

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Universite de Relizane
Département Génie Électrique

Support du cours :

Maintenance Industrielle

Niveau

3^{ème} Génie Électrique

Avant-propos

Ce manuscrit est dédié aux étudiants de 3^{ème} année Licence (LMD), option Génie électrique de l'université d'Ouargla. De plus, il s'adresse tous les étudiants des sciences de l'ingénierie. Le but principal de ce cours est de permettre aux étudiants de faire acquérir les connaissances relatives aux divers types de maintenance industrielle et leur opération, gestion et organisation. Ce doucement aussi rendra l'étudiant apte à installer et à dépanner des moteurs et des génératrices à courant continu ou alternatif et leurs dispositifs de commande.

La maintenance est essentielle pour garantir la sûreté des installations industrielles (électrotechnique/électronique) comme la sécurité de tous les appareils utilisant des circuits intégrés. Les actions mises en œuvre visent à contrôler l'état des équipements et à corriger les défauts qui sont mis en évidence, soit par des réparations, soit par des remplacements.

Investissement financier pour la fiabilité et la sûreté des équipements, la maintenance est aussi à l'origine de la majeure partie de la dose reçue par les travailleurs dans l'industrie. Elle constitue également la majorité des activités réalisées lors des arrêts des installations de production et implique pour ce faire un tissu industriel riche et varié où la sous-traitance est développée.

Pour cet objectif, de nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la maintenance, fiabilité et disponibilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

L'analyse de la FMD dans le domaine de l'électrotechnique est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission. La maintenabilité par analogie à la fiabilité, exprime un intérêt considérable au maintien des équipements en état de service et par conséquence assuré leur disponibilité.

Ce manuscrit est décrit en quatre chapitres, ces chapitres sont enchaînés, dans le premier on se base sur les définitions et l'historique des termes les plus courants en maintenance industrielle et le rôle de cette dernière dans l'industrie manufacturière, notamment le comportement du matériel en service est le plus important dans l'étude et l'évolution d'un système mécanique ou électrique. Ensuite l'accent est mis sur l'intégration d'éléments

mathématiques dans la maintenance pour organiser et choisir le type d'intervention nécessaire pour le dépannage des parties défaillantes.

Dans le second chapitre, on aborde principalement la construction et la structure des ateliers spécialisés dans le dépannage des convertisseurs électromécaniques et leur fonctionnement. Ce point est très important pour bien comprendre les différentes opérations à fournir pour chaque type de maintenance. À la fin de ce chapitre une étude des différentes pannes des machines électriques et les méthodes de leur détection ont été mentionné ainsi que des techniques de démontage et de remontage de ce dernier.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse de l'état réel de système pour permettre au dépanneur de faire des vérifications préliminaires avant le dépannage, dans cette partie un exemple de dépannage électrique et mécanique d'une machine à courant continu ainsi que des méthodes logiques, étape par étape, pour identifier et corriger les problèmes d'une machine à courant alternatif.

Enfin et dans le dernier chapitre ayant pour objectif d'économiser l'énergie gaspillée par une maintenance préventive systématique tout en réduisant les opérations de maintenance correctives, le logiciel de Maintenance Assistée par Ordinateur (MAO) a été présenté et étudié afin de citer plusieurs objectif de cette dernière.

ACRONYMES ET ABREVIATIONS

AFNOR : Association Française de Normalisation

CEN : Comité Européen de Normalisation

ISO : International Standardization Organization

FDMS : Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité, Sûreté de fonctionnement

MTTR : Temps moyen de réparation

NFX60-01 : extraits de la norme AFNOR : Association Française de Normalisation

API : automate programmable industriel

MTTF : (Mean Time To [first] Failure) : temps moyen avant-première défaillance

MTBF : temps moyen entre deux défaillances successives

MDT ou MTI (Mean Down Time) : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre.

MUT : (Mean Up Time) : temps moyen de disponibilité

MAO : Une maintenance assistée par ordinateur

Moteur CC : Un moteur a courant continue

DTE : Dossier technique équipement

TRS : Taux de rendement synthétique

TPM : La maintenance productive totale

MTTR : Moyenne des durées d'intervention

BPT : Bon pour petits travaux

DT : Demande de travail

OT : Ordre de travail

TTR : Durées d'intervention

AMDEC : Est une méthode qualitative et inductive visant à identifier les risques de pannes

GAP : Groupe d'analyse de pannes

GMAO : Gestion de la maintenance assistée par ordinateur

GPAO : Gestion de la production assistée par ordinateur

GTC : Gestion technique centralisée

PG I : Progiciel de Gestion Intégrée

AdM : Atelier de maintenance

SdP : Sites de Production

NOMENCLATURE

Z: Variable aléatoire

A(t) : Le matériel est en état de bon fonctionnement

$\lambda(t)$: Le taux de défaillance

t: Temps

B : Le matériel est défaillant

F(t): La fonction de défaillance

R(t): La fonction de fiabilité

R: La fiabilité

β : Paramètre de forme ($\beta > 0$)

η : Paramètre d'échelle ($\eta > 0$)

γ : Paramètre de position ($-\infty < \gamma < +\infty$)

e : La base de l'exponentielle (2,718...)

λ : C'est l'intensité.

LISTE DES FIGURES

Figure.I.1: Les organismes de normalisation	4
Figure.I.2: Composants du système	9
Figure.I.3: évolution de maintenabilité d'un système en fonction de temps.....	11
Figure.I.4: évolution de disponibilité d'un équipement en fonction de temps.....	12
Figure.I.5: évolution de disponibilité d'un équipement réparé de manière continue en fonction de temps.....	12
Figure.I.6: Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité	14
Figure.I.7: Les durées caractéristiques de FMD.....	14
Figure.I.8: Dégradation du bien et durée de vie	15
Figure.I.9: Fonction de défaillance	16
Figure.I.10:Fonction associée	17
Figure.I.11: Courbes caractéristiques du taux de défaillance.....	19
Figure.I.12: La courbe en baignoire	20
Figure.I.13: Courbe du taux de défaillance en mécanique	22
Figure.I.14:Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité	23
Figure.I.15: Composants en série	25
Figure.I.16: Composants en parallèle.....	26
Figure.I.17: Les méthodes de maintenance	31
Figure.I.18: Action exercée après une défaillance sera dite corrective.....	32
Figure.II.1: Fonctions de l'atelier de maintenance.....	41
Figure.II.2: Etapes de conception d'un atelier de maintenance	42
Figure.II.3: Organisation des opérations de maintenances.....	45
Figure.II.4: Représentation d'un roulement à billes.....	52
Figure.II.5: Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.....	53

Figure.II.6: Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit.	54
Figure.II.7: Diaporama des méthodes de détection des pannes des machines électriques.....	55
Figure.II.8: Exemple de présentation d'une gamme de démontage	59
Figure.II.9: L'organigramme de démontage	60
Figure.II.10: Observation des symptômes en fonctionnement.....	64
Figure.II.11: Un symptôme est une divergence	65
Figure.II.12: Etapes d'un diagnostic	66
Figure.II.13: Vérification des hypothèses pour le diagnostic d'une panne	68
Figure.III.1: Organigramme de dépannage d'une machine à courant alternatif.....	82
Figure.III.2: Moteurs asynchrones triphasés de la série AO2 à rotor en court-circuit (a) et bobiné (b) :	84
Figure.IV.1: Gestion itérative de la maintenance (avec support d'une GMAO)	90
Figure.IV.2: Exemple de structure modulaire d'une GMAO.....	91

LISTE DES TABLEAUX

Tab.I.1: Les facteurs de maintenabilité.....	10
Tab.I.2 Priorisation d'une maintenance planifiée.....	36
Tab.II.1 : Défaits des machines électriques selon leurs origines.....	50

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I: Généralités sur la maintenance.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique (concepts et terminologie normalisés)	4
I.2.1 Définitions AFNOR et CEN de la maintenance.....	4
I.2.2 Définitions de la maintenance selon l'AFNOR par la norme X 60-000.....	5
I.2.3 Définition de la maintenance selon l'AFNOR par la norme NF X 60-010.....	5
I.2.4 Définition de la maintenance selon Larousse.....	5
I.3 Rôle de la maintenance et du dépannage des équipements dans l'industrie	5
I.4 Eléments de mathématiques appliquées à la maintenance	6
I.5 Comportement du matériel en service	8
I.5.1 Qu'est-ce qu'un système ?.....	8
I.5.2 Sûreté de fonctionnement.....	9
I.5.3 Maintenabilité (Maintainability).....	9
I.5.4 Disponibilité (Availability).....	11
I.5.5 Fiabilité (Reliability).....	12
I.5.6 Analyses FMD : indicateurs opérationnels.....	14
I.6 Taux de défaillance et lois de fiabilité.....	15
I.6.1 Définition de défaillance.....	15
I.6.2 Fonction de fiabilité $R(t)$ – Fonction de défaillance $F(t)$	16
I.6.3 Taux de défaillance instantané.....	17
I.6.4 Indicateurs de fiabilité (λ) et (MTBF).....	18
I.6.5 Temps moyen de bon fonctionnement.....	18
I.6.6 Les différentes phases du cycle de vie d'un produit.....	20

I.6.7 Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique.....	22
I.6.8 Evolution des coûts en fonction de la fiabilité.....	23
I.6.9 Fiabilité d'un système.....	24
I.6.10 Lois de fiabilité.....	28
I.7 Modèles de fiabilité	30
I.8 Les différentes formes de la maintenance.....	30
I.8.1 Maintenance corrective.....	31
I.8.2 Maintenance curative.....	32
I.8.3 Maintenance palliative.....	32
I.8.4 Maintenance préventive.....	32
I.9 Organisation d'entretien et de dépannage des équipements électriques.....	33
I.10 Classification de la maintenance planifiée des équipements électriques.....	34
I.10.1 Prioriser le déploiement de la maintenance planifiée.....	35
I.10.2 Un exemple de classification.....	37

Chapitre II: Organisation et gestion de la maintenance.....39

II.1 Introduction.....	40
II.2 Structure des ateliers spécialisés dans le dépannage des convertisseurs électromécaniques.....	40
II.2.1 Définition.....	40
II.2.2 Fonctions de l'atelier de maintenance.....	40
II.2.3 Étapes de conception d'un atelier de maintenance.....	41
II.3 Organisation des opérations de maintenance.....	43
II.3.1 Les opérations de maintenance corrective.....	43
II.3.2 Les opérations de maintenance préventive.....	44
II.3.3 Autres opérations.....	45
II.4 Etapes principales de technologie de dépannage des machines électriques....	46
II.4.1 Mise en évidence de la défaillance.....	46

II.4.2 Analyse des risques.....	46
II.4.3 Recherche de la chaine fonctionnelle.....	47
II.4.4 Liste des maillons de la chaine.....	47
II.4.5 Liste des modes de défaillances.....	48
II.4.6 Critères de test.....	48
II.4.7 Procédures de test.....	48
II.4.8 Réparation.....	49
II.4.9 Compte-rendu.....	49
II.5 Etude des différentes pannes des machines électriques et méthodes de leur détection.....	49
II.5.1 Défauts statoriques.....	50
II.5.2 Défauts rotoriques.....	51
II.5.3 Méthodes de détection des pannes des machines électriques.....	55
II.5.4 Propositions de causes possibles de pannes et des vérifications correspondantes.....	56
II.6 Technique de démontage et de remontage.....	58
II.6.1 Démontage : Méthodologie.....	58
II.6.2 Précautions	60
II.6.3 Vocabulaire :.....	61
II.7 Essais et diagnostics avant le dépannage.....	63
II.7.1 Définitions relatives au diagnostic.....	63
II.7.2 Méthodologie : les étapes d'un diagnostic.....	63
II.7.3 La méthode générale de diagnostic.....	65
II.7.4 Exemple d'un diagnostic.....	67

Chapitre III: Dépannage des différentes parties des machines électriques. 69

III.1 Introduction.....	70
-------------------------	----

III.2 Dépannage de la partie mécanique et de la partie électrique d'une machine électrique	70
III.2.1 Analyse de l'état réel de l'équipement.....	70
III.2.2 Exemple de dépannage de la partie mécanique/ électrique d'un moteur à courant continu.....	71
III.2.3 Exemple de dépannage de la partie mécanique/ électrique d'un moteur à courant alternatif.....	76
III.3 Travaux de montage et méthode d'essais après dépannage.....	83
III.3.1 Démontage et remontage d'une machine asynchrone.....	83
III.3.2 Réparation et remplacement de composants.....	85
III.3.3 Réglage de nouveaux paramètres.....	85
III.3.4 Vérification du fonctionnement de l'équipement après dépannage.....	86

Chapitre IV : Généralités sur la maintenance assistée par ordinateur (MAO)..... 88

IV.1 Introduction	89
IV.2 Le modèle itératif de la gestion.....	89
IV.3 Application à la gestion du service maintenance	89
IV.4 Qu'est-ce qu'un progiciel de GMAO ?.....	90
IV.4.1 Définition 1.....	90
IV.4.2 Définition 2.....	90
IV.4.3 Définition 3	91
IV.5 Les progiciels de GMAO : analyse des différents modules fonctionnels.....	91
IV.5.1 Module « gestion des équipements »	92
IV.5.2 Module « gestion du suivi opérationnel des équipements ».....	93
IV.5.3 Module « gestion des interventions ».....	94
IV.5.4 Module « gestion du préventif ».....	94
IV.5.5 Module « gestion des stocks ».....	94

IV.5.6 Module « gestion des approvisionnements et des achats ».....	95
IV.5.7 Module « analyses des défaillances ».....	96
IV.5.8 Module « budget et le suivi des dépenses ».....	96
IV.5.9 Module « gestion des ressources humaines ».....	97
IV.5.10 Module « tableaux de bord et statistiques ».....	97
IV.5.11 Modules complémentaires ou interfaçages utiles.....	97
IV.6 Panorama des solutions GMAO (présentation générale ou vue générale)....	98
IV.7 Les types de GMAO.....	98
IV.8 Installation d'une GMAO.....	99
IV.9 Réussite d'une GMAO.....	99
IV.10 Elaboration d'un plan GMAO.....	99
IV.11 Le choix d'un outil GMAO bien adapté.....	101
IV.12 Caractéristiques générales	101
IV.13 Avantages de GAMO	102

INTRODUCTION GENERALE

En deux décennies, le développement de l'automatisation des systèmes de production a réduit de façon spectaculaire les emplois dans l'industrie. Les machines d'aujourd'hui produisent à la place des hommes et les usines fabriquent plus et mieux en 2017 qu'en 1980, avec des effectifs en constante diminution [1].

Le cycle de vie d'un composant générique dans un système de production est d'abord caractérisé par des périodes de disponibilité lorsque l'élément fonctionne correctement, i. e., dans des conditions nominales, deuxièmement par des périodes de temps où il fonctionne mais pas comme prévu dans les conditions, et troisièmement par des périodes où il cesse complètement de fonctionner en raison d'une panne se produisant et les réparations subséquentes devant encore être accomplies [2].

Pour ces raisons l'exécution de la maintenance dans une entreprise industrielle est d'une importance capitale pour maintenir les équipements en état de bon fonctionnement. La maintenance, dans sa plus large définition, est l'ensemble de toutes les opérations de gestion, de programmation et d'exécution. Le calcul de la fiabilité d'un équipement constitue un outil incontournable pour évaluer l'efficacité de n'importe quelle entité. Les concepteurs et les utilisateurs sont souvent confrontés à des contraintes par pauvreté ou par manque de modèles permettant de faire des études prévisionnelles correctes. Le taux de défaillance est souvent considéré comme constant ce qui est manifestement faux en mécanique d'où l'intérêt d'outils, de modèles ou de méthodes plus adaptées.

Ainsi, le choix d'une loi de comportement du matériel (calcul de la fiabilité) devient une tâche très compliquée. Le présent polycopié s'adresse aux étudiants de licence de l'option génie électrique, poursuivant leur formation. La conduite du calcul est conditionnée par le choix convenable d'une loi de fiabilité décrivant le comportement des différents composants constituant une entité. Le but de la maintenance c'est de mettre en œuvre les objectifs (coûts, délai, qualité, etc.) fixés par la direction de production en tenant compte des événements (perturbations, aléas, etc.) de l'environnement.

La stratégie de la maintenance est l'ensemble des décisions qui conduisent :

- à définir le portefeuille d'activités de la production de maintenance, c'est-à-dire, à décider des politiques de maintenance des matériels (méthodes correctives, préventives, amélioratives à appliquer à chaque matériel).

- et, conjointement, à organiser structurellement le système de conduite et les ressources productives pour y parvenir dans le cadre de la mission impartie (objectifs techniques, économiques et humains).

Enfin les objectifs assignés aux activités de maintenance peuvent inclure des indicateurs clés de performance telle que la fiabilité, la disponibilité, le délai moyen de réparation, le nombre de défaillances, et les coûts d'entretien. Par conséquent, certains objectifs illustratifs sont les suivants : améliorer la disponibilité, préserver la santé, la sécurité et la préservation de l'environnement et réduire les coûts de maintenance.

CHAPITRE I

Généralités sur la maintenance

I.1. Introduction

Pour être et demeurer compétitive, une entreprise doit produire toujours mieux (qualité) et au coût le plus bas. Pour minimiser ce coût, on fabrique plus vite et sans interruption des produits sans défaut afin d'atteindre la production maximale par unité de temps. Cet objectif est un des buts de la fonction maintenance d'une entreprise. Il s'agit de maintenir un bien dans un état lui permettant de répondre de façon optimale à sa fonction. Ce chapitre examine les définitions fondamentales concernant la maintenance et le rôle de cette dernière dans l'industrie. Ensuite l'accent est mis sur l'intégration d'éléments mathématiques dans la maintenance pour évaluer le comportement du matériel en service.

I.2. Historique (concepts et terminologie normalisés)

Le terme « maintenance », forgé sur les racines latines manus et tenere, est apparu dans la langue française au XII^e siècle. L'étymologiste Wace a trouvé la forme mainteneur (celui qui soutient), utilisée en 1169 : c'est une forme archaïque de « maintenir ».

Anecdotiquement, c'est avec plaisir que j'ai retrouvé l'usage du mot « maintenance » sous la plume de François Rabelais, qui, vers 1533, parlait de la « maintenance de la loy » dans Pantagruel.

Les utilisations anglo-saxonnes du terme sont donc postérieures. À l'époque moderne, le mot est réapparu dans le vocabulaire militaire : « maintien dans des unités de combat, de l'effectif et du matériel à un niveau constant ». Définition intéressante, puisque l'industrie l'a reprise à son compte en l'adaptant aux unités de production affectées à un « combat économique » [1].

I.2.1. Définitions AFNOR et CEN de la maintenance

Remarque préalable : L'AFNOR faisant partie du CEN, les définitions AFNOR seront supplantées par les définitions CEN lorsque les normes « projet » deviendront définitives.

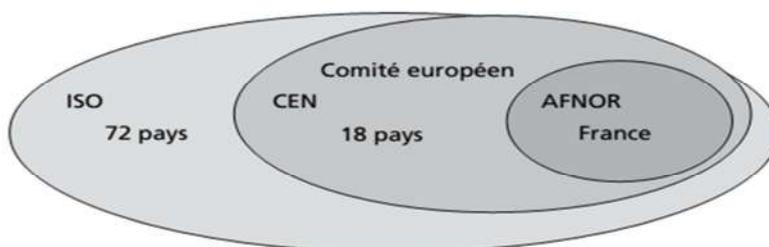


Figure I.1 – Les organismes de normalisation [1]

Il n'existe pas actuellement de normes internationales ISO (International Standardization Organization) relatives à la fonction maintenance.

I.2.2. Définitions de la maintenance selon l'AFNOR par la norme X 60-000

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [2].

I.2.3. Définition de la maintenance selon l'AFNOR par la norme NF X 60-010

Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal [1].

La définition de la maintenance fait donc apparaître 4 notions :

- Maintenir qui suppose un suivi et une surveillance.
- Rétablir qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut.
- Etat spécifié et service déterminé qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance.
- Coût optimal qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique.

I.2.4. Définition de la maintenance selon Larousse

Ensemble de tout ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement.

I.3. Rôle de la maintenance et du dépannage des équipements dans l'industrie

Le rôle de la fonction maintenance et du dépannage dans une entreprise (quel que soit son type et son secteur d'activité) est donc de garantir la plus grande disponibilité des équipements au meilleur rendement tout en respectant le budget alloué. Pour atteindre ces objectifs, la politique de maintenance et du dépannage des équipements dans l'industrie oblige de suivre les points suivants [3] :

- a. Le service maintenance (ou « dépannage ») intervient principalement en cas de problème :
- Il dépanne en urgence.
 - Il répare en atelier.
 - Il effectue l'entretien quotidien des matériels.

- b. Le service maintenance (ou « dépannage ») est là pour éviter les pannes et les ralentissements de production :

Les interventions en urgence engendrant de coûteux arrêts de production, on met en place des procédures de prévention (d'évité) systématiques des pannes majeures.

- c. Le service maintenance (ou « dépannage ») doit générer des profits :

Le service maintenance évite des pannes : il fait donc gagner de l'argent. Mais il coûte aussi : salaires, matériels de maintenance, stock de pièces de rechange, arrêt de production pour la maintenance préventive.

- d. Le service maintenance (ou « dépannage ») est en concurrence avec les sous-traitants maintenanciers :

Après avoir fait la preuve de sa rentabilité, le service maintenance doit faire preuve de plus de rentabilité que si on avait recours à des sociétés spécialisées dans la maintenance.

Le service maintenance doit mettre en œuvre la politique de maintenance définie par la direction de l'entreprise ; cette politique devant permettre d'atteindre le rendement maximal des systèmes de production. Cependant, tous les équipements n'ont pas le même degré d'importance d'un point de vue maintenance. Le service devra donc, dans le cadre de la politique globale, définir les stratégies les mieux adaptées aux diverses situations.

La fonction maintenance sera alors amenée à établir des prévisions ciblées :

- Prévisions à long terme : elles concernent les investissements lourds ou les travaux durables. Ce sont des prévisions qui sont le plus souvent dictées par la politique globale de l'entreprise.
- Prévisions à moyen terme : la maintenance doit se faire la plus discrète possible dans le planning de charge de la production. Il lui est donc nécessaire d'anticiper, autant que faire se peut, ses interventions en fonction des programmes de production. La production doit elle aussi prendre en compte les impératifs de suivi des matériels.

- Prévisions à courts termes : elles peuvent être de l'ordre de la semaine, de la journée, voire de quelques heures.

Même dans ce cas, avec le souci de perturber le moins possible la production, les interventions devront elles aussi avoir subi un minimum de préparation.

I.4. Eléments de mathématiques appliquées à la maintenance

Dans le domaine de la maintenance industrielle, il est courant de devoir déterminer certaines mesures à partir de la connaissance d'un nombre limité de valeurs connues. Cette partie permettra de consolider certains éléments mathématiques vus au secondaire et de les appliquer dans des contextes liés à la maintenance industrielle. Aussi, il favorise le développement de l'habileté à utiliser les fonctions et les graphiques d'un tableur, à déterminer, à partir des données sur un dessin, les dimensions recherchées de l'objet représenté, à reconnaître et à utiliser le modèle mathématique approprié à une situation, et à analyser des situations à l'aide du calcul vectoriel [4].

- **Fonctions et variations** : Ce point vise principalement à s'initier à l'analyse de l'influence de la variation d'une quantité en fonction d'une autre, afin de résoudre des problèmes. En effet, en contexte de maintenance industrielle, il est important de pouvoir transposer des problèmes en langage mathématique pour les résoudre.
- **Statique et résistance des matériaux** : Ce deuxième point de physique s'intéresse à l'étude des forces dans un contexte d'équilibre statique (diagnostique), ainsi qu'aux notions de contraintes et de déformations dans un contexte de résistance des matériaux (maintenance préventive). Les notions de résistance des matériaux seront appliquées à la détermination de la résistance des joints et des soudures dans le domaine (électromécanique, machine électrique) où ces mesures sont obligatoires pour déclencher une maintenance préventive.
- **Statistique en maintenance industrielle** : Cette partie vise l'intégration de notions statistiques appliquées au contexte de maintenance industrielle. La démarche sera axée sur l'utilisation d'outils statistiques pour permettre une interprétation juste des résultats, et la production de travaux à l'aide d'un logiciel approprié au traitement statistique des données. Les méthodes statistiques, les tableaux et les graphiques, les calculs des principales mesures de tendance centrale de dispersion et de position, les

probabilités, les inférences statistiques ainsi que la corrélation et l'analyse de régression seront des contenus abordés.

- **Analyse de mécanismes** : En contexte de maintenance industrielle, ce dernier permet de poser des diagnostics sur les mécanismes défectueux, les démonter, analyser les bris, changer ou réparer les pièces défectueuses de façon à remettre en état les mécanismes défectueux.

I.5. Comportement du matériel en service

Le concepteur d'équipement est fréquemment une société qui n'exploite pas les installations qu'elle conçoit. Elle aura de ce fait forcément des difficultés à tenir compte dans sa conception des conditions d'exploitation particulières d'exploitation des clients. Généralement le concepteur attache peu d'attention à la maintenabilité des installations. Ainsi, le choix d'une loi de comportement du matériel (calcul de la fiabilité) devient une tâche très compliquée

La sûreté de fonctionnement d'une machine en tenant compte de l'aspect sécurité et les critères visant à éviter un entretien fréquent, difficile et coûteux se résument en trois points connus sous la notion F.M.D. que le concepteur devrait tenir compte lors des études d'engineering :

- Sûreté de fonctionnement
- Maintenabilité
- Disponibilité
- Fiabilité

I.5.1. Qu'est-ce qu'un système ?

Ensemble complexe de matériels, logiciels, personnels et processus d'utilisation, organisés de manière à satisfaire les besoins et à remplir les services attendus, dans un environnement donné.

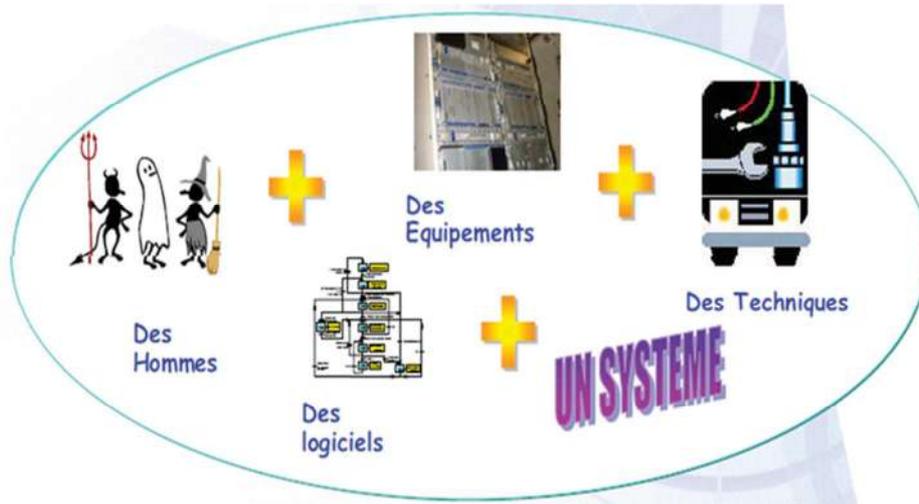


Figure I.2 – Composants du système

I.5.2. Sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement d'un système peut être définie comme étant la propriété qui permet à ses utilisateurs de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre. L'utilisateur peut être un individu tel que l'Opérateur ou le Superviseur, ou un autre système matériel / logiciel ayant des interactions avec le système considéré.

La sûreté de fonctionnement regroupe les activités d'évaluation de la **Fiabilité**, de la **Disponibilité**, de la **Maintenabilité** et de la Sécurité (**FDMS**) d'une organisation, d'un système, d'un produit ou d'un moyen. Ces propriétés sont différentes mais complémentaires.

