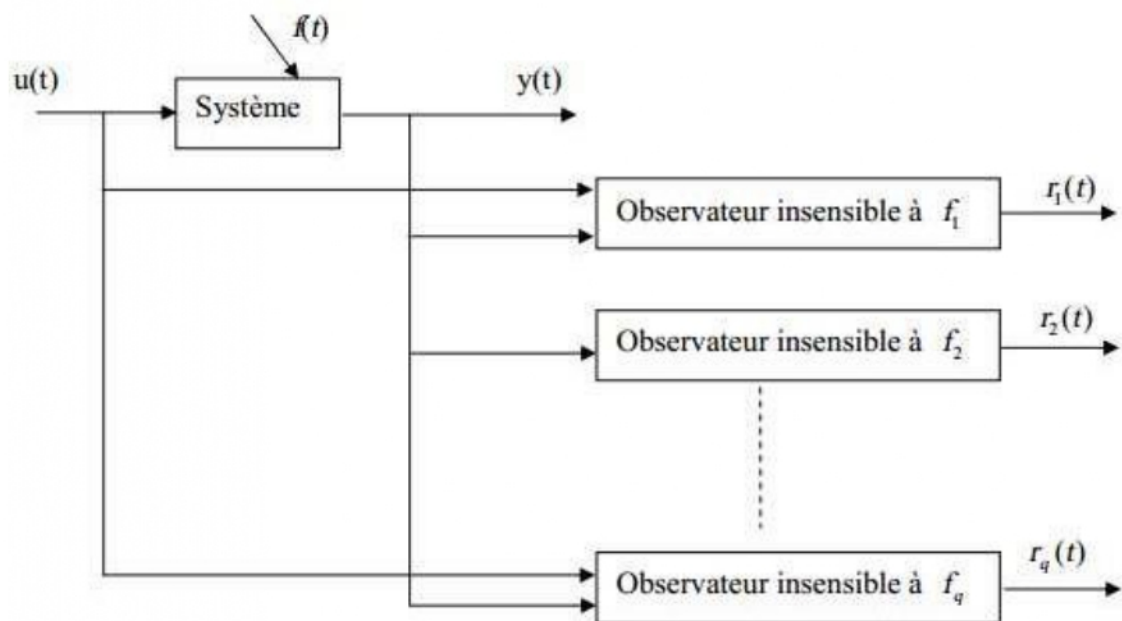


Figure 7 : Structure d'observateurs généralisée

Références bibliographiques:

1. J. Montmain, J. Ragot, D. Sauter, Supervision des procédés complexes, Lavoisier, 2007.
2. L. Ljung, Systems Identification: theory for the User. Prentice-Hall, 2nd edition, 1999.
3. P.S.R. Murty, Power System Analysis, BS Publications, 2007.
4. D. Brown, D. Harrold, R. Hope, Control System Power and Grounding Better Practice, Elsevier, 2004
5. G. Cullman, Eléments de calcul informationnel, Bibliothèque de l'ingénieur électricien-mécanicien. Ed. Albin Michel.
6. J.D. Glover, M.S. Sama, T.J. Overbye, "Power Systems Analysis and Design", 4th Edition, Thompson Engineering