I.5.3. Maintenabilité (*Maintainability*)

Dans des conditions données, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits [5].

Maintenabilité = être rapidement dépanné

C'est aussi la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

A partir de ces définitions, on distingue :

- **La maintenabilité intrinsèque** : elle est « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges prenant en compte les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc).
- **La maintenabilité prévisionnelle** : elle est également « construite », mais à partir de l'objectif de disponibilité.
- **La maintenabilité opérationnelle** : elle sera mesurée à partir des historiques d'interventions.

L'analyse de maintenabilité permettra d'estimer la **MTTR** ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité (sur les mêmes modèles que la fiabilité).

Commentaires : La maintenabilité caractérise la facilité à remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement. Cette notion ne peut s'appliquer qu'à du matériel maintenable, donc réparable. « Les moyens prescrits » englobent des notions très diverses : moyens en personnel, appareillages, outillages, etc.

La maintenabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs.

Facteurs liés à L'EQUIPEMENT	Facteurs liés au CONSTRUCTEUR	Facteurs liés à la MAINTENANCE
<ul style="list-style-type: none"> • Documentation • Aptitude au démontage • Facilité d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Qualité du service après-vente • Facilité d'obtention des pièces de rechange • Coût des pièces de rechange 	<ul style="list-style-type: none"> • Préparation et formation des personnels • Moyens adéquats • Etudes d'améliorations (maintenance améliorative)

Tableau I.1 – Les facteurs de maintenabilité [1]

En ce qui concerne la maintenabilité, le temps de réparation est une variable aléatoire qui résulte de différents facteurs tels que l'habileté des agents de maintenance et la disponibilité des pièces de rechange.

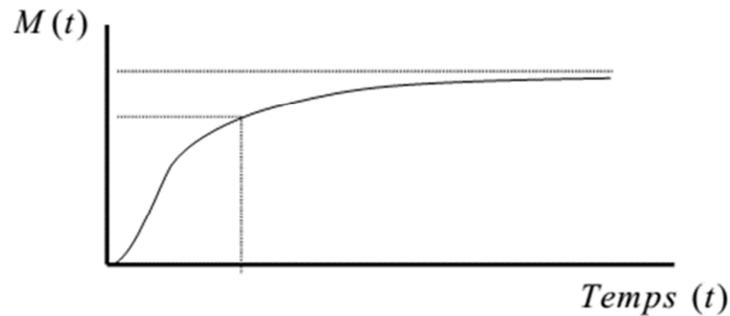


Figure I.3 – Évolution de maintenabilité d'un système en fonction de temps [6]

Remarque : On peut améliorer la maintenabilité en :

- Développant les documents d'aide à l'intervention.
- Améliorant l'aptitude de la machine au démontage (modifications risquant de coûter cher).
- Améliorant l'interchangeabilité des pièces et sous ensemble.

I.5.4. Disponibilité (*Availability*)

Lorsqu'on étudie la fiabilité, on s'intéresse non seulement à la probabilité de panne, mais aussi au nombre de pannes et, en particulier, au temps requis pour faire les réparations. Dans cette perspective, deux nouveaux paramètres de la fiabilité deviennent notre centre d'intérêt [1].

- La **disponibilité** est la probabilité qu'un système soit disponible pour être utilisé à un moment donné du temps.
- La **disponibilité** est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée.
- Autrement la **disponibilité** est la probabilité qu'un système soit disponible pour être utilisé à un moment donné du temps. Cette définition est proche de celle de la fiabilité, sauf que le système demandé doit fonctionner à l'instant (**t**) et non sur une période de temps (**0 à t**).

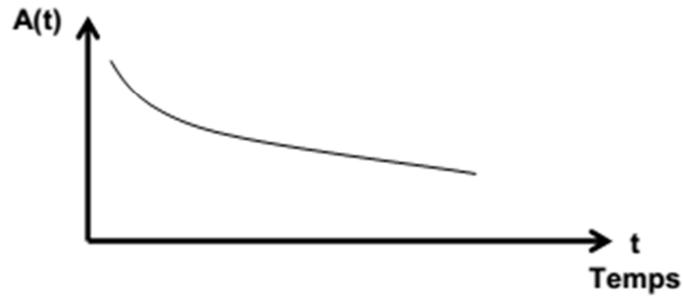


Figure I.4 - Évolution de disponibilité d'un équipement en fonction de temps [6]

Lorsqu'un système est réparé de manière continue, soit par un programme d'entretien ou de maintenance, la disponibilité de l'équipement tend à devenir constante.

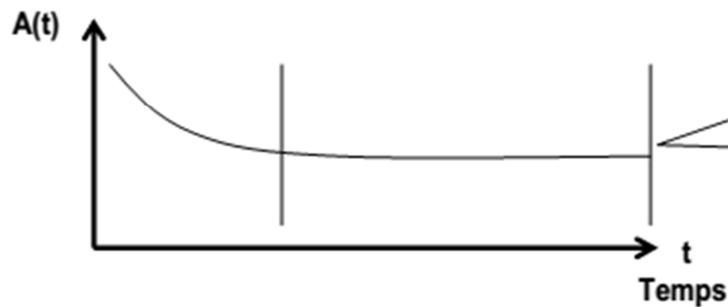


Figure I.5 - Évolution de disponibilité d'un équipement réparé de manière continue en fonction de temps [6]

Pour des systèmes réparables, une quantité fondamentale est la disponibilité. Elle est définie comme suit :

$A(t)$ = probabilité qu'un système fonctionne de façon satisfaisante au moment t .

Remarque : Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance.

I.5.5. Fiabilité (*Reliability*)

La fiabilité a sans doute pris son développement depuis la dernière guerre mondiale. Elle est vite devenue une science à part entière dans les applications appartenant à de nombreux domaines. Elle a pour fondements mathématiques la statistique et le calcul des probabilités qui sont nécessaires à la compréhension et à l'analyse des données de fiabilité [2].

- **Définition 1** : Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, **dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné.**

- **Définition 2 :** Comme nous l'avons vu précédemment, la fiabilité " R " est la probabilité qu'a un bien (produit ou système) à accomplir, de manière satisfaisante, une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donné.

Remarque : Le terme « fiabilité » est également utilisé pour désigner la valeur de la fiabilité et peut être défini comme une probabilité.

Exemple :

La fiabilité d'un roulement de broche pendant 20 000 heures de fonctionnement est égale à 0.9 signifie :

Qu'il y a 90 chance sur 100	PROBABILITE
Pour que le roulement fonctionne sans signe d'usure	FONCTION REQUISE
Pendant 20 000 heures	TEMPS DONNE
À une fréquence de rotation moyenne de 1500 tr/min	CONDITIONS DONNEES

Remarque : **R** est toujours compris entre 0 et 1.

Par exemple, une fiabilité **R = 0.92** après 1000 heures signifie que le produit a 92 chances sur 100 (92 % de chances) de fonctionner correctement pendant les 1000 premières heures.

Rappel :

Probabilité : C'est une quantité indiquant, sous forme de fraction ou de pourcentage, le nombre de fois ou de chances qu'un événement à se produire sur un nombre total d'essais ou de tentative.

En un temps donné : Dans les études de fiabilité, le temps est la mesure ou la variable de référence permettant d'évaluer les performances et d'estimer les probabilités : probabilités ou chance de survie sans défaillance pendant une période de temps donnée.

Sous des conditions données : Regroupe l'ensemble des paramètres décrivant l'environnement du produit et ses conditions d'utilisation : mode opératoire, procédures de stockage et de transport, lieux géographiques, cycles des températures, humidité, vibrations, chocs, etc...

Remarque : La non-fiabilité d'un produit ou d'un bien augmente les coûts de l'après-vente (application des garanties, frais judiciaires, etc...). Construire plus fiable augmente les coûts de conception et de production. Le coût total du produit prendra en compte ces deux tendances.

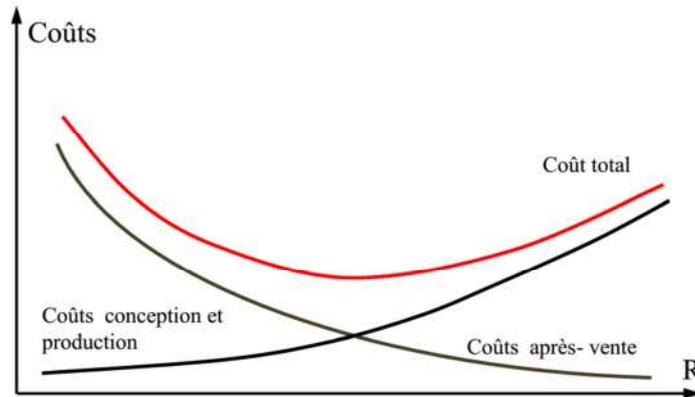


Figure I.6 – Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité [6]

I.5.6. Analyses FMD : indicateurs opérationnels

I.5.6.1. Temps de fiabilité, maintenabilité et disponibilité

a. Définitions

La Figure I.7 schématise les états successifs que peut prendre un système réparable.

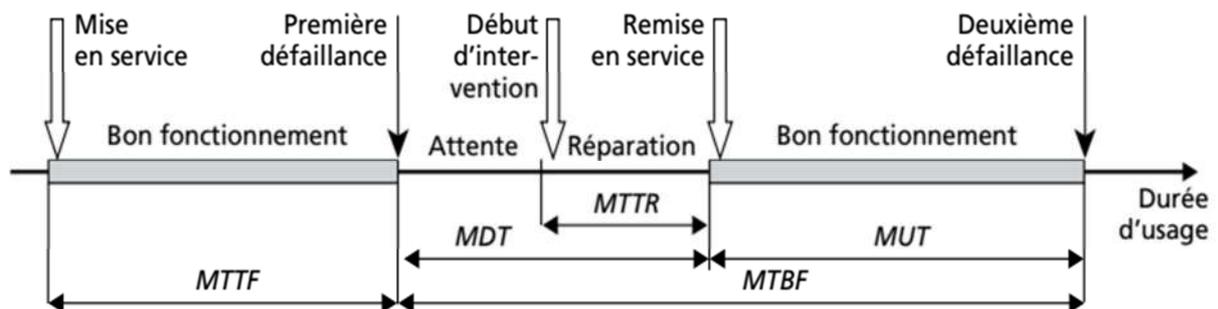


Figure I.7 - Les durées caractéristiques de FMD [1]

En fait, les grandeurs portées par le graphe sont des durées (TBF) auxquelles on fait correspondre des moyennes (MTBF) obtenues par exploitation statistique $m(t)$ ou probabiliste $E(t)$ des n durées constatées et enregistrées. Les sigles utilisés sont d'origine anglo-saxonne et correspondent aux notions suivantes :

- **MTTF** (Mean Time To [first] Failure) : temps moyen avant-première défaillance ;
- **MTBF** (Mean Time Between Failure) : temps moyen entre deux défaillances successives ;
- **MDT** ou **MTI** (Mean Down Time) : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre ;
- **MUT** (Mean Up Time) : temps moyen de disponibilité ;
- **MTTR** (Mean Time To Repair) : temps moyen de réparation.

I.6. Taux de défaillance et lois de fiabilité

I.6.1. Définition de défaillance

À l'origine de l'action de maintenance se trouve la défaillance d'un bien. La défaillance et la panne sont définies ainsi : « cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise » alors que « la panne est l'état du bien après défaillance ».

Synonymes usuels non normalisés : dysfonctionnement, dommages, dégâts, anomalies, avaries, incidents, défauts, pannes, détériorations.

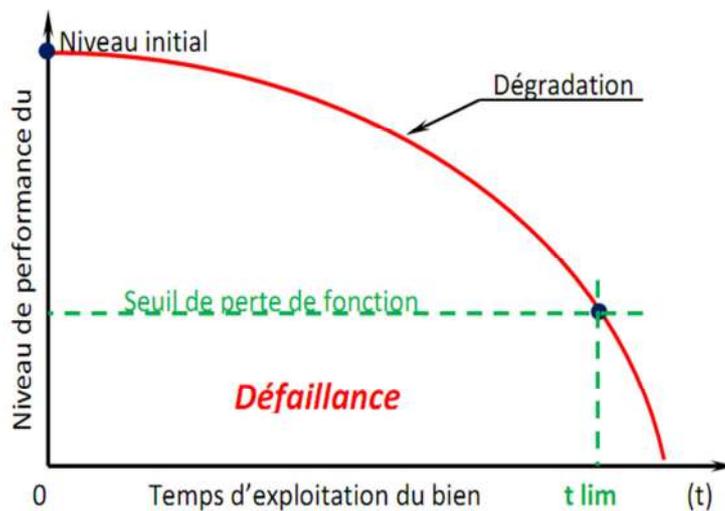


Figure I.8 – Dégradation du bien et durée de vie [7]

t lim : indique le moment d'apparition de la défaillance

I.6.2. Fonction de fiabilité $R(t)$ – Fonction de défaillance $F(t)$

Considérons un matériel dont on étudie la fiabilité. Soit Z la variable aléatoire qui à chaque matériel associe son temps de bon fonctionnement. On choisit un de ces matériels au hasard.

Soit les événements A : « Le matériel est en état de bon fonctionnement à l'instant t » et B : « Le matériel est défaillant à l'instant $t + \Delta t$ » On a alors [1] :

$$p(A) = p(T > t) \text{ et } p(T \leq t + \Delta t) \quad (1)$$

Donc

$$\begin{aligned} p(A \cap B) &= p(t < T < t + \Delta t) \\ &= F(t + \Delta t) - F(t) \\ &= (1 - R(t + \Delta t)) - (1 - R(t)) \\ &= R(t) - R(t + \Delta t) \end{aligned} \quad (2)$$

On en déduit que

$$p\left(\frac{B}{A}\right) = \frac{p(A \cap B)}{p(A)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (3)$$

On appelle fonction de défaillance la fonction F définie pour tout $t \geq 0$

$$F(t) = p(T \leq t) \quad (4)$$

Le nombre $F(t)$ représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard ait une défaillance avant l'instant t . La Figure I.9 donne l'allure de cette fonction.

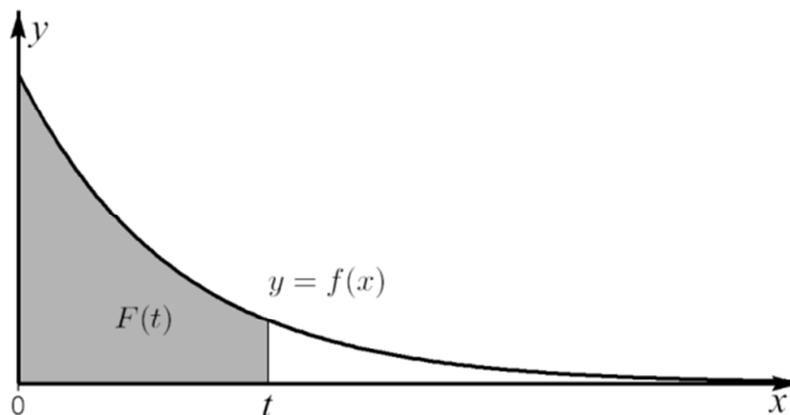


Figure I.9 – Fonction de défaillance [1]

Cette fonction nous amène naturellement une fonction associée : la fonction de fiabilité R définie pour tout $t \geq 0$ par : $R(t) = 1 - F(t)$. Le nombre $R(t)$ représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard dans la population n'ait pas de défaillance avant l'instant t . La Figure I.10 montre les deux fonctions associées.

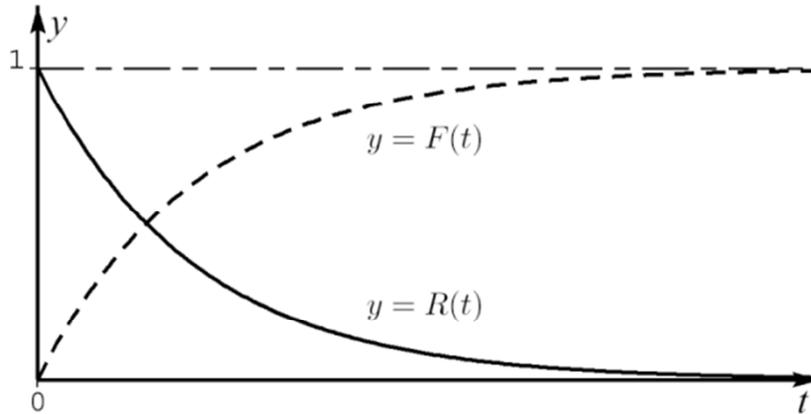


Figure I.10 – Fonction associée [7]

Le taux d'avarie moyen dans l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$ est alors :

$$\frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} * \frac{1}{\Delta t} \quad (5)$$

I.6.3. Taux de défaillance instantané

C'est la probabilité ($0 \leq R \leq 1$) ; un produit doit accomplir de manière satisfaisante une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donné.

L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant t , noté $\lambda(t)$, défini sur \mathbb{R} est la suivante [7]:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} * \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (6)$$

Physiquement le terme $\lambda(t) \cdot \Delta t$, mesure la probabilité qu'une défaillance d'un dispositif se produise dans l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$ sachant que ce dispositif a bien fonctionné jusqu'à l'instant t [2].

$$\begin{aligned}
 \lambda(t) &= \frac{dR(t)}{d(t)} * \frac{1}{R(t)} \\
 &= \frac{dF(t)}{d(t)} * \frac{1}{R(t)} \\
 &= \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - R(t)}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Où R est la fonction de fiabilité de ce matériel.

On est alors amené à résoudre une équation différentielle du 1^{er} ordre. En effet si λ est connue, la résolution de l'équation différentielle linéaire du 1^{er} ordre.

$$R(t)' + \lambda(t)R(t) = 0 \tag{8}$$

Donne la fonction de fiabilité R du matériel. On déduit alors la fonction de défaillance F qui est la fonction de répartition de la variable Z puis la densité de probabilité f de Z qui est la dérivée de F . On a alors :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x)dx} \quad \text{et} \quad F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(x)dx} \tag{9}$$

I.6.4. Indicateurs de fiabilité (λ) et (MTBF)

Précédemment le taux de défaillance λ a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimer par une expression physique. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. La durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances [1].

$$\lambda = \frac{\text{nombre total de défaillances pendant le service}}{\text{durée total de bon fonctionnement}} \tag{10}$$

I.6.5. Temps moyen de bon fonctionnement

Le MTBF est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances. En d'autres termes, Il correspond à l'espérance de la durée de vie t .

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) \tag{11}$$

Physiquement le MTBF peut être exprimé par le rapport des temps

$$MTBF = \frac{\text{somme des temps de fonctionnement entre les 'n' défaillances}}{\text{nombre d'intervention de maintenance avec immobilisation}} \quad (12)$$

Si λ est constant : $MTBF = \frac{1}{\lambda}$

Par définition le MTBF est la durée de vie moyenne du système.

Remarque : La durée de bon fonctionnement = la durée totale en service – la durée des défaillances. Les unités utilisées sont : le nombre de défaillances par heures, le pourcentage de défaillances pour 1000 heures, etc.

Par exemple, un produit ayant $10^{-7} < \lambda < 10^{-5}$ pour 1000 heures (ou $10^{-4} < \lambda < 10^{-2}$ par heure) présente un bon niveau commercial de fiabilité. La durée de bon fonctionnement, c'est la période de temps pendant laquelle le dispositif, en activité ou en service, est exposé à des défaillances.

Exemple : un compresseur industriel a fonctionné pendant 8000 heures en service continu avec 5 pannes dont les durées respectives sont : 7 ; 22 ; 8,5 ; 3,5 et 9 heures. Déterminer son MTBF.

$$MTBF = \frac{8000 - (7 + 22 + 8.5 + 3.5 + 9)}{5} = 1590 \text{ heures}$$

Et si λ est supposé constant $\lambda = \frac{1}{MTBF} = 6.289 \cdot 10^{-4}$ défaillances /heures

La courbe ci-dessous montre l'évolution du taux des défaillances pour les différentes entités.

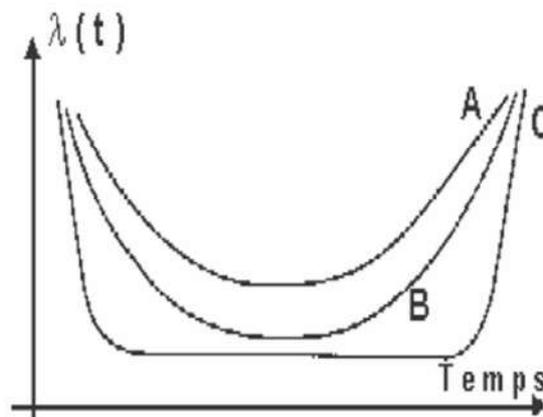


Figure I.11 – Courbes caractéristiques du taux de défaillance [7]

Les courbes du taux de défaillance (Figure I.11) ont une même forme générale dite en baignoire, mais présentent néanmoins des différences suivant la technologie principale du système étudié :

- A. en mécanique.
- B. en électromécanique.
- C. en électronique.

I.6.6. Les différentes phases du cycle de vie d'un produit

L'évolution du taux de défaillance d'un produit pendant toute sa durée de vie est caractérisée par ce qu'on appelle en analyse de fiabilité la courbe en baignoire (Figure I.12). Le taux de défaillance est élevé au début de la vie du dispositif. Ensuite, il diminue assez rapidement avec le temps (taux de défaillance décroissant), cette phase de vie est appelée période de jeunesse. Après, il se stabilise à une valeur qu'on souhaite aussi basse que possible pendant une période appelée période de vie utile (taux de défaillance constant). A la fin, il remonte lorsque l'usure et le vieillissement font sentir leurs effets, c'est la période de Vieillessement (taux de défaillance croissant):

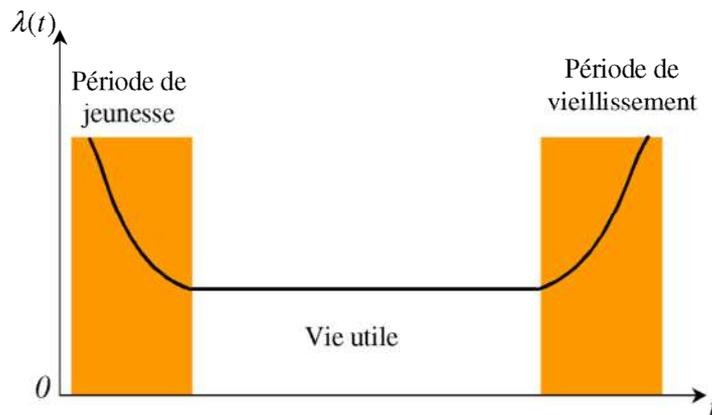


Figure I.12 – La courbe en baignoire [7]

De nombreux éléments, tels que les composants électroniques, ont un taux de défaillance qui évolue de cette manière-là. Pour souligner la particularité des composants mécaniques dans l'analyse de la fiabilité par rapport aux composants mécaniques, nous allons comparer l'évolution du taux de défaillance dans les deux cas.

I.6.6.1. Taux de défaillance pour des composants électroniques

L'expérience a montré que pour des composants électroniques la courbe, représentant le taux de défaillance en fonction du temps t , a la même allure que la courbe en baignoire (Figure I.12). Elle est donc composée de trois phases :

- **Phase 1 :** La première phase définit la période de jeunesse, caractérisée par une décroissance rapide du taux de défaillance. Pour un composant électronique cette décroissance s'explique par l'élimination progressive de défauts dus aux processus de conception ou de fabrication mal maîtrisé ou à un lot de composants mauvais. Cette période peut être minimisée pour les composants vendus aujourd'hui. En effet, les fabricants de composants électroniques se sont engagés à vérifier la qualité de leurs produits en sortie de fabrication.
- **Phase 2 :** La deuxième phase définit la période de vie utile généralement très longue. Le taux de défaillance est approximativement constant. Le choix de la loi exponentielle, dont la propriété principale est d'être sans mémoire, est tout à fait satisfaisant. Les pannes sont dites aléatoires, leur apparition n'est pas liée à l'âge du composant mais à d'autres mécanismes d'endommagement. Les calculs prévisionnels de fiabilité se font presque souvent dans cette période de vie utile.
- **Phase 3 :** La dernière phase est la période de vieillissement, elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance avec l'âge du dispositif. Ceci est expliqué par des phénomènes de vieillissement tels que l'usure, l'érosion, etc. Cette période est très nettement au-delà de la durée de vie réelle d'un composant électronique. Parfois, on réalise des tests de vieillissement accélérés pour révéler les différents modes de défaillance des composants.

I.6.6.2. Taux de défaillance pour des composants mécaniques

Les composants mécaniques sont soumis, dès le début de leur vie, au phénomène d'usure ou de vieillissement. Si on trace la courbe du taux de défaillance, en fonction du temps, on obtient une courbe qui ne présente pas le plateau de la Figure I.12 la période de vie utile (taux de défaillance constant) n'existe pas ou elle est réduite. Le taux de défaillance du dispositif est une fonction non linéaire du temps et ceci dans chaque phase de sa vie (voir Figure I.13) :

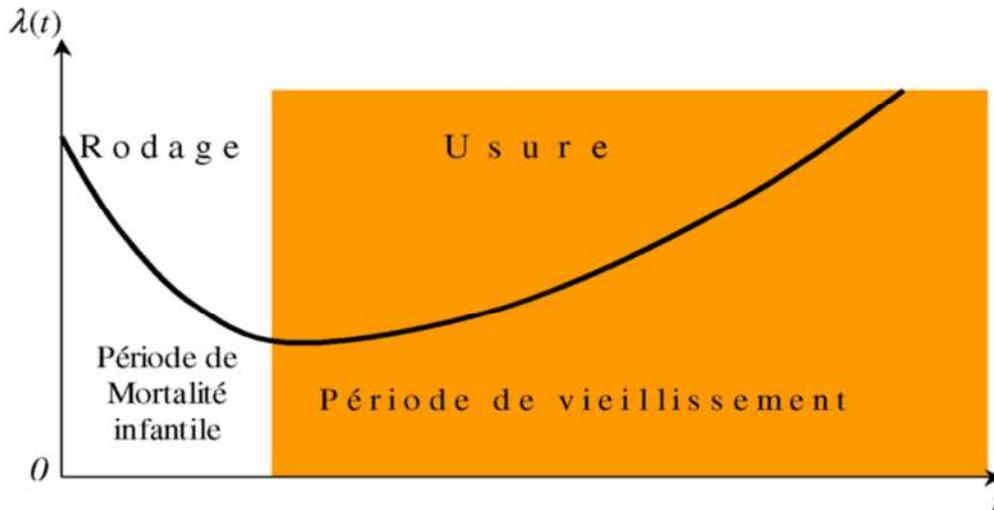


Figure I.13 – Courbe du taux de défaillance en mécanique [7]

- **Phase 1** : La première phase définit la période de mortalité infantile. C'est une durée de vie en principe très courte Elle décrite par une décroissance progressive du taux de défaillance avec le temps dû à une amélioration des caractéristiques internes (caractéristiques de défauts) et des interfaces, par un rodage préalable des pièces. Par conséquent il n'est pas souhaitable de tester les composants mécaniques dans cette période de leur vie.
- **Phase 2** : La dernière phase définit la période de vieillissement qui comporte la majorité de la vie du dispositif. Elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance. Les pièces mécaniques sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples qui peuvent agir en combinaison: corrosion, usure, déformation, fatigue, et finalement perte de résilience ou fragilisation. Contrairement aux composants électroniques les calculs de la fiabilité pour des composants mécaniques se font essentiellement dans la période de vieillissement, en utilisant des lois de probabilité dont le taux de défaillance est fonction du temps telles que la loi Log-normale, Weibull, ... etc.

I.6.7. Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus "grand

public” : Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques.... De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

L'analyse de la fiabilité dans le domaine de la mécanique est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission.

I.6.8. Evolution des coûts en fonction de la fiabilité

Le non fiabilité augmente les coûts d'après-vente (garanties, frais judiciaires). Construire plus fiable, augmente les coûts de conception et de production. Le coût total prend en compte ces deux contraintes.

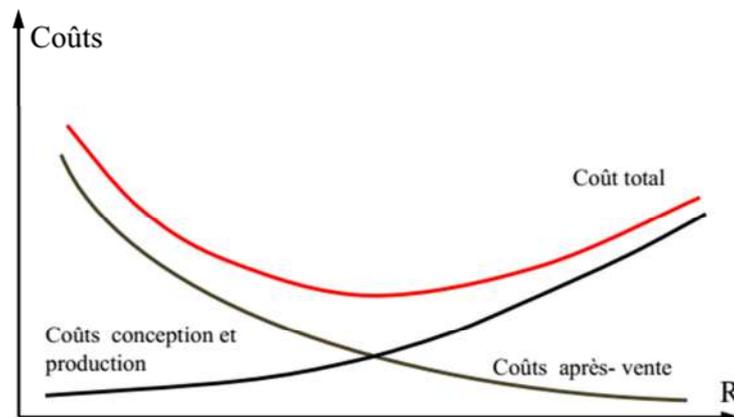


Figure I.14 – Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité [7]

La fiabilité d'une machine a tendance à diminuer avec le nombre de ses composants ou de leurs complexités. La maîtrise de la fiabilité devient donc plus délicate.

Une très haute qualité pour chaque composant, n'entraîne pas nécessairement une grande fiabilité. Après assemblage, les interactions entre les composants diminuent la capacité de l'ensemble.

Une grande fiabilité sous certaines conditions, n'implique pas une grande fiabilité sous d'autres conditions (exemple: une huile moteur de synthèse prévue pour des moteurs moderne

(multisoupapes et turbo) ne convient pas forcément pour un moteur de conception plus rudimentaire (tondeuse, moteur usé, voiture ancienne).

I.6.9. Fiabilité d'un système

La détermination de la fiabilité d'un système électronique, mécanique ou autre nécessite tout d'abord de connaître la loi de la fiabilité (ou la loi de défaillance) de chacun des composants intervenant dans le système.

Ceci est simple pour certains types de systèmes tels que les systèmes électroniques, or ce n'est pas le cas pour des systèmes mécaniques à cause de la complexité de la structure du système étudié. Les systèmes mécaniques sont des ensembles d'éléments technologiques liés par des relations statiques et dynamiques assez complexes.

Pour un système électronique chaque composant a un poids important dans la fiabilité du système, la fiabilité du système est donc calculé en fonction de la fiabilité de tous ses composants. Les calculs sont effectués sous l'hypothèse que les taux de défaillance sont constants dans le temps, une hypothèse acceptable pour la plupart des composants, ce qui rend les calculs beaucoup plus simple. La détermination des taux de défaillance des composants est effectuée soit à partir des modèles développés dans des bases de données disponibles, soit à partir d'essais effectués sur les composants ou bien à partir des résultats d'exploitation des produits.

La fiabilité d'un système mécanique, contrairement à l'électronique, repose sur la fiabilité de quelques composants élémentaires responsables de son dysfonctionnement, dits composants "responsables" ou "critiques" (parfois un seul).

I.6.9.1. Fiabilité de système constitué de plusieurs composants

a. En série

La fiabilité R_s d'un ensemble de n constituants connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives R_A, R_B, R_C, R_n de chaque composant [5] :

$$R_s = R_A * R_B * R_C * \dots * R_n \quad (13)$$

Si les "n" composants sont identiques avec une même fiabilité R la formule sera la suivante :

$$R(s) = R^n \quad (14)$$

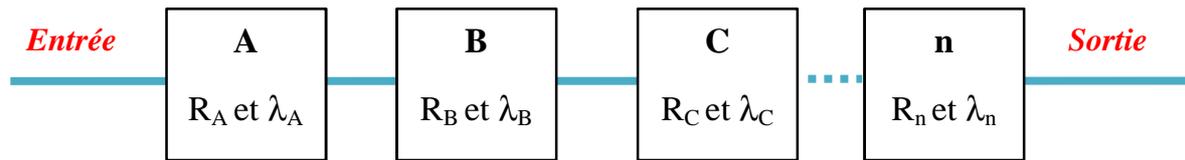


Figure I.15 – Composants en série

Si les taux de défaillances sont constants au cours du temps la fiabilité sera calculée suivant la formule :

$$R(s) = (e^{-\lambda_A t}) * (e^{-\lambda_B t}) * (e^{-\lambda_C t}) * \dots * (e^{-\lambda_n t}) \quad (15)$$

Avec :

$$MTBF (s) = \frac{1}{\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \dots + \lambda_n} \quad (16)$$

Si en plus, les composants sont identiques: $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_C = \dots = \lambda_n$

Alors :

$$R(s) = (e^{-\lambda_n t}) \text{ et } MTBF (s) = \frac{1}{n * \lambda} \quad (17)$$

- **Exemple 1** : Soit un poste de radio constitué de quatre composants connectés en série, une alimentation $R_A = 0.95$, une partie récepteur $R_B = 0.92$; un amplificateur $R_C = 0.97$ et haut-parleur $R_D = 0.89$; déterminer la fiabilité R_S de l'appareil.

$$R_S = R_A * R_B * R_C * R_D = 0.95 * 0.92 * 0.97 * 0.89 = 0.7545 \text{ (soit une fiabilité de 75\% environ)}$$

- **Exemple 2** : Soit une imprimante constituée de 2000 composants montés en série supposés tous de même fiabilité, très élevée $R = 0.9999$, Déterminer la fiabilité de l'appareil.

$$R(s) = (R^n) = 0.9999^{2000} = 0.8187 \text{ (soit une fiabilité de 82 \% environ)}$$

Si on divise par deux le nombre des composants

$$R(s) = (R^n) = 0.9999^{1000} = 0.9048 \text{ (environ 90.5\%)}$$

Si on souhaite avoir une fiabilité de 90 % pour l'ensemble des 2000 composants montés en série, déterminons la fiabilité que doit avoir chaque composant.

$$R(s) = 0.9 = (R^{2000})$$

Expression que l'on peut écrire, à partir des logarithmes népériens sous la forme :

$$\ln R_S = \ln 0.9 = 2000 \ln R \quad \text{D'où } R = 0.999945$$

b. En parallèle

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant les composants en parallèle. Un dispositif constitué de n composants en parallèle ne peut tomber en panne que si les n composants tombent en panne au même moment. Si F_i est la probabilité de panne d'un composant, la fiabilité associée R est son complémentaire [5,8]:

$$F_i = 1 - R_i \quad (18)$$

F_i représentant la fiabilité associée.

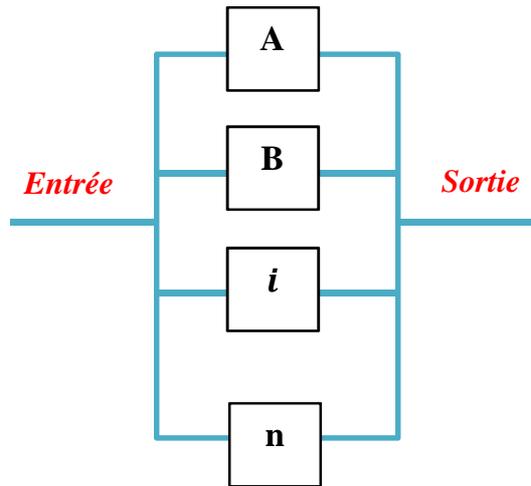


Figure I.16 – Composants en parallèle

Soit les “n” composants de la figure ci-dessous (Figure I.16) montés en parallèle. Si la probabilité de panne pour chaque composant repéré (i) est notée F_i alors:

$$R(s) = 1 - (1 - R)^n \quad (19)$$

Le cas particulier de deux dispositifs en parallèle si λ est constant R_s est obtenu par :

$$R_s = 1 - (1 - R_A) * (1 - R_B) = R_A + R_B - R_A * R_B = e^{-\lambda_A t} + e^{-\lambda_B t} - e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t} \quad (20)$$

Exemple :

Trois dispositifs A, B et C de même fiabilité $R_A = R_B = R_C = 0.75$ sont connectés en parallèle.

Déterminons la fiabilité R_s de l'ensemble :

$$R_s = 1 - (1 - 0.75)^3 = 0.984$$

Si on réduit le nombre des composants à deux :

$$R_s = 1 - (1 - 0.75)^2 = 0.9375$$

Si on met quatre dispositifs en parallèle :

$$R_s = 1 - (1 - 0.75)^4 = 0.9961$$

- **Cas des systèmes connectés en parallèle et dis en attente**

- ✓ **Cas de deux composants en attente**

Pour le système proposé, le composant A est en service actif et le composant B en attente. Si B tombe à tour en panne, il est automatiquement remplacé par C etc.

Si tous les composant sont identique avec λ constant, la fiabilité du dispositif est donnée par :

$$R(t) = e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t} = e^{-\lambda t} \quad (21)$$

Si A et B ne sont pas identiques la relation devient :

$$R(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + e^{-\lambda_A t} \quad (22)$$

- ✓ **Cas de n composants en attente**

Même démarche que précédemment, si A le composant actif tombe en panne, il est remplacé par B . Si B tombe à son tour en panne, il est automatiquement remplacé par C , etc. Si tous les composants sont identiques avec λ constant, la fiabilité du dispositif est donnée par :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^n}{n!} \right] \quad (23)$$

- ✓ **Cas où m composants sur les n sont nécessaires au succès du système**

Si on suppose que le système se compose de n composants K , tous de même fiabilité R , et qu'il doit y avoir au moins deux composants en état de fonctionnement, la fiabilité de l'ensemble est donnée par la relation :

$$R_s = \sum_{i=m}^n \left(\frac{n!}{i! (n-i)!} \right) R^i (1-R)^{n-i} \quad (24)$$

c. Combinaison de composants en série et en parallèle

C'est la combinaison des deux sous-paragraphes précédents.

Exemple : La fiabilité des trois composants identiques A , B et C est de 0.65, celle de D de 0,96 ; celle de E 0, 92 ; celle de G 0, 87 ; celle de F de 0,89 et celle de H de 1 (100%).

La fiabilité globale R_s est exprimée ici par :

$$R_s = [1 - (1 - 0.65)^3] * [0.96] * [1 - (1 - 0.92 * 0.87)(1 - 0.89 * 1)]$$

$$= 0.957 * 0.96 * 0.978 = 0.8986 \text{ environ } 90\%$$

I.6.10. Lois de fiabilité

On distingue deux types de lois de probabilité utilisées en fiabilité : les lois discrètes et les lois continues [9].

I.6.10.1. Lois discrètes

Une loi est dite discrète si elle prend ses valeurs dans \mathbb{N} c'est à dire des valeurs entières comme par exemple celle qui compte le nombre de pannes.

Parmi les lois discrètes on peut citer : 1) Loi Uniforme, 2) Loi de Bernoulli, 3) Loi Binomiale, 4) Loi Binomiale négative, 5) Loi Géométrique, 6) Loi Hypergéométrique, 7) Loi de Poisson.

I.6.10.2. Les lois continues

Parmi les lois continues on peut citer : 1) La loi du Khi deux, 2) La loi de Birnbaum-Saunders, 3) La loi Gamma, 4) Loi Inverse Gamma, 5) La loi logistique, 6) La loi log-logistique, 7) La Loi de Cauchy, 8) La loi de Student, 9) La loi Bêta, 10) La loi exponentielle, 11) La loi de Fisher, 12) La Loi normal, 13) La loi Log normale, 14) La loi de Weibull

I.6.10.3. Exemples étudiés

a. La loi de Weibull

L'expression loi de Weibull recouvre en fait toute une famille de lois, certaines d'entre elles apparaissant en physique comme conséquence de certaines hypothèses. C'est en particulier, le cas de la loi exponentielle ($\beta = 1$) et de la loi normale ($\beta = 3$). Sa fonction de fiabilité est :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (25)$$

Avec les paramètres de signification : γ, β, η définissent la distribution de Weibull.

On utilise trois paramètres :

- β : paramètre de forme ($\beta > 0$)
- η : paramètre d'échelle ($\eta > 0$)
- γ : paramètre de position ($-\infty < \gamma < +\infty$)

b. La loi exponentielle

En raison des applications multiples de cette loi qui n'est autre qu'un cas particulier de la loi de Weibull, on présentera dans ce qui suit un large développement de cette loi avec plusieurs applications.

Nous allons étudier des phénomènes physiques où la durée de vie est l'intervalle de temps écoulé entre l'instant de la mise en fonctionnement ou de la naissance, et l'instant de la première panne ou de la mort.

La plupart des phénomènes naturels sont soumis au processus de vieillissement. Il existe des phénomènes où il n'y a pas de vieillissement ou d'usure. Il s'agit en général de phénomènes accidentels. Pour ces phénomènes, la probabilité, pour un objet d'être encore en vie ou de ne pas tomber en panne avant un délai donné sachant que l'objet est en bon état à un instant t , ne dépend pas de t . Par exemple, pour un verre en cristal, la probabilité d'être cassé dans les cinq ans ne dépend pas de sa date de fabrication ou de son âge. Par définition, on dit qu'une durée de vie est sans usure si la probabilité de survie à l'instant t ne dépend pas de t .

Les modèles de fiabilité basés sur le taux de panne aléatoire sont les plus utilisés

Hypothèses :

- Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est indépendant de l'âge du système
- Pour le système qui opère sur demande, la panne à la n ème demande est indépendante de celles à la $n-1$ demande.
- Pour le système opérant en continu, ceci représente un $\lambda(t)$ constant

Pour caractériser la durée de vie et mettre en évidence la notion de vieillissement. On montre en particulier l'utilité pratique de la loi exponentielle pour approcher la distribution des temps de panne.

La distribution exponentielle s'exprime ainsi :

$$\text{Fiabilité : } R(t) = e^{-\lambda t}$$

Avec les paramètres de significations :

- e : est la base de l'exponentielle (2,718...)
- λ : c'est l'intensité.

$$\text{Densité de probabilité : } f(t) = \lambda t e^{-\lambda t}$$

$$\text{La fonction de répartition : } F(t) = 1 - \lambda t e^{-\lambda t} = \int_0^t \lambda t e^{-\lambda t} dt$$

La distribution exponentielle s'applique aux systèmes opérants en continu (systèmes électroniques) c'est ce qu'on appelle distribution sans mémoire. Les systèmes complexes ont aussi un $\lambda(t)$ constant

I.7. Modèles de fiabilité

On ne peut parler de mesure de fiabilité (modèles) qu'après avoir acquis une expérience suffisante dans l'exploitation du système ou éventuellement par des essais appropriés. On distingue [9] :

- a. **La fiabilité estimée ou intrinsèque** : c'est la fiabilité mesurée au cours d'essais spécifiques effectués dans le cadre d'un programme d'essai entièrement défini.
- b. **La fiabilité prévisionnelle** : elle est obtenue à partir d'un modèle mathématique connaissant la fiabilité estimée de ces composants (modèles déductifs). Les propriétés du système complet sont déduites d'une connaissance détaillée des propriétés de ses composants.
- c. **La fiabilité opérationnelle** : c'est la fiabilité mesurée sur des dispositifs en exploitation normale. Elle dépend des conditions réelles d'utilisation et du support logistique.

I.8. Les différentes formes de la maintenance

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise. Pour choisir, il faut donc être informé des objectifs de la direction, des directions politiques de maintenance, mais il faut connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, le comportement du matériel en exploitation, les conditions d'application de chaque méthode, les coûts de maintenance et les coûts de perte de production [6].

Le diagramme suivant synthétise selon la norme NF X 60-000 les méthodes de maintenance.

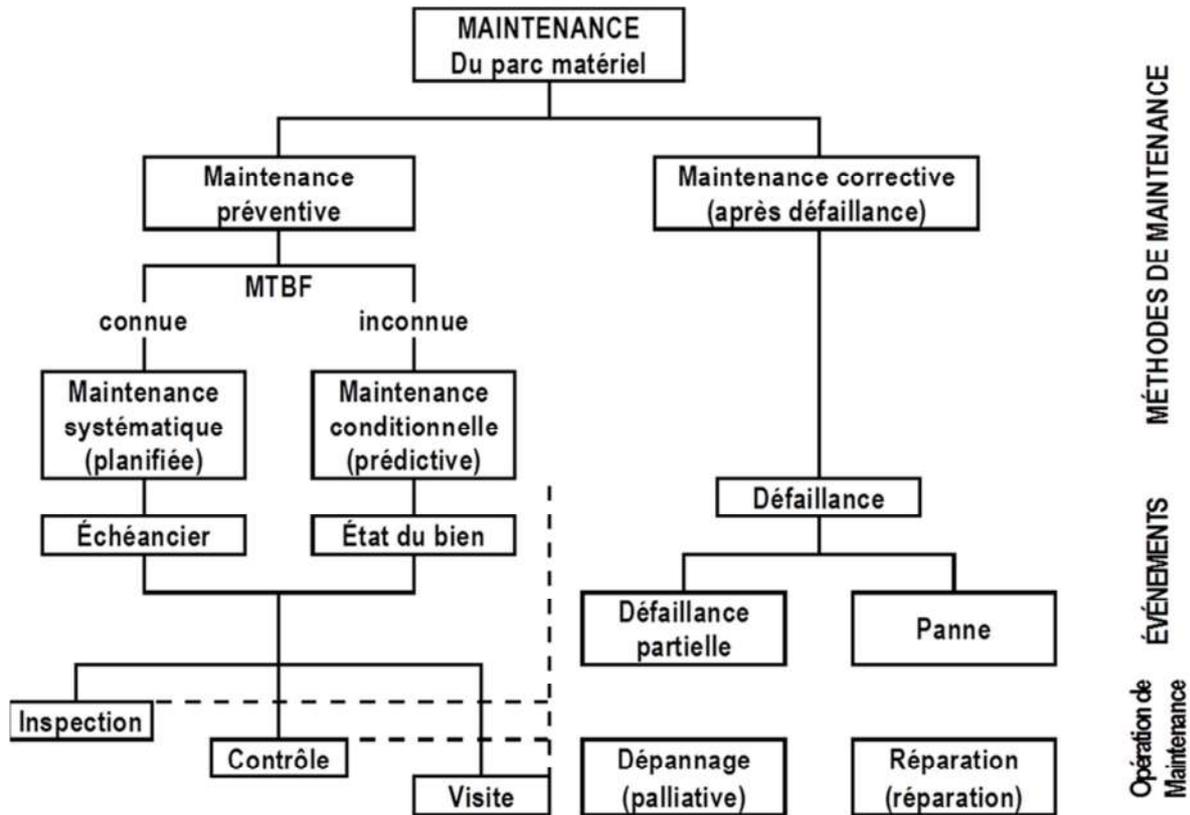


Figure I.17– Les méthodes de maintenance [2]

I.8.1. Maintenance corrective

I.8.1.1. Définitions

La maintenance corrective ou accidentelle est définie ainsi : « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

- Elle peut être « différée » : si elle n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données.
- Elle peut être « d'urgence » : si elle est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables.

I.8.1.2. Définitions (extraits normes NF X 60-010)

La maintenance corrective appelée parfois curative (terme non normalisé) a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues nécessaires à son utilisation.

Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraînent une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés et/ou une dépréciation en quantité et/ou qualité des services rendus.

La Figure I.18 montre que l'action exercée après une défaillance sera dite corrective et notée I_c (intervention corrective).

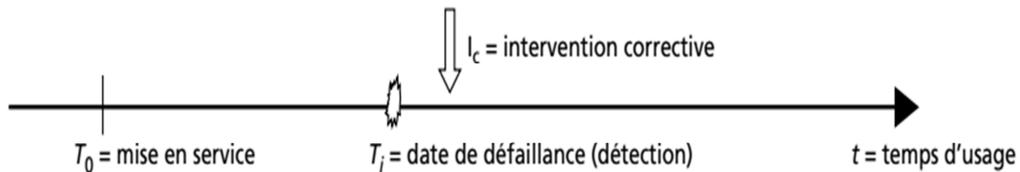


Figure I.18 - Action exercée après une défaillance sera dite corrective [1]

I.8.2. Maintenance curative

Ce type de maintenance permet de remettre définitivement en état le système après l'apparition d'une défaillance. Cette remise en état du système est une réparation durable. Les équipements réparés doivent assurer les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Une réparation est une opération définitive de la maintenance curative qui peut être décidée soit immédiatement à la suite d'une défaillance, soit après un dépannage.

I.8.3. Maintenance palliative

La maintenance palliative revêt un caractère temporaire, provisoire. Elle est principalement constituée d'opérations qui devront toutefois être suivies d'opérations curatives (réparations). Le dépannage est une opération de maintenance palliative qui est destinée à remettre le système en état provisoire de fonctionnement de manière à ce qu'il puisse assurer une partie des fonctions requises.

I.8.4. Maintenance préventive

Opération de maintenance effectuée avant la détection d'une défaillance d'une entité, à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits (suite à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs) et destinée à réduire la probabilité de défaillance d'une entité ou la dégradation du fonctionnement d'un service rendu.

Elle est subdivisée en :

- Maintenance systématique
- Maintenance conditionnelle
- Maintenance prévisionnelle

Note : L'intervention préventive sert à améliorer l'état de l'élément. Par conséquent, seules les défaillances progressives sont prises en compte ici.

- Maintenance prévisionnelle** : Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.
- Maintenance systématique** : Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.
- Maintenance conditionnelle** : Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent.

I.9. Organisation d'entretien et de dépannage des équipements électriques

Comme la loi de Murphy le prédisait, les problèmes de système de contrôle électrique se produisent généralement avec le pire moment possible. Il est sage d'être préparé avec un plan de dépannage. Souvent, nous nous empressons de régler directement un problème alors qu'en fait, il serait avantageux pour nous d'être méthodiques avec notre processus. Ici, nous partageons les sept étapes pour le dépannage électrique [6].

- **Collecter des informations** : La première étape de tout exercice de dépannage du système électrique consiste à recueillir autant d'informations que possible sur le problème. Plutôt que de plonger immédiatement et d'essayer de faire fonctionner l'équipement au hasard, prenez d'abord un peu de recul et déterminez comment l'équipement est censé fonctionner, quelle documentation technique est disponible pour l'équipement et quelqu'un d'habitué à cet équipement.
- **Comprendre le dysfonctionnement et le rôle joué par l'équipement défectueux dans tout le processus** : Lorsque vous comprenez comment l'équipement et le

processus sont supposés fonctionner, vous pouvez mieux comprendre quelle partie de celui-ci ne fonctionne pas correctement.

- **Identifier ce qui peut être mesuré afin de pouvoir identifier les éléments qui sont en dehors de la plage acceptable :** Par exemple, y a-t-il des lectures de tension ou des lectures de température qui vous aideraient à évaluer la source du problème ?
- **Identifier la source du problème en utilisant les données disponibles et les outils d'analyse pour isoler le composant défectueux :** Cela pourrait impliquer d'isoler des composants et d'évaluer leurs paramètres de circuit ou d'isoler les circuits par groupe en cas de circuit compliqué.
- **Corriger / réparer le composant endommagé.**
- **Vérifier la réparation après l'achèvement :** Une fois la réparation effectuée, démarrer le système pour s'assurer qu'il fonctionne maintenant comme requis. Ceci est important car il peut y avoir eu d'autres problèmes sous-jacents. Par exemple, il peut y avoir un problème avec un circuit qui fait sauter un fusible (comme une connexion électrique en court-circuit). Si c'est le cas, un dépannage supplémentaire sera nécessaire.
- **Effectuer une analyse des causes profondes pour déterminer ce qui a vraiment causé le problème :** Puisque l'un des objectifs du dépannage est de s'assurer que le problème ne se reproduira pas, il est important de déterminer ce qui a réellement causé le dysfonctionnement et de prendre des mesures pour s'assurer qu'une solution permanente est trouvée.

I.10. Classification de la maintenance planifiée des équipements électriques

Selon la norme Afnor NF EN 13306 X 60-319, la « maintenance planifiée est une maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire les probabilités de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien » [10].

L'objectif de la maintenance planifiée est d'établir et de maintenir un équipement dans des conditions de production optimale. Mettre au point un plan de la maintenance planifiée signifie d'augmenter les outputs (0 problème de fiabilité, 0 panne) et d'améliorer les compétences des techniciens de maintenance en augmentant la disponibilité des machines.

Cela implique la réduction des actions « curatives et palliatives » de la maintenance pour construire un système qui inclue :

- Maintenance systémique, conditionnelle et prédictive régulière pour prévenir des pannes.
- Maintenance corrective pour réduire le risque de panne.
- Arrêt maintenance pour restaurer les machines et pour qu'elles refonctionnent mieux le plus rapidement possible.
- Supplément dans l'amélioration continue de la maintenance autonome.

En terme de culture, mettre en œuvre la maintenance planifiée, c'est passé d'un mode « réactivité » (une panne a lieu, il faut redémarrer au plus vite, appelé aussi mode « pompier ») à un mode de proactivité (il y a possibilité d'une panne, faut agir). Ainsi, la maintenance planifiée a pour enjeu de :

- Prolonger l'intervalle entre deux arrêts programmés.
- Diminuer la durée de l'intervention.
- Limiter la gravité des dégradations.
- Maîtriser l'outil de production en visant le « zéro panne » et en rendant les processus stables.
- Réduire les coûts de la maintenance.
- Soutenir les activités de la maintenance autonome.
- Intervenir au moment le plus optimal et opportun.

I.10.1. Prioriser le déploiement de la maintenance planifiée

Mettre en œuvre la maintenance planifiée est un processus complexe et coûteux. Il devient nécessaire le faire étape par étape et de prioriser les équipements. Il faut donc recueillir des données sur les équipements (MTBF, MTTR, fréquence et gravité des pannes...).

Attribut	Critère d'évaluation	Rang
Sécurité : effet de la défaillance sur les personnes et l'environnement	Une défaillance de l'équipement présente un risque d'explosion ou d'autres dangers; défaillance de l'équipement provoque une pollution grave	A
	Une défaillance de l'équipement pourrait nuire à l'environnement	B
	Autre équipement	C
Qualité : Effet de la défaillance sur la qualité du produit	La défaillance de l'équipement a un effet majeur sur la qualité (peut entraîner une contamination du produit ou des réactions anormales et produire un produit hors spécifications)	A
	La défaillance de l'équipement produit des variations de qualité qui peuvent être corrigées rapidement par l'opérateur	B
	Autre équipement	C
Opération : Effet de la défaillance sur la production	Équipement ayant un effet majeur sur la production, sans mise en veille, dont la défaillance entraîne la fermeture complète des processus précédents et suivants	A
	La défaillance de l'équipement ne provoque qu'un arrêt partiel	B
	La défaillance de l'équipement a peu d'effet ou aucun effet sur la production	C
Maintenance : Temps et coût de la réparation	L'équipement prend 4+ heures ou coûte \$ 2 400 + pour réparer, ou échoue trois fois ou plus par mois	A
	L'équipement peut être réparé en moins de 4 heures à un coût entre 240 \$ et 2 400 \$ ou échoue moins de trois fois par mois	B
	L'équipement coûte moins de 240 \$ à réparer ou peut être laissé non réparé jusqu'à ce qu'une opportunité pratique se présente	C

Tableau I.2 Priorisation d'une maintenance planifiée [11]

Une fois cette priorisation effectuée, il faut identifier les objectifs de la maintenance planifiée pour le ou les équipements.

I.10.2. Un exemple de classification

Le premier élément de classification consiste à mettre une priorité sur une ligne ou un équipement. La grille ci-dessous permet de faire cette évaluation [11].

	Classe A	Classe B	Classe C	Graphique de décision
Légal	Maintenance demandée expressément par les normes ou règles du secteur d'activité.	Maintenance non exigé par des normes mais uniquement par des recommandations internes.	Maintenance non demandée par les normes ou règles.	
Sécurité	Risque élevé.	Risque moyen.	Risque faible.	
Qualité	Haute probabilité.	Faible probabilité ou facilement détectable.	Aucune probabilité.	
Travail	Equipement utilisé 24/24.	Equipement utilisé uniquement sur 2 équipes.	Equipement utilisé sur 1 équipe.	
Délai	C'est le goulot. Son arrêt engendre l'arrêt total de la production.	Son arrêt impactera la performance générale.	Aucun effet sur la production totale.	
Fréquence	Quelques pannes ces 2 derniers mois.	Quelques pannes ces 6 derniers mois.	La dernière panne date de plus de 6 mois.	
Maintenance	MTTR d'environ 2 heures.	MTTR entre 45mn et 2hr.	MTTR de moins de 45mn.	
Coût	L'arrêt nous coute plus de 10 000 € de l'heure.	L'arrêt nous coute entre 5 et 10 000 € de l'heure.	L'arrêt nous coute moins de 5 000 € de l'heure.	

Une fois que l'on a priorisé nos équipements, nous allons en faire de même avec les pièces de ces équipements. La grille ci-dessous nous permet d'effectuer cette classification.

	Classe A	Classe B	Classe C	Graphique de décision
Légal	Maintenance demandée expressément par les normes ou règles du secteur d'activité.	Maintenance non exigé par des normes mais uniquement par des recommandations internes.	Maintenance non demandée par les normes ou règles.	
Coût	L'arrêt nous coute plus de 10 000 € de l'heure.	L'arrêt nous coute entre 5 et 10 000 € de l'heure.	L'arrêt nous coute moins de 5 000 € de l'heure.	
Délai	Plus de 90 jours pour se faire réapprovisionner.	Entre 21 et 90 jours.	Moins de 21 jours.	
Maintenance	Pièce remplacée uniquement par le fabricant.	Pièce remplacée par des organismes spécifiques et quelques personnes certifiées en interne.	Pièce remplacée par le personnel de maintenance.	

CHAPITRE II

Organisation et gestion de la maintenance

II.1. Introduction

Une bonne organisation de maintenance industrielle contribue à améliorer l'efficacité et la disponibilité des équipements pour les services de production. Plusieurs méthodes de maintenance sont intervenues pour traiter des tâches différentes. Ces méthodes sont d'autant plus efficaces quand elles gèrent et coordonnent toutes les activités liées à la fois à la production et à la maintenance, dans le cadre d'une politique de maintenance adaptée aux exigences de l'industrie, en tenant compte de ses diverses contraintes (techniques et économiques) et des objectifs de production (cout, qualité, délai).

II.2. Structure des ateliers spécialisés dans le dépannage des convertisseurs électromécaniques

II.2.1. Définition

Nous définissons un atelier de maintenance comme étant un ensemble de ressources (techniciens, postes d'intervention, outillage, pièces de rechange, magazine) destinée à garantir la pérennité des machines de production. Son rôle est de détecter l'origine des défaillances sur une machine défectueuse et de rétablir son fonctionnement (maintenance corrective). Afin de réduire la probabilité d'occurrence des défaillances et augmenter le cycle de vie de ces machines, des interventions régulières sont programmées (maintenance préventive systématique).

II.2.2. Fonctions de l'atelier de maintenance

Les fonctions de l'atelier de maintenance sont réparties en trois services avec la classification schématique illustrée par la Figure II.1. Ces fonctions interagissent entre elles pour assurer une gestion des activités production/maintenance permanente et surtout pour améliorer le rendement de ces activités [2].

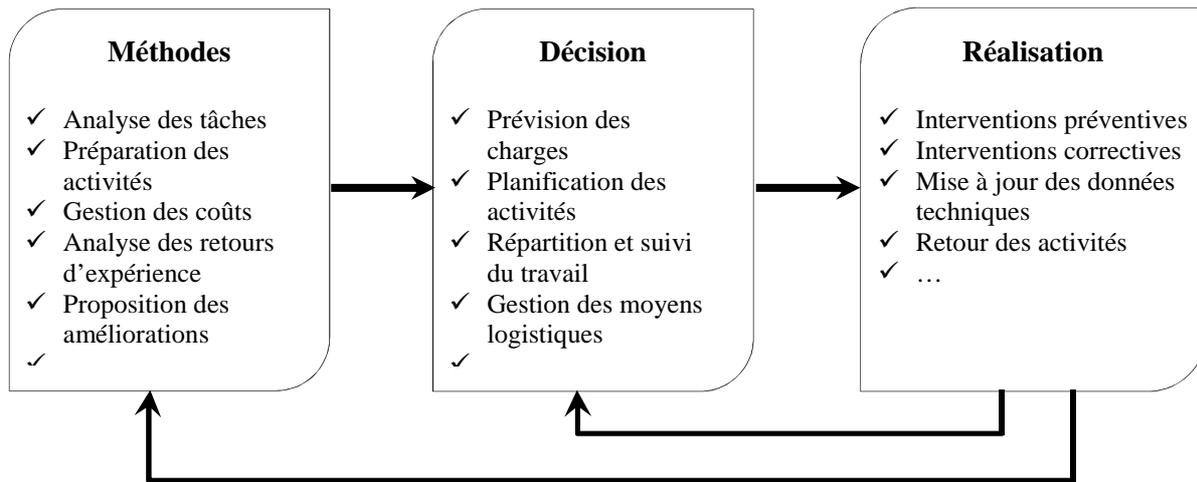


Figure II.1 - Fonctions de l'atelier de maintenance [2]

II.2.3. Étapes de conception d'un atelier de maintenance

Il est clair que le maintien de la productivité dépend, qualitativement et quantitativement, des outils de production utilisés mais aussi de l'efficacité de la maintenance de ces outils. La maintenance est donc un champ d'action privilégié de la recherche d'amélioration des performances de l'entreprise. Cependant, les méthodes et techniques de maintenance ne possèdent pas un caractère unique et universel. En fonction du type des processus industriels à maintenir et de la nature des systèmes et sous-systèmes ou équipements, il faudra mettre en œuvre des méthodes spécifiques tenant compte des technologies d'employées selon les cas :

- Systèmes mécaniques dynamiques : moteurs, pompes.
- Systèmes numériques programmés.
- Systèmes hydrauliques ou thermo hydrauliques.
- Systèmes électriques ou électroniques.

Chacun de ces systèmes assure une ou plusieurs fonctions grâce à ses composants ou équipements. Ces fonctions sont hiérarchisées en termes d'importance, et avant d'appliquer une méthode de maintenance, il convient d'analyser ces systèmes et de s'interroger sur les aspects technico-économiques pour déterminer la politique de maintenance à appliquer. Pour cela, il est nécessaire d'identifier :

- Les fonctions du système à maintenir en distinguant les missions principales et secondaires et leurs importances relatives,

- La structure du système en analysant ses modes de fonctionnement et les caractéristiques des équipements,
- L'inventaire des moyens de mesure et d'intervention.

Afin de déterminer qualitativement les ressources de l'AdM, l'analyse du système de production s'avère nécessaire. Notre démarche de conception d'un AdM est schématisée par la Figure II.2. Vu que le budget d'investissement dans les ressources de l'AdM est limité et que certaines pannes sont assez rares et/ou ont des durées d'intervention assez faibles, un classement des machines par ordre de priorité est alors réalisé selon un ensemble de critères qu'on détaillera par la suite. On ne retiendra par la suite que les équipements les plus critiques. Pour les équipements qui ont des pannes assez rares ou ceux qui ne peuvent pas être déplacés vers l'AdM, les interventions sont réalisées par les équipes d'antennes sectorisées.

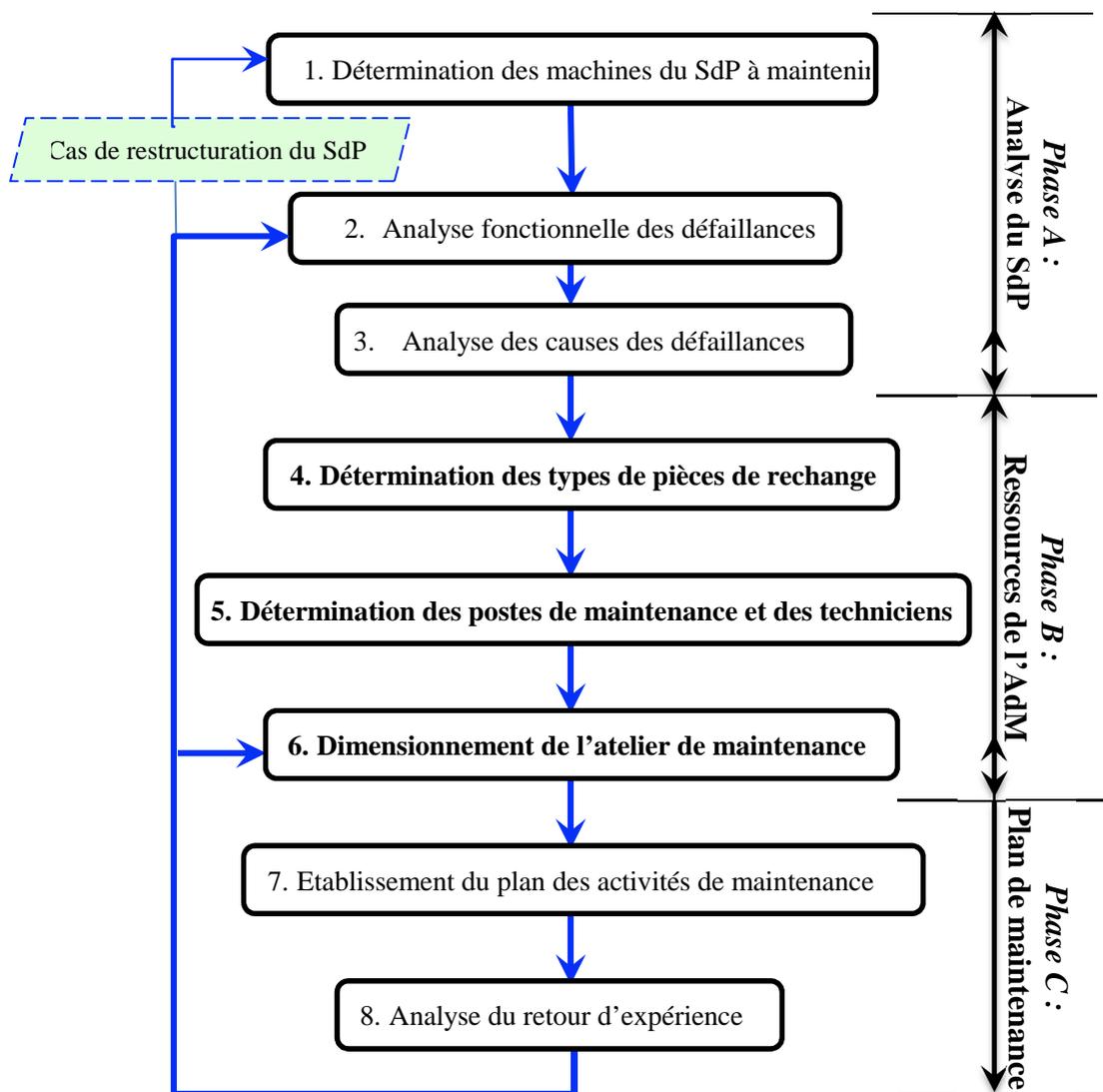


Figure II.2 - Etapes de conception d'un atelier de maintenance [12]

Dans la démarche de conception d'un atelier de maintenance, nous distinguons trois phases principales :

- **Phase A : Analyse du SdP**

Cette phase correspond à l'étude de l'ensemble des machines de production. Elle a pour but de déterminer quelles sont les machines à privilégier pour l'étude. Ensuite, les défaillances fonctionnelles des machines sélectionnées sont étudiées et reliées aux défaillances des différents équipements qui les composent. Ces défaillances sont analysées du point de vue mode de défaillance, de ses causes possibles et de ses effets sur les fonctions de l'équipement.

- **Phase B : détermination des ressources de l'AdM**

Dans cette phase, nous déterminons qualitativement les ressources que composent l'atelier de maintenance en termes de postes d'intervention, de techniciens et de pièces de rechange pour le remplacement. L'organisation structurelle de l'AdM est alors définie.

- **Phase C : Elaboration du plan de maintenance**

Dans cette phase, on définit pour chaque équipement le type d'action qu'il faut mettre en place. Ceci conduit à l'élaboration d'un planning initial des différentes tâches de maintenance. Un retour d'expérience au niveau de l'analyse des défaillances fonctionnelles permet d'améliorer le programme de maintenance au cours du temps.

II.3. Organisation des opérations de maintenance

Ne sont vues ici que les opérations essentielles. Pour le reste, se référer à la norme NF X 60-010 [1, 2, 6,8].

II.3.1. Les opérations de maintenance corrective

a. Le dépannage

Action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement. Compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de condition de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette

connaissance permet souvent de gagner du temps. Souvent, les opérations de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses.

De ce fait, les services de maintenance soucieux d'abaisser leurs dépenses tentent d'organiser les actions de dépannage. Certains indicateurs de maintenance (pour en mesurer son efficacité) prennent en compte le problème du dépannage.

Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt.

b. La réparation

Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

Remarque : la réparation correspond à une action définitive. L'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu. **Tous les équipements sont concernés.**

II.3.2. Les opérations de maintenance préventive

a. Les inspections

Activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

b. Visites

Opérations de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. Une visite peut entraîner une action de maintenance corrective.

c. Contrôles

Vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement. Le contrôle peut :

- Comporter une activité d'information.
- Inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement.
- Déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

Les opérations de surveillance (contrôles, visites, inspections) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien. Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

II.3.3. Autres opérations

a. Révision

Ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné.

Il faut distinguer suivant l'étendue des opérations à effectuer les révisions partielles et les révisions générales. Dans les 2 cas, cette opération nécessite la dépose de différents sous-ensembles.

Le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections.

Les 2 types d'opérations définis (révision générale ou partielle) relèvent du 4ème niveau de maintenance.

b. Les échanges standards

Reprise d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé, et vente au même client d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble identique, neuf ou remis en état conformément aux spécification du constructeur, moyennement le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé d'après le coût de remise en état.

Soulte : somme d'argent qui, dans un échange ou dans un partage, compense l'inégalité de valeur des lits ou des biens échangés.

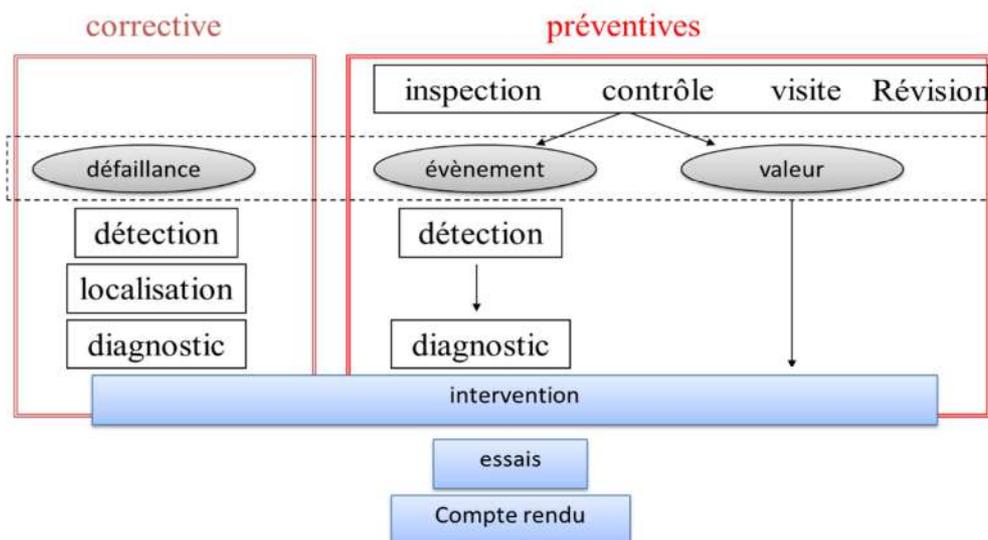


Figure II.3 - Organisation des opérations de maintenances

II.4. Etapes principales de technologie de dépannage des machines électriques [13,14]

II.4.1. Etape 1 : Mise en évidence de la défaillance

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).
 - ✓ Etat de la machine.
- A-t-on déjà une première idée permettant de cerner la zone en défaillance ?

II.4.2. Etape 2 : 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.

II.4.3. 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.

II.4.4. 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 :

a. Chaîne d'acquisition (entrée)

- Carte d'entrée API
- Fils et embouts
- Bornes et connecteurs
- Contacts avec leurs connexions
- Capteurs avec leur réglage

b. 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
- Electro distributeurs (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.4.5. Etape 5 : Liste des modes de défaillances

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.

II.4.6. Etape 6 : Critères 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

- Electrique.
- Pneumatique.
- Hydraulique.
- Mécanique.

II.4.7. Etape 7 : Procédures 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 points précis du test (ex : où placer les sondes du voltmètre).
- Les résultats normalement attendus de ce test.
- Une observation éventuelle.

II.4.8. Etape 8 : Réparation

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.

II.4.9. 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.

II.5. Etude des différentes pannes des machines électriques et méthodes de leur détection

Dans ce paragraphe sont présentés différents défauts des machines électriques, leurs origines et leur classification. Une défaillance de machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement [15]. Les raisons de défaillances dans les machines tournantes électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, nature de la charge et le calendrier de maintenance. D'après les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau II.1.

Défaillances des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
		Electrique	Mouvement des enroulements et des tôles
			Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Externe	Mécanique	Défaillance au niveau du circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		Environnementale	Défaut de montage
			Humidité
			Température
		Electrique	Propreté
			Fluctuation de la tension
			Sources de tensions déséquilibrées
		Réseau bruité	

Tableau II.1 - Défaits des machines électriques selon leurs origines

Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances de machines électriques puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance [16].

II.5.1. Défaits statoriques

- *Court-circuit entre spires* : surtension, température excessive, vibration, humidité.
- *Court-circuit entre phases* : haute température, alimentation déséquilibré, défaut d'installation.
- *Défaut d'isolation* : démarrage fréquent, décharge partielle, condition, température et humidité extrême.
- *Défaut entre le stator et carcasse* : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc.
- *Déplacement des conducteurs* : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines.
- *Défaillance des connecteurs* : vibration excessive.
- *Vibration de la carcasse* : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants qui se manifestent sous la forme d'un court-circuit entre spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse.

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. D'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique.

La contrainte thermique amenée par le courant de court-circuit risque d'entraîner la propagation du défaut à d'autres spires, ce qui peut conduire au déclenchement des protections électriques dans l'alimentation. Un court-circuit entre phases peut arriver en tout point du bobinage [15], mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage.

II.5.2. Défauts rotoriques

- *Défaut de roulements* : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, haute température, perte de lubrifiant, charge déséquilibrée, corrosion.
- *Rupture de barres* : cycle thermique, régime transitoire à longue durée ; déséquilibre magnétique.
- *Rupture d'une portion d'anneau* : cycle thermique.
- *Excentricité* : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements.
- *Désalignement des roulements* : défaut de couplage, mauvaise installation, surcharge.
- *Défaut du circuit magnétique* : défaut de fabrication, surcharge, cycle thermique.
- *Déséquilibre mécanique* : mauvais alignement, mouvement des anneaux de court-circuit.

II.5.2.1. Défauts de roulements

Comme il est indiqué sur la Figure II.4, la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs.

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Ce type de défaut induit également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor [17].

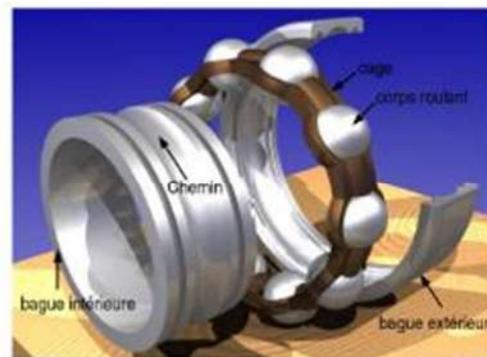


Figure II.4 - Représentation d'un roulement à billes

II.5.2.2. Excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement.

Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des

efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées [18] :

- L'excentricité statique (Figure II.5(a)) – généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.
- L'excentricité dynamique (Figure II.5(b)) – correspond, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator [24]. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- L'excentricité mixte (Figure II.5(c)) – la somme des deux cas présentés ci-avant.

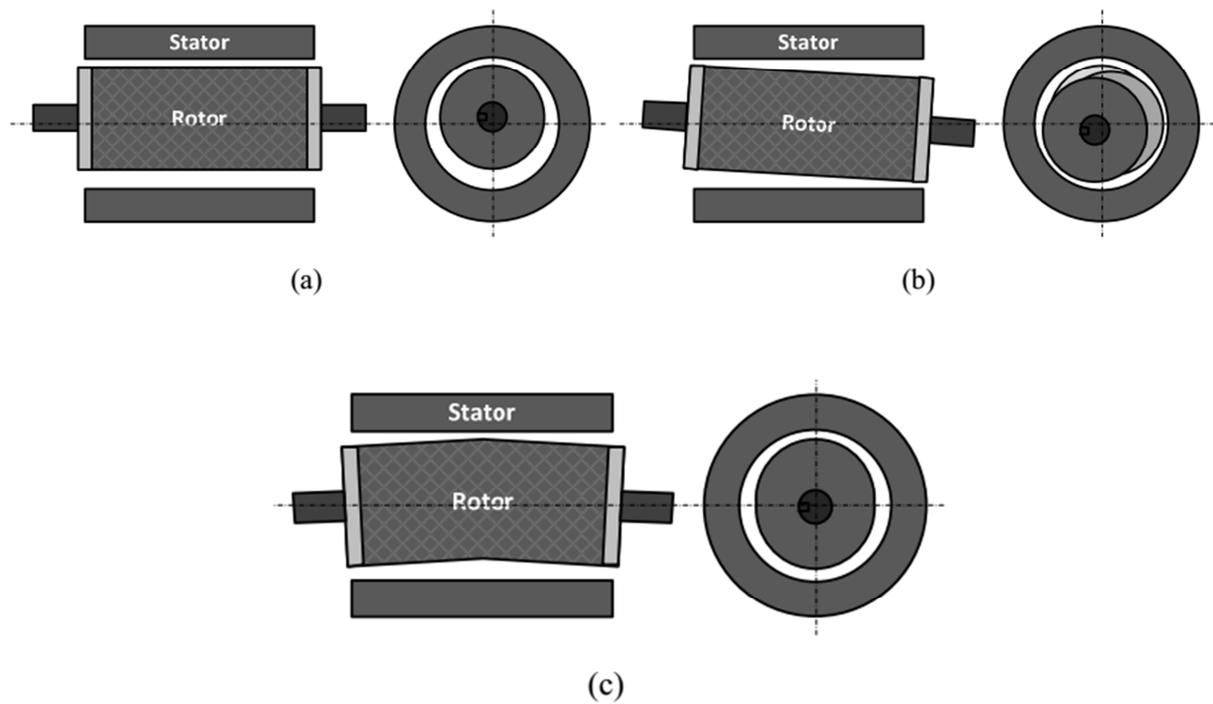


Figure II.5 - Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte

II.5.2.3. Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (Figure II.6).

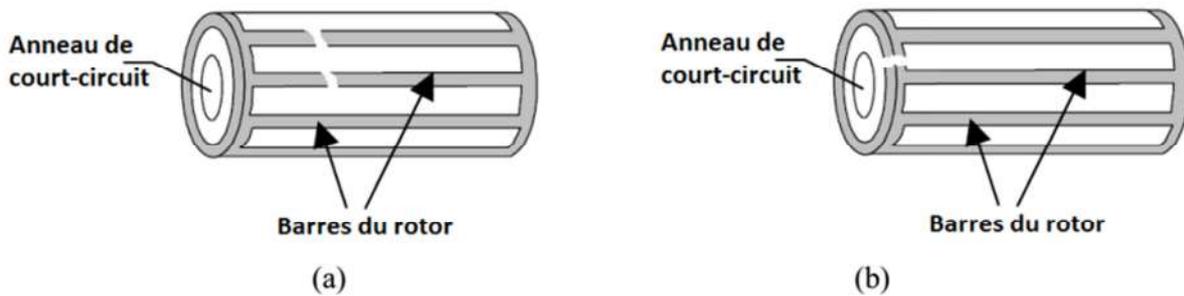


Figure II.6 - Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit.

Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). Cela fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante) [19]. Si l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques.

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure [20].

L'apparition d'un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes [20]. Ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine.

Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines électriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs.

II.5.3. Méthodes de détection des pannes des machines électriques

On retrouve, dans les différents travaux, les trois axes constituant le domaine du diagnostic des machines électriques, qui conduisent à définir trois méthodologies de de détection des pannes des machines électriques : méthodes de connaissances, méthodes de redondances analytiques et méthodes par modélisation de signaux (voir Figure II.7)

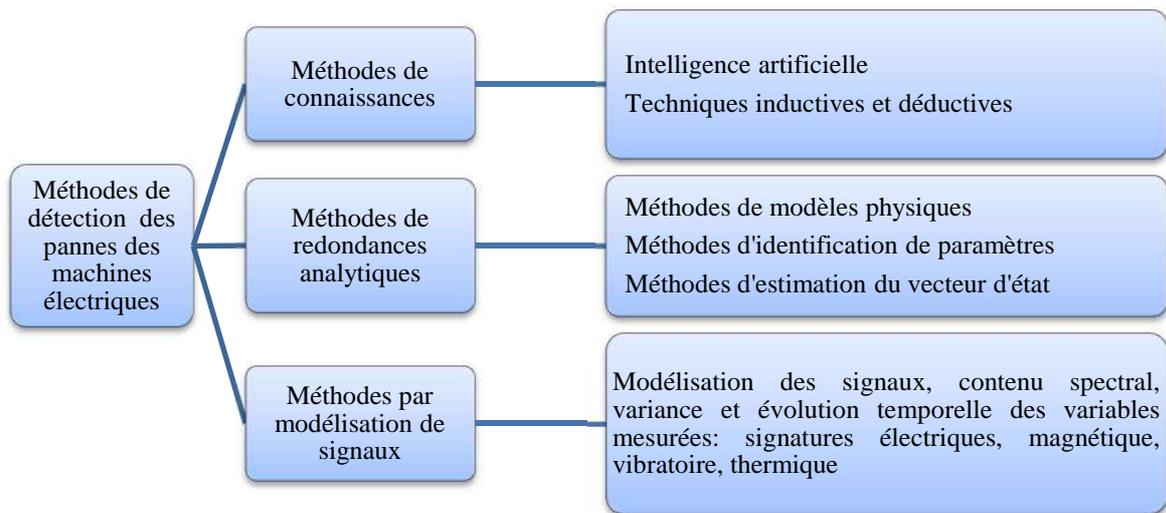


Figure II.7 - diaporama des méthodes de détection des pannes des machines électriques

- a. *Les méthodes de connaissances* n'utilisant pas de modèle mathématique pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expérience humaine confortée par des retours d'expérience. Dans la littérature sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par ces méthodes. Les techniques basées sur l'intelligence artificielle mettent en œuvre la reconnaissance de formes, les systèmes experts, les réseaux de neurones et la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité. Les méthodes inductives ou déductives ne s'appliquent pas directement au diagnostic, mais peuvent y aider. Elles sont essentiellement utilisées pour définir les causes du défaut en utilisant des modèles de pannes. Il est à noter que ces méthodes sont davantage du ressort des automaticiens que des électrotechniciens.
- b. *Les méthodes de redondances analytiques* se basent sur une modélisation quantitative du système et exploitent les relations entre les variables du système considéré pour identifier

les paramètres physiques à surveiller. On y distingue trois classes : les méthodes de modèles physiques, les méthodes d'indentification de paramètres et les méthodes d'estimation du vecteur d'état.

- c. *Les méthodes par modélisation de signaux* sont des méthodes basées sur une modélisation des signaux, le contenu spectral, la variance et l'évolution temporelle des variables mesurées. Ces méthodes exploitent essentiellement les signatures électrique, magnétique, vibratoire, thermique ou la puissance instantanée.

La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic des défauts sur les machines électriques repasse sur l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut. Les grandeurs et signaux de défauts les plus fréquemment utilisés sont : les courants statoriques, la tension d'alimentation, le flux de dispersion, le couple électromagnétique, la vitesse de rotation, la puissance instantanée aussi que les vibrations mécaniques. Le travail proposé est axé sur le développement des méthodes de diagnostic, basées sur l'analyse du champ de dispersion.

II.5.4. Propositions de causes possibles de pannes et des vérifications correspondantes

CAUSES POSSIBLES DES PANNES	VERIFICATION POUR DETECTER CES CAUSES
<p>1) Pannes provoquées par le grippage d'un organe en mouvement, ce grippage pouvant provenir lui-même:</p> <ul style="list-style-type: none"> -d'un manque de graisse. -d'un lubrifiant mal adapté. -d'un lubrifiant sale. -d'une fuite. -d'une charge exagérée. -d'un mauvais fonctionnement du refroidissement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier les divers points à graisser. - Vérifier les pleins à faire. - Vérifier les échauffements des paliers. - Contrôler les caractéristiques des lubrifiants employés. - Effectuer les vidanges nécessaires. - Nettoyer les filtres à huile. - Nettoyer les réservoirs à lubrifiants. - Effectuer des prélèvements à fin d'analyse. - Vérifier les excès de graissage. - Rechercher les fuites éventuelles. - Contrôler les pressions d'huile. - Contrôler les charges accidentelles sur les paliers. - Vérifier les pompes de circulation. - Contrôler l'entartrage.
<p>2) Pannes provoquées par le desserrage des pièces d'assemblage des organes mécaniques et électriques (boulons, clavettes, coins, attaches de courroie,....)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Resserer les écrous et les vis. - Remettre en place coins et clavettes. - Ausculter le bruit et les vibrations. - Vérifier les attaches de courroie.
	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier les cônes d'embrayages. - Vérifier les ferodo. - Contrôler les plaques d'usure.

<p>3) Pannes provoquées par:</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'usure. - l'érosion. - l'oxydation. - les coups de feu. - la corrosion chimique. - l'amorçage d'un arc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier l'usure des galets. - Vérifier l'usure des rails ou chemins de roulements. - Vérifier l'usure des bagues et coussinets. - Contrôler l'usure des arbres. - Vérifier l'usure des coulisseaux. - Contrôler les pignons, barbotins et crémaillères. - Vérifier l'usure des fourchettes et doigts. - Vérifier l'usure des chaînes de transmission. - Vérifier les cardans. - Vérifier les manchons d'accouplement. - Contrôler l'usure des clavettes coulissantes. - Contrôler l'usure des bandes transporteuses. - Exécuter les contrôles géométriques nécessaires. - Rattraper les jeux des organes de réglage. - Contrôler l'état de la peinture et de la corrosion.
<p>4) Pannes provenant du vieillissement de certains matériaux, comme les isolants électriques.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier les pièces isolantes des contacteurs. - Vérifier les revêtements des câbles. - Faire les contrôles d'isolement.
<p>5) Dérailements, renversements ou autres accidents provenant d'un défaut des chemins de roulements.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier l'écartement des rails. - Vérifier le niveau des chemins de roulement. - Vérifier les butoirs de fin de course. - Vérifier l'ancrage aux rails. - Vérifier le calage. - Vérifier l'observation des consignes.
<p>6) Pannes provoquées par la flexion, l'allongement ou la rupture intempestive d'un organe soit par:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mauvaise utilisation du matériel. - fatigue de matériaux. - défaut de conception. - accident prévisible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Examiner les pièces fragiles. - Vérifier les pièces flexibles. - Contrôler l'emploi correct des machines. - Vérifier les câbles et chaînes de levage. - Contrôler les crochets et leurs sécurités. - Vérifier les manilles. - Exécuter les contrôles statiques et dynamiques. - Retendre les courroies et les chaînes.
<p>7) Pannes provoquées par des défauts d'alimentation tels que surtension ou sous-tension.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Exécuter les contrôles de puissance. - Exécuter les contrôles de vitesse.
<p>8) Détérioration des systèmes de commande:</p> <ul style="list-style-type: none"> - électrique. - pneumatique. - hydraulique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier l'état des contacts électriques. - Vérifier les ressorts de contact. - Vérifier la mise à la terre. - Vérifier la protection des transformateurs. - Contrôler les jeux de roulements des moteurs. - Contrôler l'empoussiérage des moteurs. - Faire fonctionner les électro-freins. - Faire fonctionner les diverses sécurités. - Vérifier l'état des fils d'alimentation. - Contrôler le serrage des bornes. - Vérifier l'état des balais des bagues collecteurs. - Vérifier l'état diélectrique de l'huile du transformateur. - Vérifier les bougies. - Vérifier les vis platinées. - Vérifier les pleins d'huile de commande. - Vérifier les fuites éventuelles de fluide.

	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier le fonctionnement des clapets. - Nettoyer les carters d'huile de commande.
<p>9) Pannes provoquées par l'eau, l'humidité ou l'introduction d'un corps étranger, ce qui peut entraîner:</p> <ul style="list-style-type: none"> - courts-circuits. - encrassement de butées. - filtres inefficaces. - embrayages gras. - freins gras ou humides. - blocage des sécurités. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyer les butées. - Nettoyer les glissières. - Nettoyer les arbres. - Signaler les machines sales. - Vérifier les soupapes de sécurité. - Vérifier les arrêts automatiques. - Faire fonctionner les limiteurs de couple. - Vérifier les parachutes. - Contrôler les freins. - Contrôler les protections thermiques.

II.6. Technique de démontage et de remontage

En maintenance, il est possible de classer l'action de démontage en 2 catégories : **démontage total** lors de la révision complète d'une installation et **démontage partiel ou ciblé** pour remplacer un composant défectueux. Cette dernière catégorie nécessite la dépose d'un minimum de pièces afin de réduire le temps d'intervention. C'est pourquoi il est souhaitable de préparer l'intervention et d'établir à cet effet une gamme de démontage qui fera apparaître l'ordre chronologique des opérations et les outillages nécessaires et éventuellement à réaliser.

Pour le remontage, l'ordre est souvent l'inverse de celui du démontage. Il est cependant nécessaire de préciser les opérations de contrôle et de réglage à réaliser lors de ces opérations. Ceci peut éviter un nouveau démontage [21].

II.6.1. Démontage : Méthodologie

- Etudier le dessin d'ensemble.
- Localiser la pièce à démonter dans le cas d'un démontage partiel.
- Rechercher les éléments de liaison (vis, goupille...).
- Repérer les sous-ensembles indépendants.
- Etablir la gamme de démontage.
- Repérer la position des pièces entre elles au cours du démontage si nécessaire.
- Utiliser l'outil approprié.

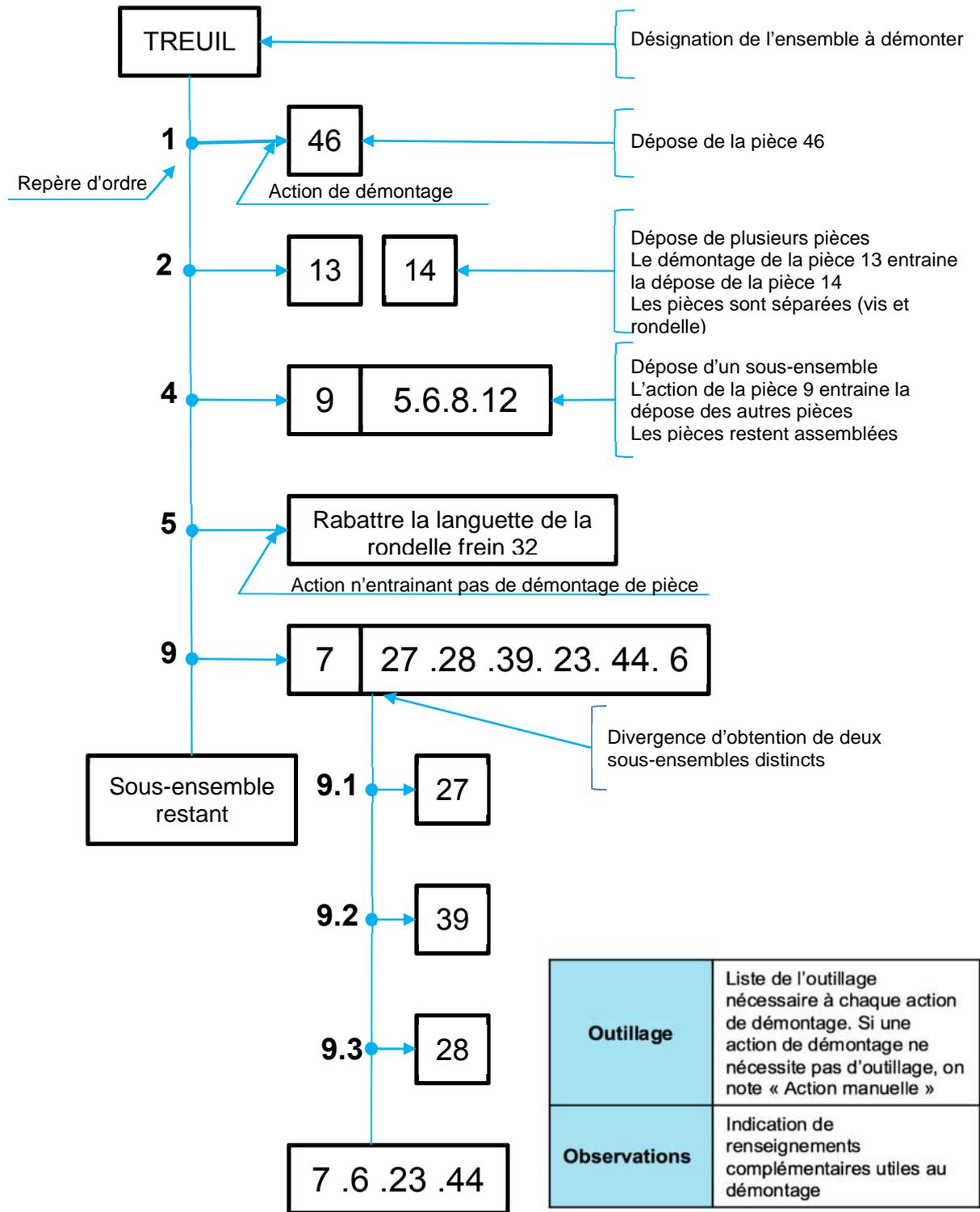


Figure II.8- Exemple de présentation d'une gamme de démontage [21]

L'organigramme de démontage est utile, dans le cas où la gamme de démontage n'a pas été établie pour confirmer un diagnostic.

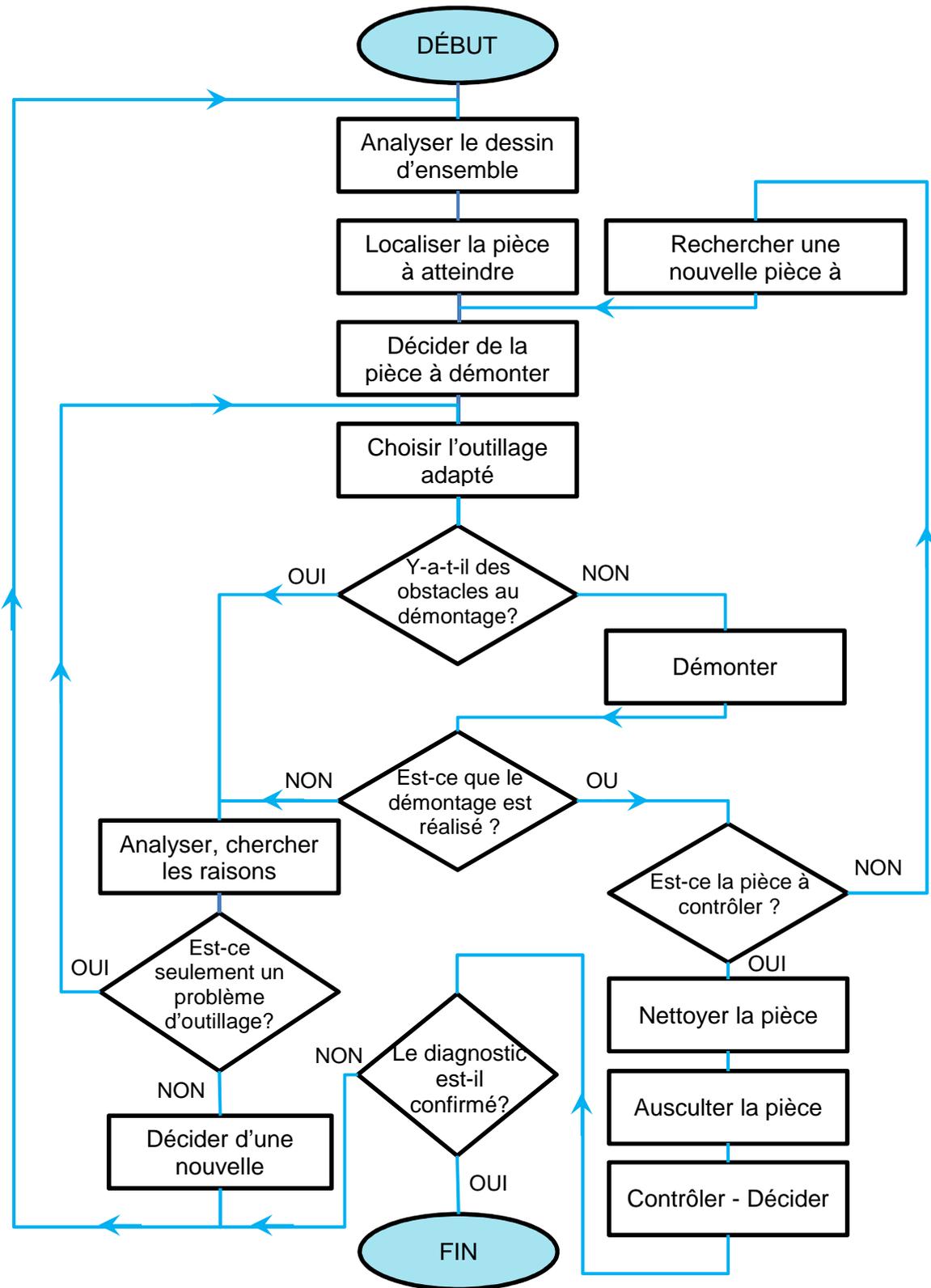


Figure II.9- L'organigramme de démontage [21]

II.6.2. Précautions :

Le montage et le démontage sont des opérations de finition. Ils doivent être effectués par des opérateurs soigneux, observateurs, capables d'initiative et de raisonnement. Pour cela, ces derniers devraient disposer du dossier machine :

- Dessin d'ensemble, précisant la position relative des pièces ou éléments à assembler.
- Nomenclature, indiquant le nom et le nombre des pièces.
- Cahier des charges, spécifiant les conditions de fonctionnement de la machine, la caractéristique des produits fabriqués, la cadence de production.

a. Règles à respecter :

- Éviter l'emploi du marteau et proscrire la clé à molette, utiliser les outils et instruments appropriés.
- Ne jamais forcer sur un élément dont vous n'êtes pas certain de la fonction (sens de dévissage si le pas est à gauche)
- Repérer la position des pièces soit réglées, alignées ou calées.
- Prendre garde à ne pas détériorer les joints et les remplacer s'ils sont abîmés
- Nettoyer les pièces au fur à mesure du démontage et au besoin enlever les bavures provenant d'un matage éventuel.
- Ranger les pièces au fur à mesure et si possible dans des caisses en plastique.
- Replacer les vis en les engageant seulement sur quelques filets. Cette opération facilitera le remontage.

II.6.3. Vocabulaire :

a. Vocabulaire du Démontage :

Mise en Sécurité

Prendre connaissance et appliquer les Procédures de Consignation ou Mise en Sécurité des Personnes et des Biens :

- Apposer la Pancarte arrêt maintenance.
- Consigner le Système (Cadenas, Sectionneurs).
- Purger le Système (Air comprimé, Huile).
- Neutraliser les mouvements en litant les systèmes de transmission (courroies, chaînes, accouplements).

Vidanger : Vider le contenu d'un mécanisme des produits de lubrification usés (Huile, Graisse).

Nettoyer : Oter les impuretés de façon à permettre l'examen d'éléments ou de sous-ensembles et en faciliter la manipulation.

Repérer : Marquer par de légers coups de pointeau la position des éléments entre eux avant démontage ou dépose.

Dévisser : Utiliser un outil de démontage afin de libérer un élément (généralement un élément fileté, vis ou écrou) sans pour cela le déposer.

Déposer : Retirer et poser sur un support un élément ou sous-ensemble Dévisser Déposer Retirer un élément fileté d'un Mécanisme et h:

Chasser : Pousser à l'aide d'un outil approprié un élément ou sous-ensemble hors de son logement.

Extraire : Action d'utiliser un extracteur.

Déplier : Rabattre un élément en tête afin de le ramener à sa position initiale (Rondelles MB servant au réglage du jeu de fonctionnement des Roulements) L'élément déplié est à remplacer pour des raisons de sécurité.

b. Vocabulaire du remontage :

Engager : Replacer un élément ou sous-ensemble sur un Arbre ou dans un Logement

Visser : Actionner un élément fileté pour l'amener en contact avec une autre pièce du Mécanisme sans pour cela bloquer cet élément (Réglage)

Visser : Bloquer -Amener l'élément fileté en contact d'une autre pièce du mécanisme et l'immobiliser pour le freiner (Couple de serrage)

Remettre à Niveau : Introduire un lubrifiant neuf dans le mécanisme en respect tant les Caractéristiques et Quantités préconisées par (e Constructeur

Reposer : Replacer un sous-ensemble dans la position qu'il occupait avant la Dépose

Régler : Mettre au point le Fonctionnement d'un Ensemble ou, sous-Ensemble

Essayer : Faire fonctionner l'Ensemble ou le Sous ale de façon à parfaire les Réglages afin de rendre le Système performant

Contrôler : Vérifier ou Mesurer les performances au s'assurer de la conformité d'un élément (Pièce de Rechange).

II.7. Essais et diagnostics avant le dépannage

II.7.1. Définitions relatives au diagnostic

II.7.1.1. Définitions CEN [1,2]

- Diagnostic de panne : « actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause ».
- Localisation de panne : « actions menées en vue d'identifier le bien en panne au niveau de l'arborescence appropriée ».
- Panne : « état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise ».

II.7.1.2. Autres définitions utiles

Rappel de la définition AFNOR du diagnostic : « identification de la cause d'une défaillance à l'aide d'un raisonnement logique ».

Rappel de la définition de l'expertise : « identification du mécanisme d'une défaillance ».

II.7.2. Méthodologie : les étapes d'un diagnostic

Le diagnostic est la phase terminale de l'analyse de défaillance .Alors que le dépannage est réalisé en temps réel, souvent sous la pression et le stress (durée de l'arrêt), le diagnostic peut être différé, la détection et la localisation étant suffisantes pour dépanner provisoirement [17].

II.7.2.1. Recueil d'informations et observation des symptômes

Nous avons vu précédemment quelles informations préliminaires sont nécessaires à la compréhension d'une défaillance et comment « observer ».

II.7.2.2. Observation des symptômes

Qu'est-ce qu'un symptôme ? C'est un changement d'état physique recueilli dans l'environnement du système. Il est dû à la défaillance du système. C'est un symptôme qui déclenche la détection, parfois la décision de maintenance conditionnelle lorsqu'il s'agit d'une dégradation. Le conducteur du système est naturellement le « témoin » observateur privilégié des symptômes. Soit le système défaillant schématisé dans la Figure II.10:

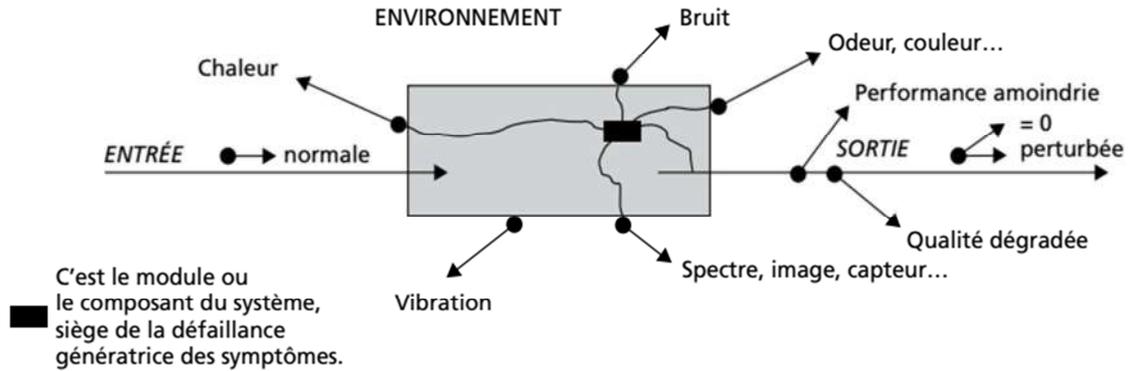


Figure II.10 – Observation des symptômes en fonctionnement [1]

L'observation première se fera dans l'environnement du système. À ces symptômes « en fonctionnement » s'ajoutent tous les éléments (symptômes secondaires) à réunir après défaillance, démontage et analyse fine du composant élémentaire localisé (observation du faciès en cas de rupture, traces de fissurations, faïençage d'une surface, etc.). Des symptômes « indirects » tels qu'une hausse de consommation observée sur une facture d'énergie peuvent être réunis aux observations directes.

II.7.2.3. Au-delà du symptôme...

Un symptôme est un changement d'état physique observable (cinq sens) et/ou mesurable, caractéristique d'une perte de normalité sous l'influence d'un phénomène pathologique $\phi 1$.

Le travail d'observation consiste à comparer ce qui est (observation factuelle) avec ce qui devrait être (normalité, signature, référence). Le système est dit « divergent » lorsque son environnement varie, depuis l'initiation à T0, à la détection T1 et à l'auscultation T2 (écart Δ par rapport à la normalité). Nous sommes alors dans la problématique du « thermomètre médical » à 39 °C. Nous pouvons :

- casser le thermomètre, ce qui correspond au refus de voir un symptôme « dérangentant »

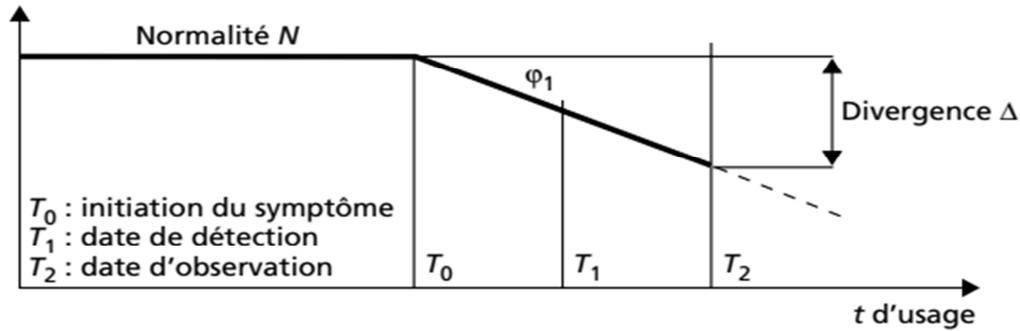


Figure II.11 – Un symptôme est une divergence [1]

II.7.2.4. Localisation du siège de la défaillance

La localisation consiste à enfermer la défaillance dans le plus petit composant possible, à partir de l'arborescence fonctionnelle du système défaillant. Elle permet d'identifier le composant siège de la défaillance, mais non la cause. Cette démarche est dans tous les cas indispensable. Elle est parfois évidente (cas d'une rupture), parfois délicate lorsqu'elle requiert des tests (en électronique) ou une logique structurée à partir de schémas (électriques, hydrauliques). Cette logique de recherche, à laquelle les dépanneurs sont habitués, est facilitée par une analyse fonctionnelle de type SADT qui permet, après avoir validé les entrées (énergies, commandes, matières) et vérifié la perte de fonction en sortie, d'enfermer la défaillance au niveau testé.

II.7.3. La méthode générale de diagnostic

La méthode générale de diagnostic comporte deux étapes essentielles :

- *Inventaire des hypothèses* : Le diagnostic doit identifier les causes probables de la défaillance. L'efficacité du diagnostic doit conduire à hiérarchiser les hypothèses par rapport à deux enterrés : Leur probabilité de se révéler vraies et la facilité de leur vérification.
- *Vérification des hypothèses retenues* : En les prenant dans l'ordre de leur classement chaque hypothèse doit être vérifiée. L'enchaînement de ses vérifications doit être fait jusqu'à la constatation d'un essai bon. La recherche d'une panne dans un circuit électrique ou électronique relève d'un raisonnement logique faisant appel aux étapes suivantes (Figure II.12) :

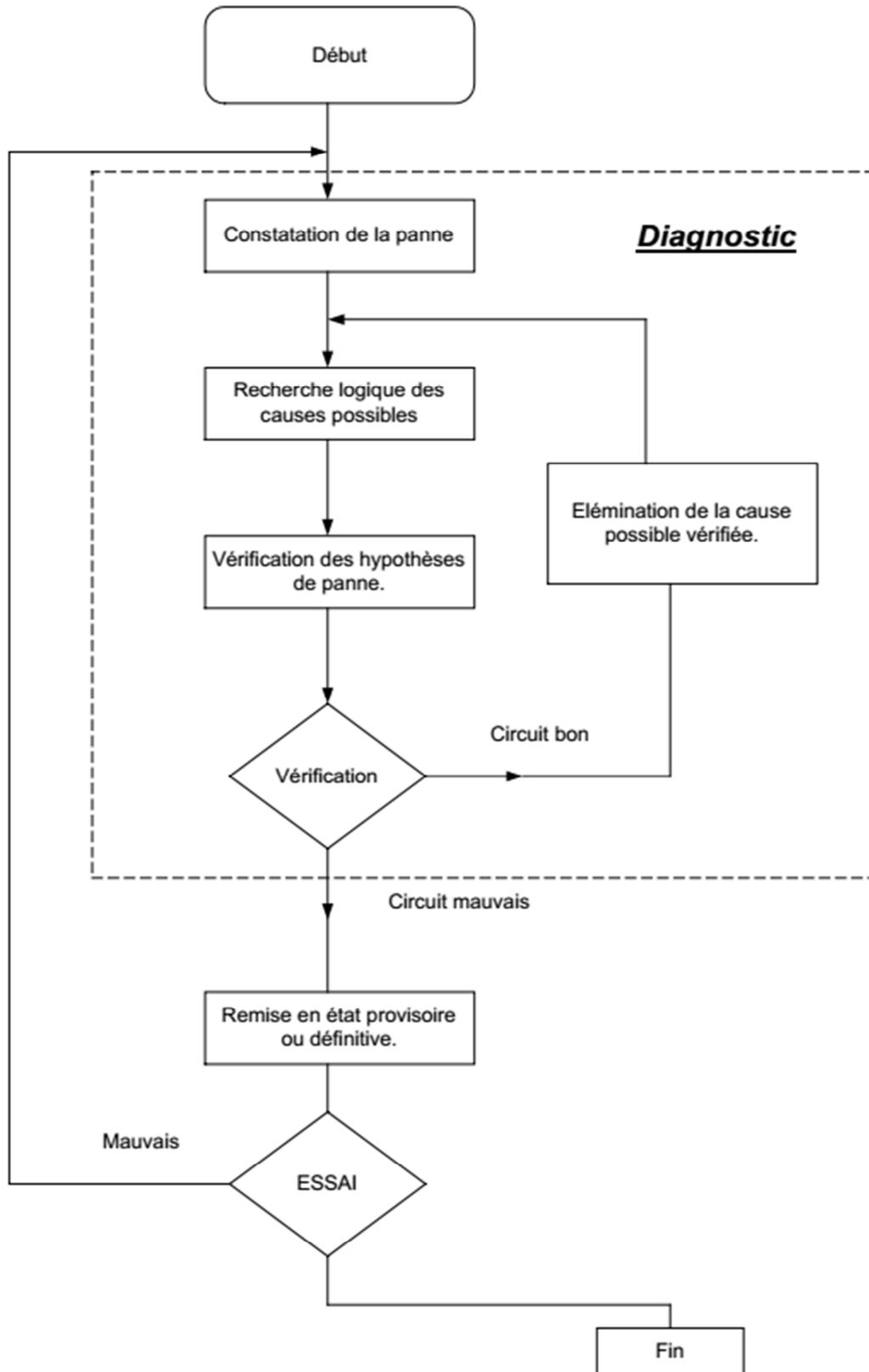


Figure II.12 – Etapes d’un diagnostic [22,23]

II.7.4. Exemple d'un diagnostic

Soit un équipement entraîné par un moteur asynchrone à cage qui est en panne. La nature de la panne est : Le moteur ne démarre pas.

On propose un inventaire des hypothèses :

- Interrupteur général ouvert ;
- Rupture d'un fil de ligne ou fusion des fusibles ;
- Relais thermique non armé ;
- Rupture interne d'une phase du stator ;
- Circuit du rotor coupé ;
- Couple résistant trop élevé ;
- Court-circuits dans le stator ou rotor ;
- Coussinets grippés, ou frottement du rotor sur le stator ou corps étranger dans l'entrefer du moteur, etc.

Ces hypothèses doivent être hiérarchisées selon leur probabilité de se révéler vraies et leur facilité de vérification et, en les prenant dans l'ordre du classement, chaque hypothèse doit être vérifiée.

Les vérifications doivent être enchaînées jusqu'à la constatation d'un essai bon (Figure II.13).

Remarque : Si après le réarmement du relais l'essai est mauvais on passe à l'hypothèse suivante jusqu'à la constatation d'un essai bon. Ici on a supposé que l'essai est bon après le réarmement du relais.

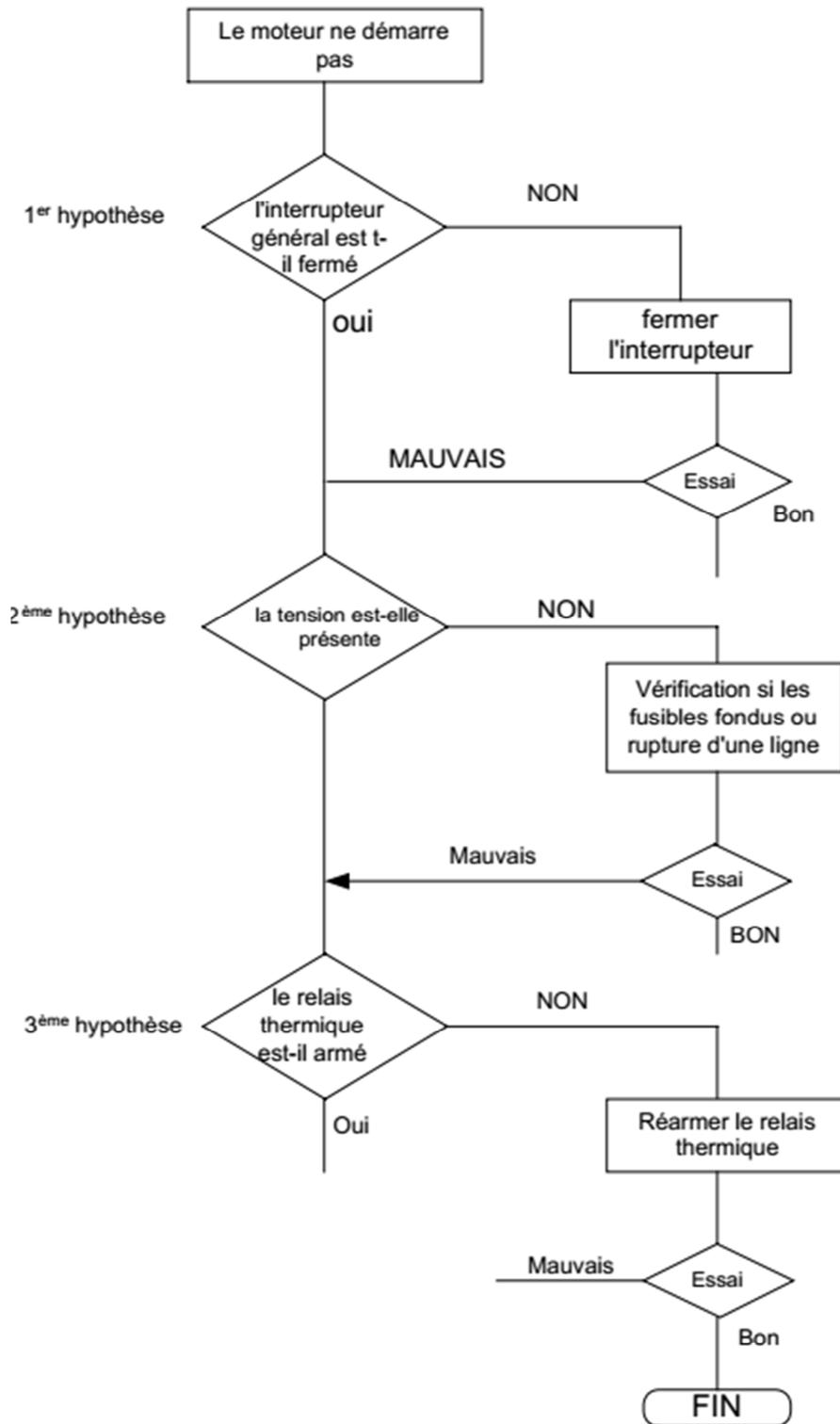


Figure II.13 – Vérification des hypothèses pour le diagnostic d’une panne [22,23]

CHAPITRE III

Dépannage des différentes parties des machines électriques

III.1. Introduction

Un moteur électrique correctement entretenu contribuera grandement au fonctionnement continu et au succès d'une usine. Le coût des temps d'arrêt imprévus étant élevé, l'entretien régulier des moteurs est devenu l'une des principales priorités des usines. La perte d'un moteur peut entraîner une réduction de la fiabilité d'un système, la détérioration d'un système ou la fermeture d'une usine.

Les données de la plaque signalétique comprennent la puissance nominale, la vitesse, la tension et le facteur de service, s'ils sont différents de 1,0. Le facteur de service est un multiplicateur qui peut être appliqué à la puissance des moteurs conçus pour gérer les surcharges périodiques.

III.2. Dépannage de la partie mécanique et de la partie électrique d'une machine électrique

III.2.1. Analyse de l'état réel de l'équipement

Pour analyser l'état réel de l'équipement le dépanneur doit faire des vérifications préliminaires, telles que :

a. Présence des sources d'alimentation

On mesure la valeur de la tension aux bornes des circuits de puissance et de commande pour s'assurer que la tension correspond bien à la tension nominale de la machine.

b. Etat des protections et des organes de commande

On vérifie les éléments de protection tels que fusibles, relais thermiques, disjoncteurs, etc. (calibrage, réglage et enclenchement). Dans le circuit de commande on vérifie l'état des contacteurs et leur fonctionnement.

c. Vérifications mécaniques

La plus simple vérification est de faire tourner l'arbre de la machine à la main pour savoir si la rotation est facile et qu'il n'y a pas de blocage mécanique.

On peut utiliser nos organes de sens pour détecter certains défauts, comme par exemple :

- **Vérification visuelle** : on peut voir la machine électrique à courant alternatif et son mécanisme d'entraînement pendant qu'il fonctionne pour détecter les

signes d'oscillation (vibrations et bruits). Une usure des paliers et un mauvais alignement peuvent être à l'origine d'une défaillance.

- **Vérification tactile** : un moteur ou génératrice doit être chaud(e) mais pas brûlant(e). La chaleur excessive provient d'un problème de refroidissement des bobinages, des engrenages encrassés, une courroie trop tendue, une manque d'huile au niveau des paliers, etc.
- **Vérification auditive** : si on entend un grondement, c'est peut être qu'un palier est usé ou des pièces mal lubrifiées produisent des bruits aigus.
- **Vérification olfactive** : Un moteur (une génératrice) défectueux (se) dégage une odeur que l'on peut sentir. Cette odeur peut provenir d'un échauffement de l'isolant de la bobine ou d'une friction des pièces au niveau des paliers. Un moteur grillé dégage une odeur acre de plastique carbonisé.

d. Vérifications électriques

Si le problème n'est pas apparent, on doit réaliser un essai de mise en marche pour prendre note des symptômes et localiser les points tests.

Les vérifications sont faites à l'aide des instruments de mesure : le multimètre, l'ohmmètre, le grognard, le tachymètre, l'accéléromètre (pour les vibrations), etc.

On peut mesurer, par exemple, la tension d'alimentation, le courant absorbé, le courant d'excitation, la vitesse de rotation, les résistances des bobines, les résistances par rapport à la masse, les vibrations, etc.

Les relevés de ces mesures sont ensuite comparés aux valeurs de référence qui sont mentionnées dans la documentation technique donnée par le constructeur. Les valeurs mentionnées dans les spécifications techniques et les caractéristiques électriques et mécaniques de la machine servent au dépanneur pour détecter les écarts et savoir la cause de la panne.

III.2.2.Exemple de dépannage de la partie mécanique/ électrique d'un moteur à courant continu

a. Le moteur ne démarre pas

Si le moteur ne démarre pas, vérifier en premier si l'alimentation est adéquate à l'unité de commande. Si l'alimentation s'avère appropriée à la boîte de commande et que le moteur ne

démarré pas lorsqu'on active l'interrupteur, le problème provient probablement d'un circuit ouvert quelque part dans le circuit d'induction.

Ce circuit inclut le bobinage de l'induit, les champs (en séries et pôles de commutation si le système en comporte), les bornes du moteur et certaines parties du circuit de commande du moteur. Pour déterminer si le problème relève du moteur lui-même ou du circuit de commande,

Appuyer sur le bouton de démarrage et mesurer la tension aux bornes et celle de l'induit et du champ dérivé et ce, à l'aide d'un voltmètre CC. Si la tension voulue est présente, le problème réside dans le moteur. Une lecture de zéro ou d'un chiffre très bas indique qu'il y a quelque chose d'anormal dans le circuit de commande [24].

b. Problème dans le moteur

Lorsqu'on détermine que le problème provient du moteur, examiner d'abord les brosses. S'assurer qu'elles soient disposées correctement dans le collecteur et qu'aucun fil de soit desserré. Le moteur ne démarre pas lorsque le contact des brosses ou des bornes de brosses se révèle faible. Remplacer les brosses trop courtes ou endommagées.

Une fois les brosses bien en place, appuyer sur le bouton de démarrage. Si le moteur ne fonctionne toujours pas, débrancher la source d'alimentation du moteur. Pour assurer la continuité, utiliser un ohmmètre afin de vérifier le circuit de l'induit. Si l'ohmmètre indique une lecture à l'infini, cela signifie que le circuit est ouvert et que le moteur ne démarrera pas.

Une connexion ouverte dans le circuit de l'induit peut être causée par [25] :

- Une bretelle brisée ou débranchée entre les bobines.
- Un circuit ouvert dans l'entre pôles ou dans l'enroulement de bobine.
- Des bobines d'induit ouvertes.

c. Problème dans le circuit de commande

Lorsqu'on a obtenu zéro ou très peu de tension aux bornes du moteur au moment d'activer le bouton de démarrage, on sait d'emblée que le circuit de commande présente un problème. Ce circuit comprend le relais thermique, les résistances de départ, les contacteurs, des fusibles et l'alimentation principale qui relie le moteur à l'unité de commande [26].

N'importe quelle coupure dans le circuit empêchera le moteur de démarrer.

Il y a plusieurs points à vérifier quand on soupçonne un problème dans le circuit de commande :

- Relais de surcharge : S'assurer qu'il ne soit pas déclenché.
- Les résistances de départ : Vérifier la présence d'un circuit ouvert.
- Contacteurs : Vérifier qu'ils soient bien fermés.
- Fusibles : S'assurer qu'ils ne soient pas brûlés.
- Alimentation de départ : Vérifier la continuité.
- Connexions : S'assurer que chacune d'elles soit bien fixée.

Problème 1 : déclenchement du relais de surcharge ou fusibles qui sautent au démarrage du moteur

Déclencher le relais de surcharge ou sauter les fusibles lorsqu'on démarre un moteur sont des problèmes très courants associés à une défaillance de moteur. Ces deux phénomènes se produisent lorsque le courant s'avère trop élevé au démarrage et ce, pour différentes raisons.

- Bobinages mis à la terre.
- Bobinage d'induit court-circuité.
- Bobinages défectueux.
- Problèmes mécaniques du moteur ou des pièces d'équipement menées par celui-ci.
- Court-circuit prématurés dans les résistances de démarrage.

Problème 2 : le moteur tourne à une vitesse supérieure au nombre de révolutions nominal

Un moteur qui fonctionne de façon satisfaisante peut soudainement commencer à tourner à plus haute ou plus basse vitesse que le nombre de tours pour lequel il est prévu. S'il tourne à une vitesse plus élevée à pleine charge, le problème réside dans l'alimentation de tension ou dans le bobinage du moteur. Afin de localiser le problème, mesurer l'induit et les tensions des champs dans les bornes du moteur. La vitesse du moteur augmentera si la tension dans l'induit s'avère plus élevée que celle indiquée. La vitesse peut aussi être élevée si la tension appliquée au champ est plus basse que la valeur montrée sur la plaque signalétique.

Si la tension appliquée concorde avec la capacité du moteur et que le moteur tourne encore à un plus grand nombre de tours que sa capacité, il y a une défectuosité dans le bobinage. Le problème pourrait provenir des bobines mises à la terre, court-circuitées ou encore d'un circuit ouvert dans le champ des enroulements. N'importe quelle de ces situations pourrait provoquer une augmentation de vitesse [27].

Problème 3 : le moteur tourne à une vitesse inférieure à celle indiquée

Si le moteur tourne à bien plus basse vitesse que sa capacité, le problème se trouve probablement dans l'alimentation de tension ou dans les connexions du circuit de l'induit.

Mesurer la tension de l'induit et la comparer à la valeur indiquée sur la plaque. Une tension réduite de l'induit fera diminuer la vitesse du moteur. Si la tension appliquée à l'induit concorde avec la capacité du moteur et que le moteur continue de tourner à une vitesse inférieure à celle indiquée, le problème se traduit par une grande résistance dans le circuit de l'induit.

Ce problème peut être décelé en vérifiant d'abord tous les branchements du circuit de l'induit pour vérifier la présence d'une haute résistance dans les bretelles, provoquée par des connexions desserrées. Vérifier la présence de points chauds et de décoloration de l'isolation autour des connexions.

Ensuite, s'assurer que tous les contacteurs dans le régulateur offrent un bon contact lorsqu'ils sont fermés.

Les contacteurs qui peuvent court-circuiter les résistances de démarrage doivent être fermés pendant le fonctionnement. Dans le cas contraire, ou s'il y a des bretelles à résistance élevée n'importe où dans le circuit de l'induit, le moteur tournera plus lentement que sa vitesse nominale. Si la vitesse du moteur varie continuellement sous une tension constante (ex. : l'induit ralentit, puis accélère, etc.), le problème réside dans le bobinage de l'induit. Ce type de défaillance indique des bobines court-circuitées. Pour déceler ce problème, suivre la méthode décrite plus tôt dans Problème : Déclenchement du relais de surcharge ou fusibles qui sautent au démarrage du moteur [24].

Problème 4 : étincelles sous les brosses

Des étincelles sous les brosses indiquent des problèmes de commutation, cause fréquente de défaillance des moteurs à courant continu. Même si des étincelles peuvent se voir produites par plusieurs facteurs considérés non reliés entre eux. Des problèmes mécaniques plutôt qu'électriques en sont généralement la cause.

- Pour isoler la source d'étincelles, il faut d'abord se pencher sur les problèmes mécaniques associés aux brosses.
- S'assurer qu'aucune brosse ne soit manquante et que toutes soient bien installées dans le collecteur.
- Vérifier que toutes les brosses principales soient intactes et bien fixées au support. Vérifier la pression des ressorts de brosses.

- S'assurer que les brosses soient bien ajustées et qu'elles se déplacent librement dans leur boîtier. Elles ne doivent pas être trop serrées ni desserrées.
- Vérifier que le support de brosses ne soit pas desserré.

Si les brosses semblent fonctionner de façon satisfaisante, le problème peut provenir du collecteur. Un collecteur mal entretenu peut provoquer des étincelles, car les brosses peuvent « sautiller » sur sa surface. Inspecter soigneusement le collecteur, en s'assurant qu'aucun segment ne ressort, qu'il n'y a pas de segment dont les parties se trouvent aplaties et qu'il n'y a pas une quantité élevée de mica. S'assurer qu'il n'y ait aucun corps étranger entre les barres du collecteur. Si l'excentricité du collecteur est excessive ou que les segments sont trop brûlés et rudes, on doit l'usiner à l'aide d'un outil acéré pour le rendre lisse.

Des vibrations excessives imputables à un induit déséquilibré ou à une pièce d'équipement menée par le moteur peuvent aussi provoquer le sautellement des brosses et produire des étincelles. Il est possible de déterminer si le moteur ou l'équipement mené est défaillant en laissant le moteur tourner en étant déconnecté.

Des étincelles peuvent également être dues à des roulements excessivement usés. Des roulements usés vont déplacer le bâti de l'induit, créer des entrefers inégaux et des étincelles sous les brosses.

Problème 5 : moteur nouvellement installé qui ne démarre pas ou tombe en panne peu de temps après son installation

Si un moteur récemment réparé tombe en panne la première fois qu'il est remis en service, vérifié avant tout l'unité de commande et les connexions de l'alimentation principale. L'unité de commande doit fournir la tension appropriée et fonctionner correctement. S'assurer que les connexions des conducteurs soient correctes et bien serrées. Si ces vérifications n'indiquent aucune défaillance, suivre les procédés de dépannage décrits plus tôt (y compris l'inspection du moteur et la vérification de la résistance de l'isolation du bobinage) [28].

Problème 6 : moteur nouvellement installé qui tourne à un régime plus élevé

Parfois, un moteur nouvellement installé tournera à plus haute vitesse que sa capacité. Un champ aux polarités inversées peut faire que les moteurs bobinés au composé tournent au-delà de leur capacité nominale.

Pour corriger la situation, interchanger les conducteurs (S1 et S2). Un moteur CC avec un shunt à double tension qui est connecté en série pour la haute tension et en parallèle pour la

basse tension peut aussi tourner à plus haut régime que sa capacité si les champs sont mal branchés. Pour ramener la vitesse du moteur à la normale, reconnecter le shunt en fonction d'une basse tension.

Un induit mal bobiné peut également faire tourner le moteur à une vitesse supérieure à sa capacité. Ceci arrivera si le nouveau bobinage comporte moins de tours que l'ancien. Une telle erreur est plus fréquente dans les induits de plus petite taille, car ces derniers présentent un plus grand nombre de tours que les plus grandes versions [28].

Problème 7 : moteur nouvellement installé qui tourne en sens inverse.

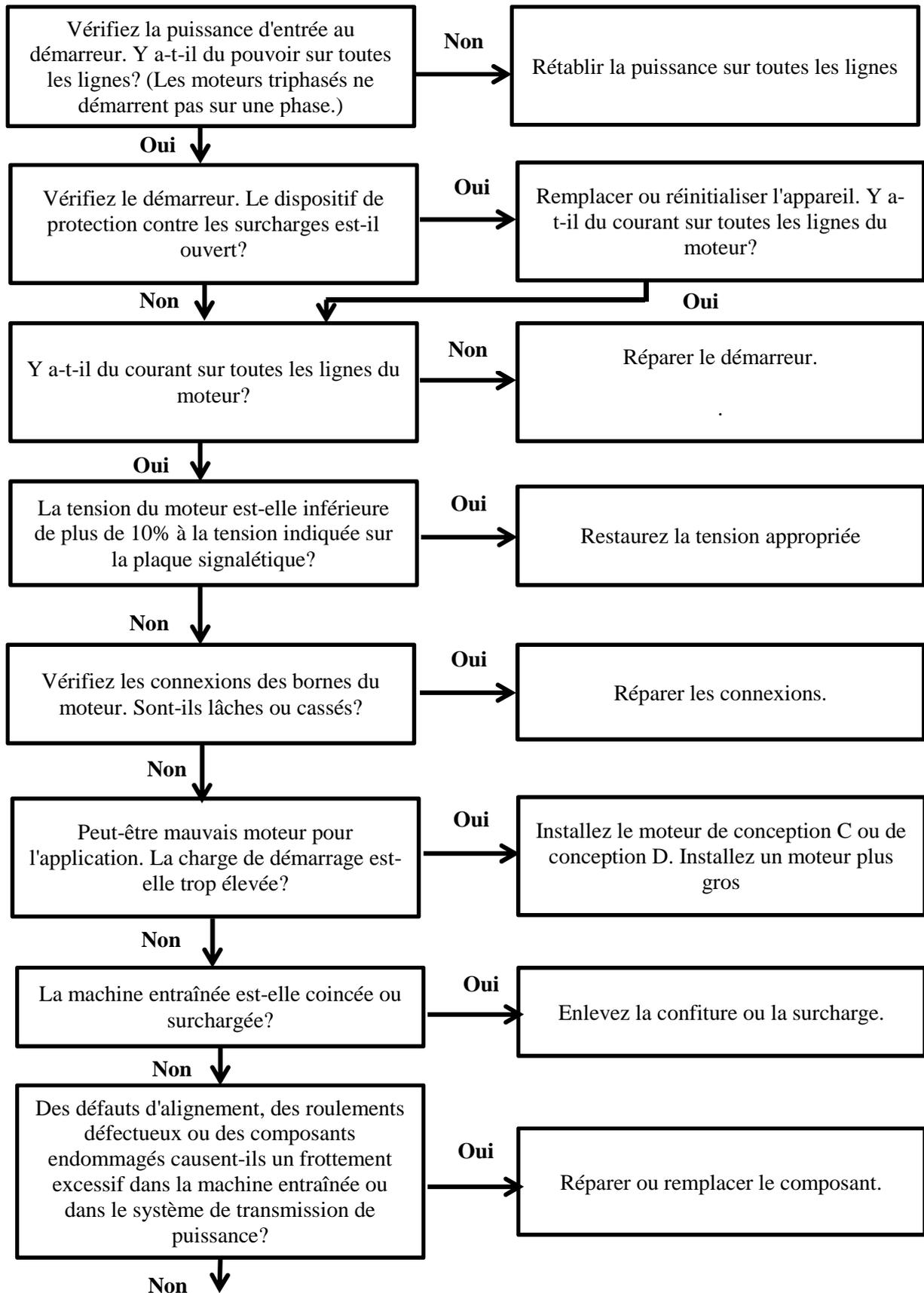
Après réparation d'un moteur à courant continu, on s'aperçoit à l'occasion que son sens de rotation a été inversé. Une façon simple de corriger consiste à interchanger les conducteurs A1 et A2 du circuit de l'induit.

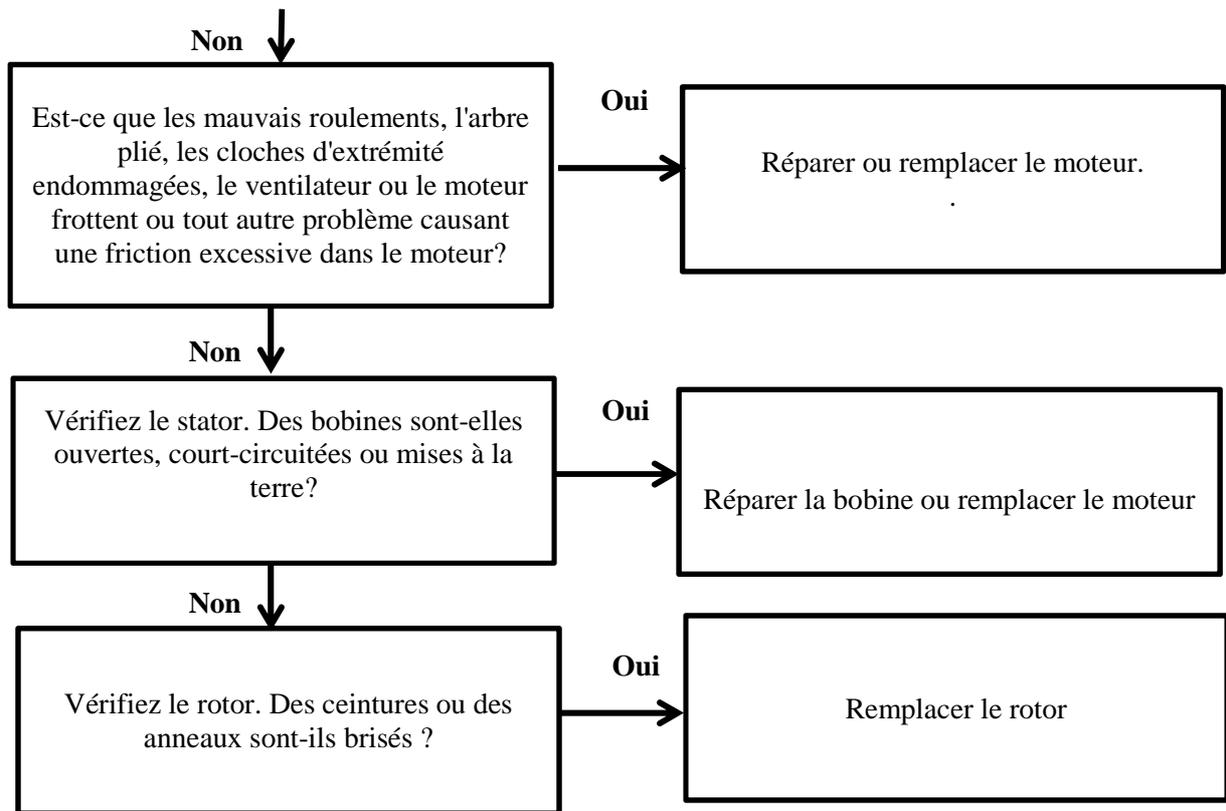
III.2.3.Exemple de dépannage de la partie mécanique/ électrique d'un moteur à courant alternatif :

La Figure III.1 illustre un organigramme de dépannage qui fournit des méthodes logiques, étape par étape, pour identifier et corriger les problèmes d'une machine à courant alternatif [28,29].

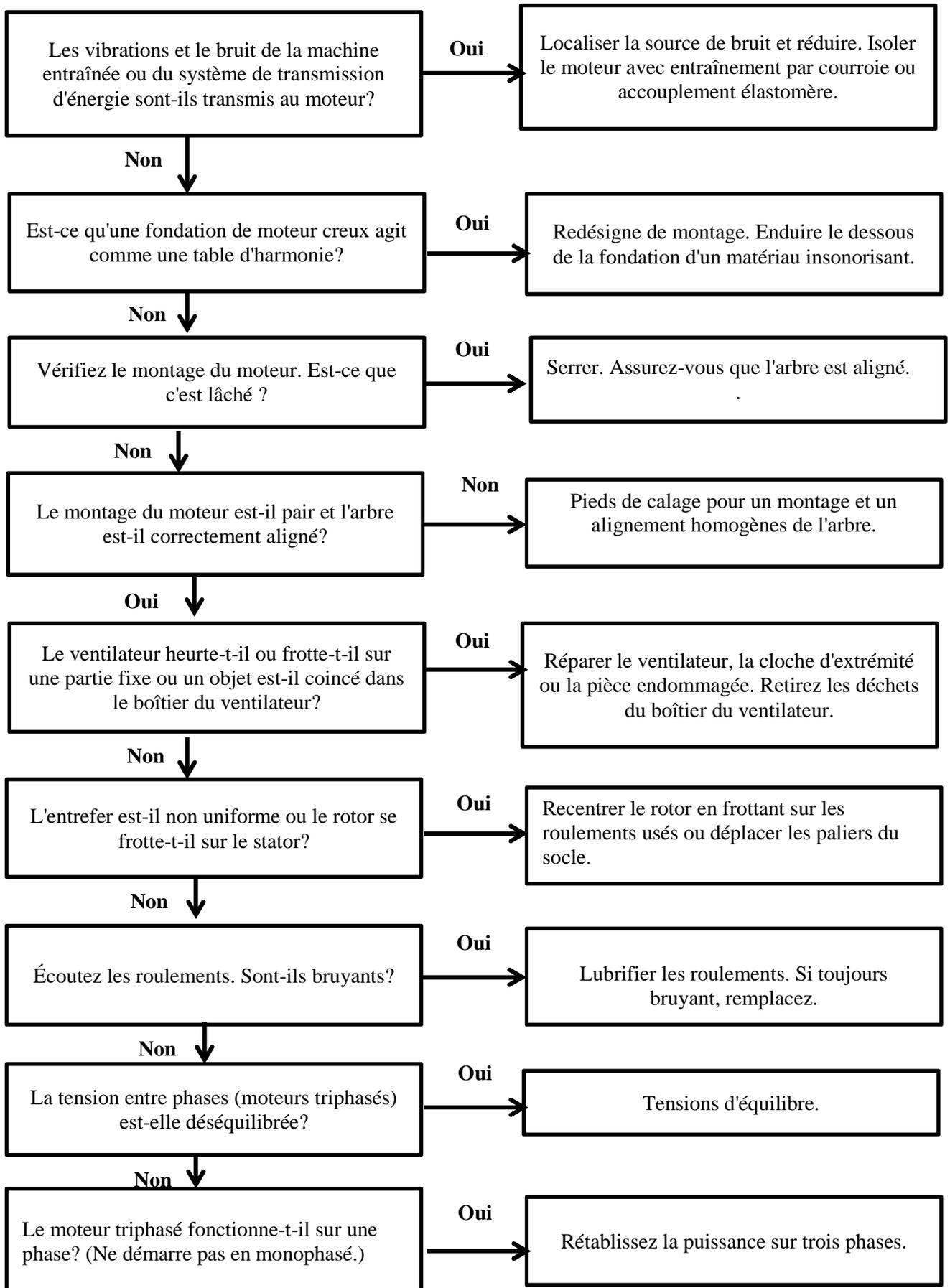
Attention : Les parties internes d'un moteur peuvent être au potentiel de la ligne même s'il ne tourne pas. Débranchez toute l'alimentation du moteur avant d'effectuer toute opération d'entretien pouvant nécessiter le contact avec des pièces internes.

Problème 1: le moteur ne démarre pas ou le moteur accélère trop lentement

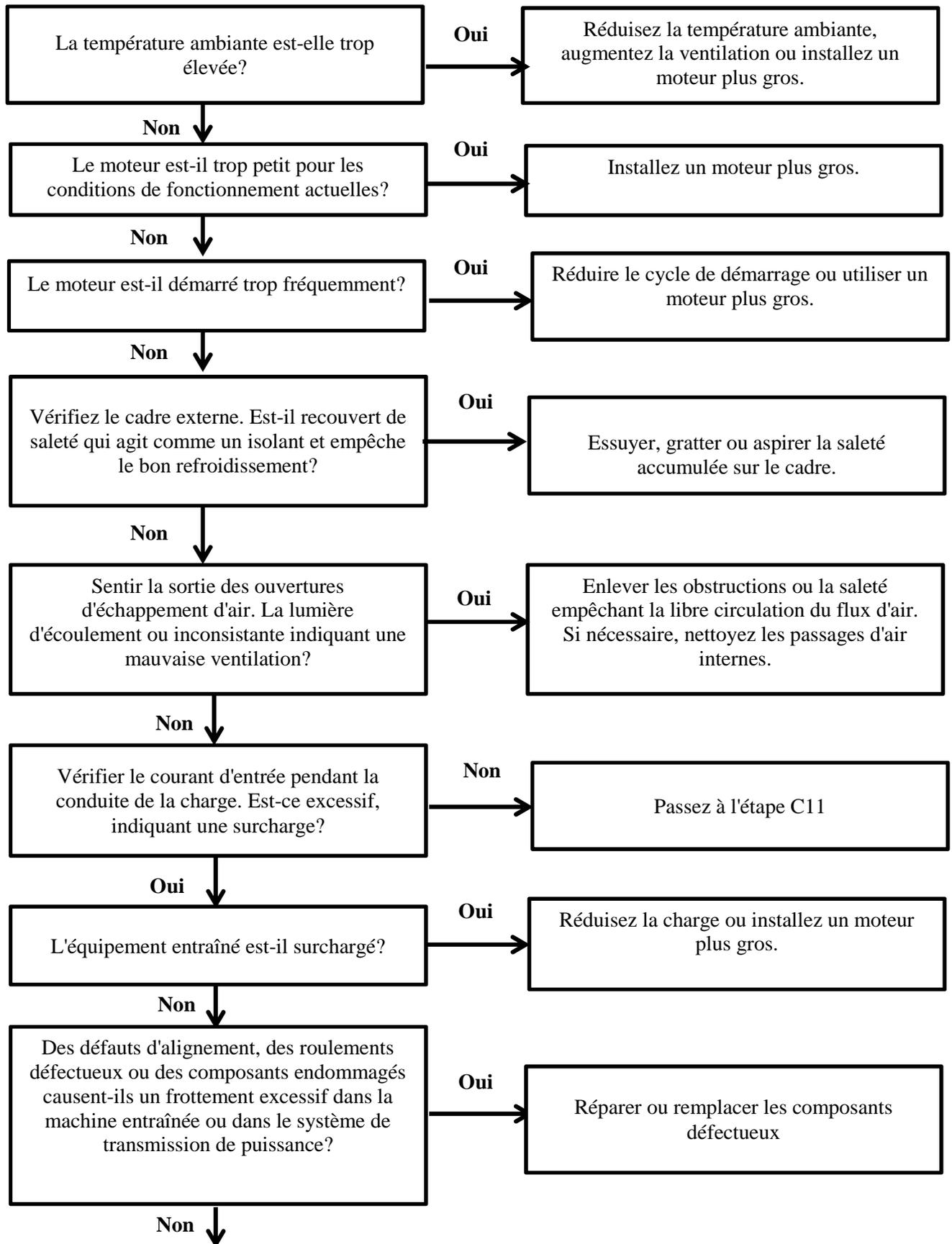


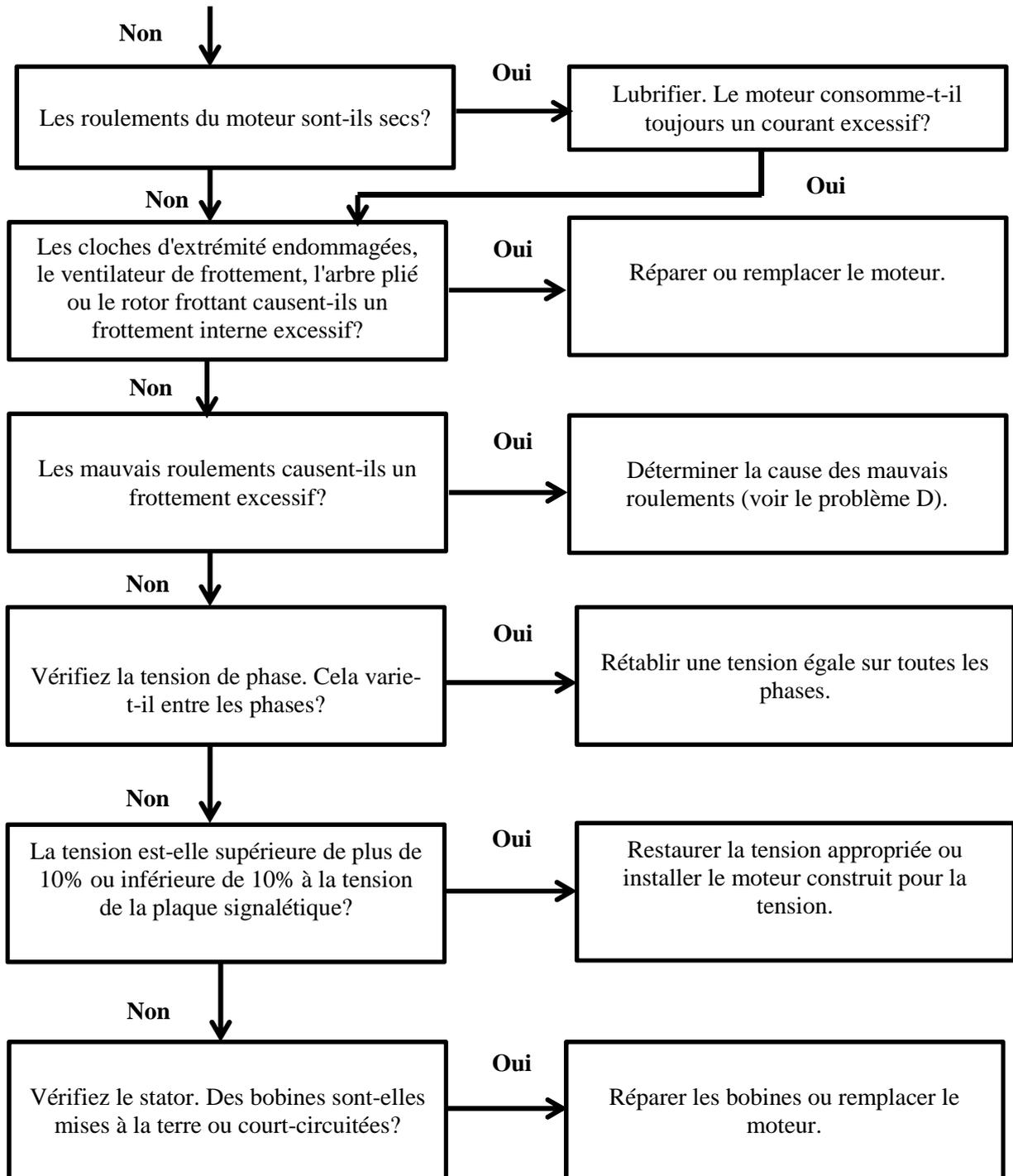


Problème 2: Le moteur tourne bruyant



Problème 3: Surchauffe du moteur





Problème 4: Les roulements du moteur sont chauds et bruyants

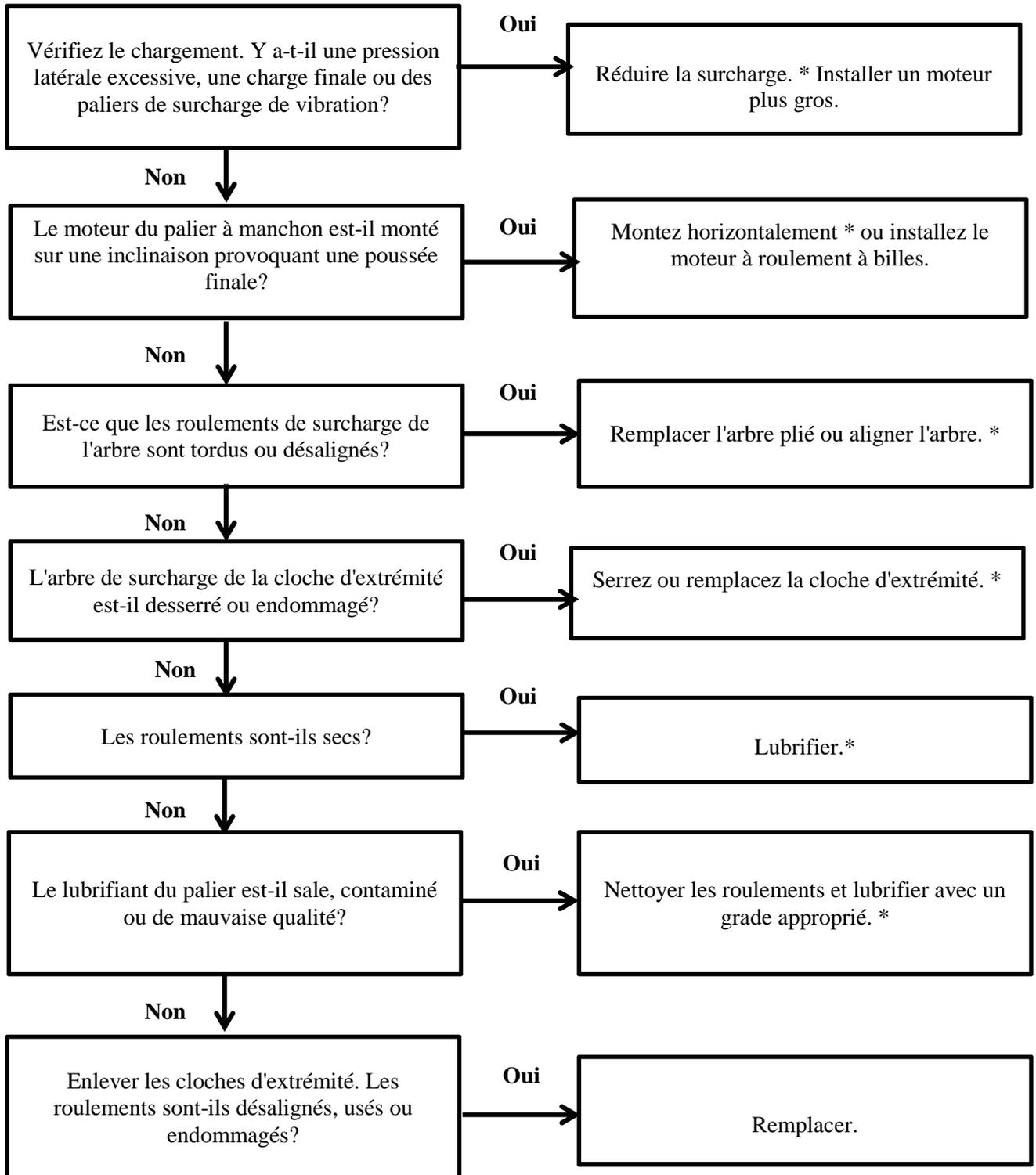


Figure III.1 - Organigramme de dépannage d'une machine à courant alternatif [28,29]

*** Les roulements peuvent avoir été endommagés. Si le moteur est toujours bruyant ou chaud, remplacez les roulements.**

III.3. Travaux de montage et méthode d'essais après dépannage

Le remontage se fait en commençant par la dernière opération de démontage, puis serrer toutes les parties démontées et faire tourner le rotor à la main pour s'assurer de sa rotation libre.

Les machines électriques qui arrivent en réparation peuvent être de différentes puissances, versions et conceptions.

Pour bien comprendre cette étape, un exemple de maintenance et de dépannage d'un moteur asynchrone à cage a été monté et démonté

III.3.1. Démontage et remontage

L'ordre de démontage de chaque machine est déterminé par sa construction et par le souci de réutiliser au maximum les pièces en bon état. Le volume de démontage est déterminé par le volume et la nature des travaux de réparation à réaliser.

Comme exemple on peut prendre le démontage et le remontage d'un moteur asynchrone triphasé

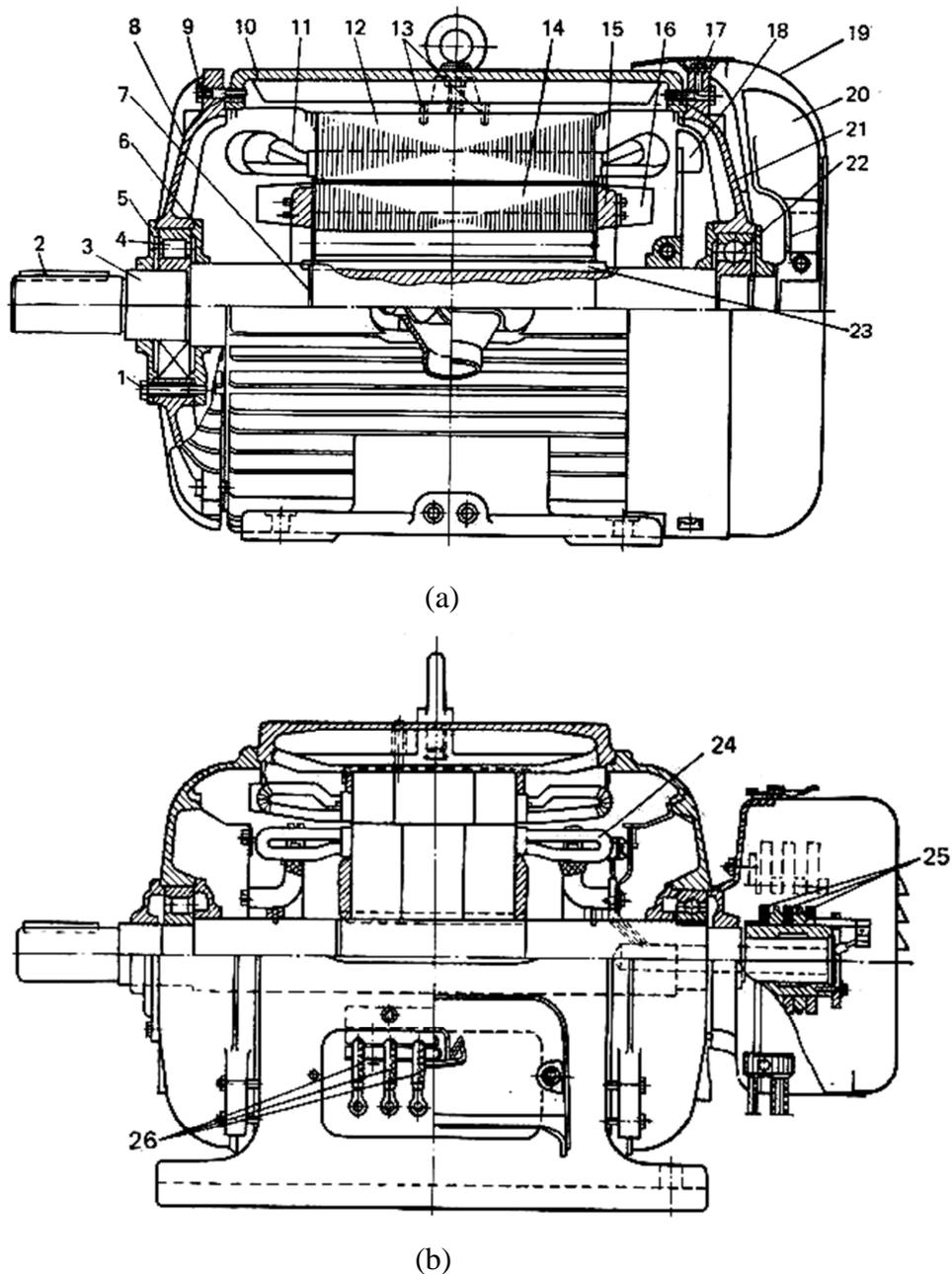


Figure III.2 - Moteurs asynchrones triphasés de la série AO2 à rotor en court-circuit (a) et bobiné (b) :

1,9,17 – Boulons; **2, 23** – Clavettes; **3** – Arbre du rotor; **1, 22** – Roulements à rouleaux et à billes; **5, 6** – Couvercles extérieur et intérieur du roulement; **7** – Bague d’arrêt; **8, 21** – Paliers flasques; **10** – Culasse; **11** – Enroulement statorique; **12, 14** – Noyaux (carcasses) statorique et rotorique; **13** – Vis de fixation du noyau statorique sur la culasse; **15** – Couronne du rotor; **16** – Ailette du ventilateur; **18, 20** – Ventilateurs; **19** – Enveloppe du ventilateur; **24** – Enroulement de phase rotorique; **25** – Bagues d’alimentation du rotor; **26** – Sorties de l’enroulement statorique.

Les opérations du démontage sont comme suit :

- Repérer les flasques par rapport à la carcasse du moteur.
- Enlever le capot (19) du ventilateur extérieur (20).
- Enlever le ventilateur (20).
- Dévisser les boulons de fixation des paliers flasques (8) et (21) sur la culasse (10).
- Dévisser les boulons de fixation des couvercles (5) et (6) du roulement (4) du flasque arrière (8).
- Déposer le flasque palier arrière (8) en le détachant de la culasse (10) par de légers coups de marteau portés à travers une cale de bois ou d'aluminium.
- Préparer le rotor à l'extraction de l'alésage du stator en frappant légèrement sur le bout de l'arbre (3) avec un marteau à travers une cale.
- Faire sortir le rotor une fois qu'il est déplacé vers le palier flasque avant (21).
- Déposer le palier flasque avant du roulement emmanché sur l'arbre du rotor, après avoir dévissé les boulons de fixation des couvercles du roulement.

En cas de démontage d'une machine à rotor bobiné on enlève d'abord l'enveloppe des bagues d'alimentation, ensuite les balais et les roulements de l'arbre à l'aide d'un arrache-roulement.

Le remontage se fait en commençant par la dernière opération de démontage, puis serrer toutes les parties démontées et faire tourner le rotor à la main pour s'assurer de sa rotation libre.

III.3.2. Réparation et remplacement de composants

Une fois la machine démontée et les éléments contrôlés au cours de démontage certains éléments peuvent présenter des défaillances et doivent être remplacés par leurs équivalents tels que : roulements, ventilateur, condensateurs de démarrage ou antiparasite, balais, etc.

D'autres doivent être réparés, par exemple : collecteur, bobines du stator, bobines polaires, bagues collectrices, garniture de frein.

III.3.3. Réglage de nouveaux paramètres

Après le remplacement ou la réparation certains paramètres doivent être réglés de nouveau.

III.3.4. Vérification du fonctionnement de l'équipement après dépannage

Avant de procéder à l'essai électrique de l'équipement il faut s'assurer que toutes les connexions dans les circuits de puissance et de commande sont parfaitement serrées. Cette opération est importante car une connexion mal serrée peut provoquer différents incidents : échauffement anormal, chute de tension, court-circuit.

a. Vérification du circuit de puissance

Cette vérification, qui se fait l'équipement hors tension, permet de s'assurer que le câblage du circuit de puissance est conforme au schéma. Dans la majorité des cas, l'opérateur ne disposant pas des moteurs, elle est effectuée à l'aide d'une lampe test.

b. Vérification du circuit de commande (contrôle fil à fil)

Cette vérification, qui se fait généralement l'équipement sous tension, a pour but de s'assurer que le câblage du circuit de commande est conforme au schéma. Elle permet également de contrôler le bon fonctionnement des appareils.

Afin de procéder aux essais en toute sécurité, il est indispensable de séparer totalement, pendant toute la durée de ces essais, le circuit de puissance du circuit de commande.

c. Vérification de l'organe d'entraînement (moteur)

Après son démontage on vérifie l'état des bobines, des bagues collectrices, des roulements et après le remontage on vérifie le serrage de toutes les parties démontées.

On fait tourner à la main l'arbre du moteur pour s'assurer de sa rotation libre. Lors de son alimentation à partir du réseau on vérifie le bruit et la vibration et s'il n'y a pas de chaleur excessive ou une odeur étrange.

d. Essai d'ensemble

Le raccordement de la ligne d'alimentation ainsi que celui de tous les circuits extérieurs de « puissance » et de « commande » étant exécutés conformément au schéma il est possible de procéder à l'essai d'ensemble de l'équipement.

L'essai de l'ensemble consiste à stimuler toutes les phases de fonctionnement de la machine ou du processus dans l'ordre où elles doivent se réaliser et à contrôler les asservissements et les sécurités.

Le but de l'essai de l'ensemble est de s'assurer que le fonctionnement de l'équipement est celui décrit dans le cahier des charges. Il permet également de vérifier les incidents d'une fausse manœuvre dans la conduite de la machine.

Remarque : Lors des vérifications le dépanneur doit utiliser des outils à main isolés et éventuellement des gants isolants, des lunettes de protection, des chaussures à semelle isolante. Il doit baliser la zone pour assurer la sécurité

CHAPITRE IV

Généralités sur la maintenance assistée par ordinateur (MAO)

IV.1. Introduction

Les installations et les équipements industriels devenant de plus en plus complexes et les coûts d'intervention sur le site étant de plus en plus élevés, différents fabricants ont mis au point des logiciels de Maintenance Assistée par Ordinateur (MAO). Le but principal de ces logiciels de MAO est d'économiser l'énergie gaspillée par une maintenance préventive systématique tout en réduisant les opérations de maintenance correctives.

Le logiciel de MAO indique journallement aux responsables de l'entretien de l'installation ou de l'équipement sur quelles parties ils doivent intervenir, en leur précisant les outils et les pièces de rechange nécessaires et en leur donnant les consignes et procédures à appliquer pour la maintenance et l'entretien.

Grâce à la MAO, le responsable de l'entretien dispose de statistiques détaillées sur son activité (travaux effectués, temps passé, écarts budgétaires, etc.) et sur l'installation (fiabilité, coûts d'entretien, etc.). Il dispose aussi de toutes les informations nécessaires à la préparation de son budget annuel, ou au remplacement de certains équipements.

IV.2. Le modèle itératif de la gestion

Le modèle itératif « **Observer, Réfléchir et Agir** », toujours recommencé, est un modèle de gestion « **naturel** », puisque calqué sur le modèle de fonctionnement de l'homme. Il est important de noter qu'il contient une potentialité de progrès, à partir de l'observation des résultats de l'action [1].

IV.3. Application à la gestion du service maintenance

La Figure IV.1 illustre la place omniprésente de la « **base de données** » qu'est une GMAO, ce qui ne doit pas faire oublier que les phases « productives » sont l'action, la connaissance et la décision ! Les structures d'analyse des informations puis de prise de décisions sont réparties entre le bureau des méthodes, le bureau d'ordonnancement et de logistique et la direction du service, en fonction de l'organisation en place.

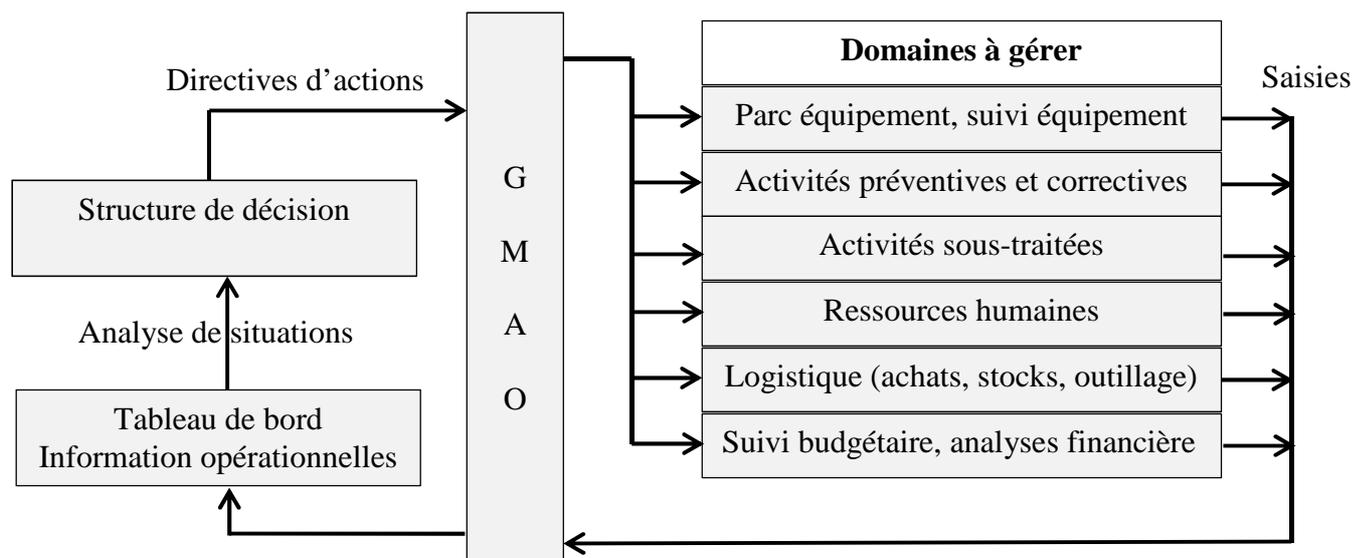


Figure IV.1 - Gestion itérative de la maintenance (avec support d'une GMAO) [10]

IV.4. Qu'est-ce qu'un progiciel de GMAO ?

IV.4.1. Définition 1

Maintenance assistée par ordinateur, leur définition : « Un système informatique de management de la maintenance est un progiciel organisé autour d'une base de données permettant de programmer et de suivre sous les trois aspects techniques, budgétaire et organisationnel, toutes les activités d'un service de maintenance et les objets de cette activité (services, lignes d'atelier, machines, équipements, sous-ensembles, pièces, etc) à partir de terminaux disséminés dans les bureaux techniques, les ateliers, les magasins et bureaux d'approvisionnement » [1].

IV.4.2. Définition 2

La GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) est une méthode de gestion effectuée à l'aide d'un progiciel de GMAO en vue de gérer les tâches de maintenance d'une entreprise, d'une collectivité territoriale ou d'une administration. Si l'une des premières fonctions d'une GMAO est d'apporter une assistance automatisée à la gestion de la maintenance dans une entité, la GMAO peut aussi être utile dans d'autres secteurs de l'entreprise ou l'administration. Il peut en être ainsi dans des domaines tels que la production ou l'exploitation des équipements ou encore pour les services de gestion financière notamment, par exemple, en matière de renouvellement de parc [10].

IV.4.3. Définition 3

G.M.A.O. signifie Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur. Il s'agit d'un logiciel spécialisé pour réaliser la gestion d'un service technique. La Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur est constituée d'une base de données (historique) qui est alimentée par le personnel de maintenance via un formulaire. Chaque GMAO est personnalisée selon les besoins spécifique d'exploitation de l'historique ou le fonctionnement d'un site [30].

IV.5. Les progiciels de GMAO : analyse des différents modules fonctionnels

Tous les progiciels de GMAO ont en commun la même structure modulaire proposant les mêmes fonctions. Mais, selon les logiciels, les fonctions remplies sont diversement dénommées, diversement réparties et diversement organisées. Prenons comme exemple Sirlog, la première GMAO développée en France et dont la composition reste représentative.

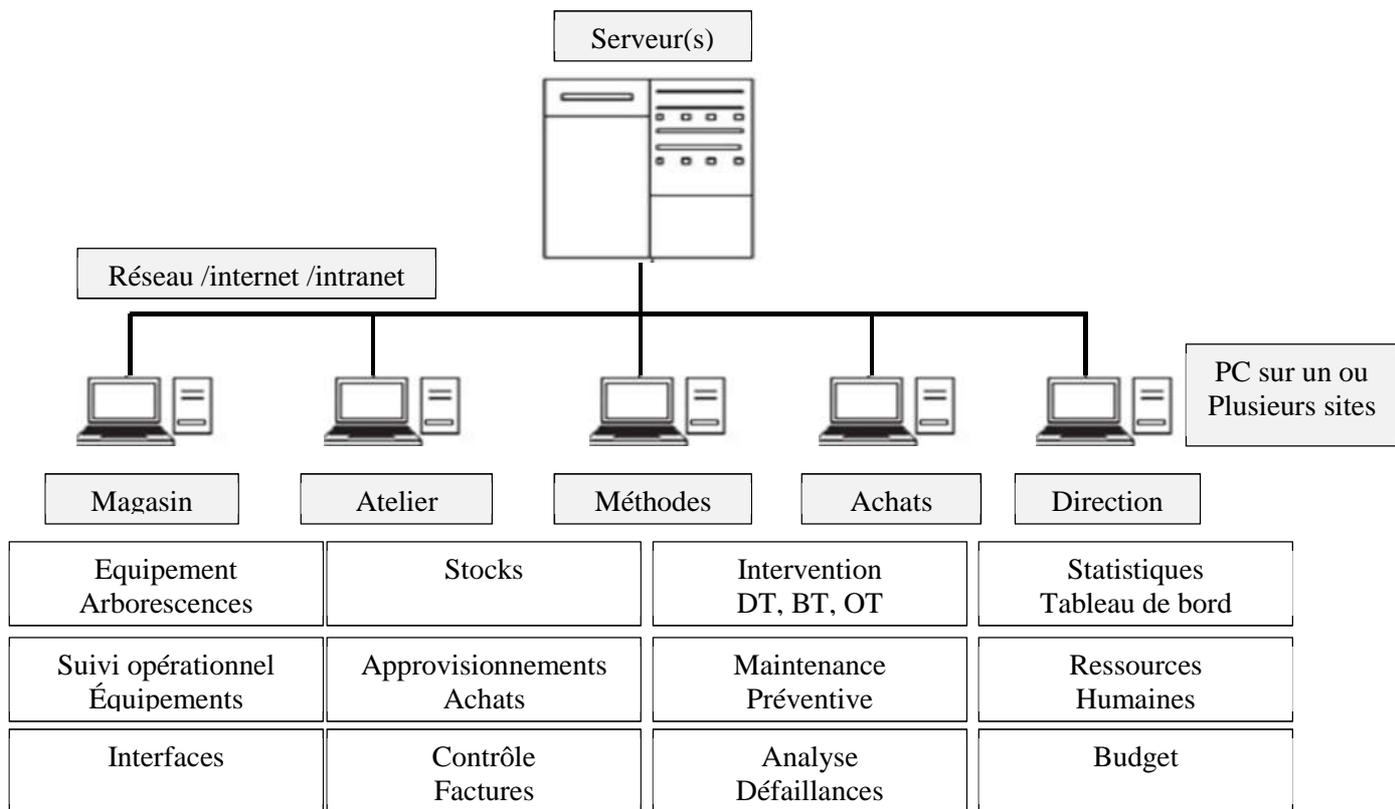


Figure IV.2 - Exemple de structure modulaire d'une GMAO [2]

C'est dans les bureaux techniques (méthodes, ordonnancement, logistique et travaux neufs) que s'effectuera majoritairement la gestion par exploitation des 10 modules analysés. Le « cahier des charges » proposé pour chaque module n'a pas l'ambition d'être exhaustif (chaque service maintenance a ses propres critères), mais d'attirer l'attention sur certains points souvent négligés. Les modules analysés sont les suivants :

- Gestion des équipements.
- Gestion du suivi opérationnel des équipements.
- Gestion des interventions en interne et en externe.
- Gestion du préventif.
- Gestion des stocks.
- Gestion des approvisionnements et des achats.
- Analyse des défaillances.
- Gestion du budget et suivi des dépenses.
- Gestion des ressources humaines.
- Tableaux de bord et statistiques.
- Autres modules et interfaçages possibles.

IV.5.1. Module « Gestion des équipements »

Il s'agit de décrire et de coder l'arborescence du découpage allant de l'ensemble du parc à maintenir aux équipements identifiés et caractérisés par leur DTE (dossier technique équipement) et leur historique, puis à leur propre découpage fonctionnel. À partir du code propre à l'équipement, le module doit permettre de :

- Pouvoir localiser et identifier un sous-ensemble dans l'arborescence.
- Connaître l'indice de criticité fonctionnelle de l'équipement, sa durée d'usage relevé par compteur.
- Accéder rapidement au « plan de maintenance » de l'équipement.
- Pouvoir trouver ses caractéristiques techniques, historiques et commerciales à partir du dte.
- Pouvoir localiser un ensemble mobile, trouver son dte et son historique (gestion multisite).
- Connaître ses consommations en énergie, en lubrifiants, etc.

- Connaître la liste des rechanges consommés.
- Connaître le code des responsables exploitation et maintenance de l'équipement.
- Accéder aux dessins et schémas relatifs à l'équipement contenus dans un logiciel de gestion documentaire (hors dte).
- Lister la nomenclature des pièces détachées.

IV.5.2. Module « gestion du suivi opérationnel des équipements »

À travers le module de suivi des performances d'un équipement, il s'agit de retrouver les indicateurs de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et le taux de rendement synthétique TRS si la TPM est envisagée ou effective.

Le choix des indicateurs prédétermine la nature des saisies nécessaires. Celles-ci doivent pouvoir se faire « au pied de la machine » et en temps réel, aussi bien en ce qui concerne les demandes que les comptes rendus.

a. Dans le cadre d'un suivi technique par l'indicateur Disponibilité

Le module doit être capable d'assurer la gestion des :

- Les graphes d'évolution des D par périodes de suivi.
- Les graphes de Pareto en NT se rattachant aux équipements pénalisants, par nature I des arrêts.
- Le rappel des valeurs des indicateurs n et MTA ou MTTR pour les dernières périodes.

b. Dans le cadre d'un suivi par le TRS

Le module doit être capable, à partir des données opérationnelles liées aux pertes de performances, aux pertes de qualité et aux pertes de disponibilité, de calculer les trois taux et leur produit (le TRS) par période, de montrer leur évolution, de présenter l'affichage analytique des valeurs après sélection, pour diagnostic. De façon plus générale, l'agent des méthodes doit être capable de trouver à travers ce module tous les éléments quantitatifs lui permettant d'approfondir une analyse de logistique, de fiabilité, de maintenabilité ou de disponibilité.

IV.5.3. Module « gestion des interventions »

Nous avons vu en ordonnancement l'existence de plusieurs procédures adaptées à la nature des travaux. Pour les nombreux BPT, pas de demande DT ni d'attribution de numéro, mais un enregistrement rapide a posteriori de leur durée, de leur localisation et de leur nature.

Il est nécessaire de créer une bibliothèque des différents codes utiles afférents aux clients, aux intervenants, aux différents statuts de l'intervention. D'autre part, à chaque équipement doit correspondre une bibliothèque de codes standards, relatifs au découpage de l'équipement, A l'effet déclenchant (souvent appelé par erreur « cause » d'arrêt) et à la cause identifiée.

IV.5.4. Module « gestion du préventif »

Le module permettra de gérer la maintenance systématique à travers un planning calendaire par équipement, les dates étant prédéterminées ou déterminées à partir d'un relevé de compteur (ou d'une mesure dans le cas de la maintenance conditionnelle). Le déclenchement sera automatique, par listing hebdomadaire des opérations prévues dans la semaine. Chaque opération sera définie par sa gamme préventive.

Le module devra aussi permettre un déclenchement « manuel d'opportunité », par exemple par anticipation d'une opération préventive à la suite d'un arrêt fortuit.

IV.5.5. Module « gestion des stocks »

Le système repose sur le « fichier des articles » en magasin comprenant les « lots de maintenance » par équipement et sur les mouvements entrées/sorties du magasin.

Une fiche article doit comprendre :

- Le code article défini par l'organisation interne, son libellé et sa désignation technique.
- Le code article du ou des fournisseurs et le code fournisseur (+ fabricant éventuellement).
- Le code du gisement en magasin.
- Les codes des articles de substitution, en cas de rupture.
- Le rattachement aux équipements possédant cet article.
- Le prix unitaire et le prix moyen pondéré automatiquement calculé.
- Les quantités en stock, commandées en attente.
- La méthode de réapprovisionnement et ses paramètres (stock de sécurité, stock maxi, etc.).

- Les dates des derniers mouvements.
- L'historique des consommations.

Les outils d'analyse du stock en nature et en valeurs :

- Classement des articles en magasin par valeurs et par taux de rotation.
- La valeur des stocks par nature et par périodes (mois par mois).
- La liste des articles « dormants ».
- La liste des cas de ruptures de stock (demandes non satisfaites).

Il importe de vérifier certaines potentialités du module :

- La possibilité ou non d'actualisation automatique des paramètres en fonction des consommations.
- La possibilité d'avoir le profil des consommations et le tracé de la courbe abc en valeurs.
- Les possibilités relatives aux transactions du magasin : réceptions provisoires ou définitives, retours au fournisseur en cas de non-conformité (avec l'écran de la commande), etc.
- L'édition de pièces réservées sur une préparation (numéro d'OT pour l'imputation).
- La présence d'un écran d'inventaire comprenant les différents critères d'article.

IV.5.6. Module « gestion des approvisionnements et des achats »

Caractéristiques de la fonction en maintenance : beaucoup de références et de fournisseurs pour des quantités faibles et des délais courts. Ce module doit permettre, en interface avec le logiciel du service « achat » :

- Le fichier des fournisseurs et des fabricants avec leurs tarifs liés aux quantités.
- Le lancement d'appels d'offre aux fournisseurs.
- L'édition de bons de commandes standard ou personnalisés, et le suivi des autorisations de dépenses.
- Le contrôle des factures.
- L'édition automatique des codifications internes et fournisseurs (transcodage).

- Le suivi des états de la commande.
- Le suivi des réceptions totales, partielles et des refus.

IV.5.7. Module « analyses des défaillances »

La base de ce module est constituée des historiques automatiquement alimentés par chaque saisie de BPT et d'OT mis en famille par ses codes d'imputation. À partir d'un équipement donné, il doit permettre :

- L'établissement des analyses quantitatives par graphes de Pareto, avec plusieurs critères (TTR, TA) et plusieurs mises en familles (par cause, par localisation, par nature de défaillance, etc.) et sur plusieurs périodes d'analyse (hier, la semaine écoulée, les trois derniers mois, l'année, etc.).
- Puis l'analyse qualitative des défaillances sélectionnées comme prioritaires, éventuellement mise sous forme AMDEC.

IV.5.8. Module « budget et le suivi des dépenses »

La gestion analytique ne permet que des « macroanalyses » des comptes. Un découpage plus fin de la fonction maintenance doit donc pouvoir permettre des analyses détaillées grâce à la GMAO, l'objectif étant le suivi de l'évolution des dépenses par activité dans un budget donné. Quelques éléments du cahier des charges à préciser, c'est-à-dire le module permet-il :

- La création d'un nouveau budget en modifiant des chapitres de l'ancien ?
- La comparaison entre plusieurs exercices ?
- La prise en compte des frais généraux du service ?
- L'éclatement en coûts directs et indirects (pertes de qualité, de production, etc.) ?
- La ventilation des coûts par équipement, par « client », par type d'activité de maintenance,
- Par origine de défaillance, par sous-ensemble « fragile » communs à plusieurs équipements, etc. ?
- La comparaison entre la prévision et la réalisation ?

IV.5.9. Module « gestion des ressources humaines »

Spécifiquement adapté au service maintenance, ce module sera principalement une aide à l'ordonnancement. Il sera construit autour d'un « fichier-technicien » pouvant comprendre, pour chacun :

- La qualification, les habilitations, les diplômes, l'ancienneté dans son échelon actuel, les différentes affectations, l'affectation actuelle, etc.
- Les formations suivies, demandées et le bilan de compétence.
- Les congés pris, demandés et les récupérations (données nécessaires à la programmation des travaux).
- Les temps de présence et d'absence (historique des arrêts de travail).
- Les coûts horaires pour chaque qualification (pour imputation des coûts d'intervention).

IV.5.10. Module « tableaux de bord et statistiques »

Les tableaux de bord concernent la mise en forme de tous les indicateurs techniques, économiques et sociaux sélectionnés pour assurer la gestion et le management du service maintenance. Certains sont livrés en « standard » avec le logiciel. Il faut vérifier s'ils peuvent être personnalisés rapidement (courbes, graphiques et autres visuels), ou développés avec un générateur d'état extérieur au logiciel. Vérifier également que l'extraction de données se fait simplement.

En cas de projet TPM, il faut vérifier la possibilité de former l'indicateur TRS et de visualiser ses variations par périodes.

IV.5.11. Modules complémentaires ou interfaçages utiles

La revue des besoins internes et externes du service peut amener à rechercher des extensions par interfaçage, par acquisition de modules complémentaires ou par développement de logiciels applicatifs spécifiques. Interfaçage requis ou non avec :

- Le logiciel de comptabilité et de paie.
- Le logiciel de gestion des ressources humaines.
- Le logiciel de gestion des achats et approvisionnements.
- La gpao, la gtc, les réseaux techniques.
- Le logiciel de gestion documentaire (ged).
- Les outils multimédia.

IV.6. Panorama des solutions GMAO (présentation générale ou vue générale)

Trois classes de progiciels de GMAO sont à distinguer [31]:

- **Classe I :**

Produits généralement construits autour d'une base de données ACCESS. Il s'agit de produits d'entrée de gamme à destination des PME/PMI (petite et moyenne usines) qui ont un budget ou un besoin limité.

- **Classe II :**

Produits client/serveur dédié sur base de donnée Oracle, Sybase, .. Offrant une plus grande stabilité et possibilité, notamment au niveau des indicateurs.

- **Classe III :**

Module gestion de maintenance dans un logiciel global de gestion industriel (PGI ou ERP).

IV.7. Les types de GMAO

Les solutions de GMAO existent en [31]:

- Monoposte.
- Multipostes client/serveur.
- Multisites.
- Globales intégrées dans un PGI (Progiciel de Gestion Industriel).

Dans les trois derniers cas, il doit s'intégrer dans un existant: système d'exploitation (Windows, Unix, AS400, HP9000? ;...), voire, s'il s'agit d'un logiciel dédié à la maintenance, à s'intégrer avec ceux existant en place :

- PGI.
- Logiciels de comptabilité.
- Logiciel de gestion du personnel.
- Logiciel de gestion clientèle.

IV.8. Installation d'une GMAO

Préalablement à l'installation d'une GMAO, il est utile de se poser quelques questions :

- Quelles sont les attentes de la production vis-à-vis du service de maintenance ?
... et de l'entreprise en général ?
- Quelles sont les difficultés internes aux services ?
- L'équipe de maintenance est-elle prête ? (connaissances, compétences, état d'esprit).
- Quel est le budget alloué ?
- Est-il possible d'initier un module sous Excel ou Access.
- Les ressources disponibles sont-elles suffisantes ?

IV.9. Réussite d'une GMAO

Six conditions pour un projet réussi [32,10] :

- Qualité du cahier des charges fonctionnel.
- Pertinence du choix du logiciel (répond aux attentes, interface graphique et fonctions ergonomiques et intuitives, intégrations si nécessaire aux outils existants).
- Implication du management.
- Implication forte des personnes concernées à l'étude de besoins.
- Formation des personnels.
- Qualité du paramétrage initiale du logiciel.
- Application effective des saisies régulières des informations à rentrer par le personnel.

IV.10. Elaboration d'un plan GMAO

L'élaboration d'un plan dans ce domaine consiste à structurer le système d'information et d'organisation du service maintenance en vue de divers objectifs fondamentaux.

- Création de systèmes d'élaboration de la politique de maintenance :
 - ✓ Définition des politiques de maintenance.
 - ✓ Programme de base de la maintenance.
 - ✓ Gamme de maintenance.

- ✓ Fiches de maintenance.

- Création de systèmes liés au déclenchement des interventions préventives ou correctives:
 - ✓ Diagnostic, recherche de l'origine de la panne et peut-être de sa cause.
 - ✓ Gestion des demandes des travaux correctifs et d'amélioration.
 - ✓ Déclenchement des interventions préventives.

- Création de modules liés à l'exécution des travaux :
 - ✓ Préparation des interventions.
 - ✓ Planification des interventions et des ressources.
 - ✓ Lancement.
 - ✓ Suivre l'exécution des travaux.

- Créer une banque de données maintenance (historique).

La mise en place de tels systèmes se fait par deux démarches complémentaires :

- ✓ Une sur le site «production» :
 - Connaissance des réseaux d'informations.
 - Des données liées au matériel.
 - Des rapports d'intervention.
 - Connaissance des stocks pièces de rechange.
 - Connaissance des limites des interventions.

- ✓ Une au niveau de la direction ou de siège:
 - Connaissance des informations provenant des autres sites de production.
 - Des normes en vigueur dans la société.
 - Des objectifs liés à la maintenance, (amélioration de la disponibilité, extension de l'expérience pour s'autres unités).

Une stratégie informatique devra en découler en proposant des priorités :

- ✓ Codification (nomenclature).
- ✓ Création de banques de données.
- ✓ Utilisation des moyens informatiques existants, acquisition de nouveaux.
- ✓ Suivi des résultats.

IV.11. Le choix d'un outil GMAO bien adapté

Il appartient à chaque service maintenance de déterminer ses besoins internes en matière d'informatisation, mais également ses besoins de communication externes, présents et à venir. Cette réflexion doit se faire dans la cohérence du programme d'informatisation de l'entreprise, à l'horizon 5 à 8 ans, en pensant que si 35 % seulement des potentialités d'une GMAO sont exploitées (surestimation des besoins), l'exploitation de certaines GMAO doit être abandonnée, par sous-estimation des besoins, souvent faute d'être compatibles avec les nouvelles organisations de l'entreprise. Le choix d'un outil GMAO passe par son adéquation :

- A la stratégie globale du système informatique de l'entreprise, problème de l'intégration.
- Aux besoins exprimés du service maintenance : problème du cahier des charges et problème du paramétrage (personnalisation).

IV.12. Caractéristiques générales :

Un logiciel de GMAO permet de construire une base de données dans laquelle on retrouvera :

- Les articles du magasin.
- Les fournisseurs.
- La gestion des entrées et sorties des articles.
- La gestion des achats.
- La gestion des actifs (équipements et sous-ensembles).
- La gestion des interventions correctives.
- La gestion des interventions préventives.
- La gestion des demandes d'interventions.
- Les analyses financières et le suivi des indicateurs de maintenance.
- La gestion des contacts clients et la facturation.

IV.13. Avantages de GAMO

Selon une étude réalisée en 2003, les effets de la GMAO dans les entreprises l'ayant mis en œuvre sont les points suivants [33] :

- Amélioration du retour d'expérience.
- Amélioration du suivi des coûts.
- Amélioration des temps de maintenance.
- Amélioration de la planification.
- Amélioration de la gestion des stocks.
- Augmentation de la fiabilité.
- Augmentation de la disponibilité des machines.
- Réduction des coûts de matériels.
- Réduction de la main-d'œuvre.

REFERENCES

- [1]. Vernier, François Monchy Jean-Pierre. "MAINTENANCE Méthodes et organisations, 3ème édition, l'USINE NOUVELLE DUNOD."
- [2]. Monchy, François. "maintenance, Méthodes et Organisation, dunod." (2000).
- [3]. Jourden, P., and J. P. Souris. "Pratique de la Maintenance Industrielle." Dunod ed., Paris (1998).
- [4]. Technologie de maintenance industrielle - Cégep de Sherbrooke
- [5]. Zwingelstein, Gilles. "La maintenance basée sur la fiabilité." Hermès 199 (1996).
- [6]. BENZAADA, S., MT BOUZIANE, and D. FELLIACHI. "LA MAINTENANCE MAINTENANT."
- [7]. G. Zwingelstein, Diagnostic de défaillance, Hermès Paris 1997
- [8]. Javel, Georges. Pratique de la gestion industrielle: organisation, méthodes et outils. Dunod, 2003.
- [9]. CHAPOUILLE, Pierre. Fiabilité. maintenabilité. Ed. Techniques Ingénieur, 1980.
- [10]. Héng, Jean. Pratique de la maintenance préventive: mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, froid. Dunod, 2015.
- [11]. <http://www.wikilean.com/Articles/Kaizen/2-La-Total-Productive-Maintenance-16-articles/Pilier-3-Maintenance-planifiee-Keikaku-Hozen>
- [12]. Abbou, Rosa. Contribution à la mise en oeuvre d'une maintenance centralisée: Conception et Optimisation d'un Atelier de Maintenance. Diss. Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2003.
- [13]. Geitner, F. K., and H. P. Bloch. "Machinery Failure Analysis and Troubleshooting." (2012).
- [14]. Adams, Maurice L. Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting. CRC Press, 2009.
- [15]. Vaseghi, Babak. *CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MACHINES ELECTRIQUES EN PRESENCE DE DEFAUT ENTRE-SPIRES Modélisation–Réduction du courant de défaut*. Diss. Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2009.
- [16]. Thailly, Delphine. *Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif: Application au diagnostic*. Diss. Artois, 2007.

- [17]. A. Boulenger, C. Pachaud, Diagnostic vibratoire en maintenance préventive, Dunod, Paris 2000.
- [18]. Nandi, Subhasis, et al. "Detection of eccentricity faults in induction machines based on nameplate parameters." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58.5 (2011): 1673-1683.
- [19]. Boumegoura, Tarek. *Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine synchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic*. Diss. Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2001.
- [20]. Schaeffer, Emmanuel. *Diagnostic des machines asynchrones: modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts*. Diss. Nantes, 1999.
- [21]. d'identité du Master, I-Fiche. "MASTER ACADEMIQUE."
- [22]. S. Robert, S. Stéphane, Maintenance : la méthode MAXER, Dunod Paris 2008.
- [23]. Nichon Margossian, Risques professionnelle, Technique et ingénieur 2006.
- [24]. Dépannage sur place d'un moteur à courant continu par preben christiansen, easa ingénieur conseil
- [25]. Jean Henq, Pratique de la maintenance préventive, Dunod Paris 2002.
- [26]. Hand, Augie. *Electric motor maintenance and troubleshooting*. McGraw Hill Professional, 2011.
- [27]. Bloch, Heinz P., and Fred K. Geitner. *Practical Machinery Management for Process Plants: Volume 2: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Gulf Professional Publishing, 1997.
- [28]. Lawrie, Robert J. *Electric motor manual: application, installation, maintenance, troubleshooting*. McGraw-Hill, 1987.
- [29]. <https://fr.scribd.com/document/125860634/Motor-Trouble-Shooting>
- [30]. <https://www.tribofilm.fr/logiciels/gmao/>
- [31]. <http://www.guideinformatique.com/dossiers-actualites-informatiques-gestion-de-maintenance-assistee-par-ordinateur-9/gmao-gestion-de-la-maintenance-assistee-par-ordinateur-283.html>
- [32]. <http://www.carl-software.fr/services-associes/choisir-une-gmao/>
- [33]. <http://www.eaglecmms.com/fr/7-avantages-offerts-par-le-logiciel-de-gestion-de-maintenance-assistee-par-ordinateur.htm>