

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Support de cours

Fiabilité et Maintenance des Systèmes Electroniques

**Domaine : Science et Technologies. Filière : Électronique
Spécialité : Instrumentation**

Dr. Ali BERBOUCHA
Maitre de Conférences à l'université de Béjaia

Juin 2023

Ce support de cours de Fiabilité et maintenance des systèmes électroniques s'adresse spécialement aux étudiants de 2^{ème} année Master de l'option Instrumentation poursuivant leur formation au niveau de la faculté de Technologie.

A la fin de ce cours, l'étudiant aura acquis des connaissances sur les concepts de base en matière de la maintenance et de la fiabilité des systèmes de façon à pouvoir analyser et interpréter les défaillances connexes qui y sont reliées.

Chapitre I : DÉFINITION DES PRINCIPAUX CONCEPTS DE LA MAINTENANCE

Figure I.1 Organisation de la maintenance centralisée	05
Figure I.2 Organisation de la maintenance décentralisée par secteur	06
Figure I.3 Organisation de la maintenance décentralisée par département	07
Figure I.4 Les domaines de responsabilité de l'agent des méthodes	08
Figure I.5 Temps relatifs à la maintenance	10

Chapitre III : APPLICATION A LA FIABILITE DES THEOREMES DE PROBABILITES

Figure III.1 Exemple de représentation d'un système en série	22
Figure III.2 Exemple de système en série	22
Figure III.3. Exemple de représentation d'un système en parallèle	23
Figure III.4. Exemple de représentation d'un système série-parallèle	24
Figure III.5. Exemple de représentation d'un système parallèle-série	25
Figure III.6. Exemple de représentation d'un système mixte à configuration non symétrique	26

Chapitre IV : LES DÉFAILLANCES

Figure IV.1 Modèle de défaillance par dégradation et catalectique	30
Figure IV.2 Courbes caractéristiques du taux de défaillance	32
Figure IV.3 La courbe en baignoire	33

Chapitre V : POLITIQUES DE MAINTENANCE

Figure V.1 Organisation de la maintenance décentralisée par département	38
Figure V.2 Les différentes formes de la maintenance corrective (palliative et curative)	40

Chapitre I : DÉFINITION DES PRINCIPAUX CONCEPTS DE LA MAINTENANCE

Introduction	01
I. Notions fondamentales	02
II. Le service maintenance	03
II.1. Situation dans l'entreprise	04
II.1.1. Maintenance centralisée	04
II.1.2. Maintenance décentralisée	05
III. Structure du service maintenance	07
III.1. La fonction Méthode	07
III.2. La fonction Ordonnancement	08
III.3. La fonction Réalisation	09
IV. Temps relatifs à la maintenance	10
Conclusion	11

Chapitre II : MODÈLE DE BASE DE PROBABILITÉ

Introduction	12
I. Notions fondamentales de probabilité	13
II. Rappels d'analyse combinatoire	14
II.1. Multiplets	14
II.2. Arrangements	14
II.2.1. Arrangements avec répétitions	14
II.2.2. Arrangements sans répétitions	15
II.3. Permutations	15
II.3.1. Permutations avec répétitions	15
II.3.2. Permutations sans répétitions	15
II.4. Combinaisons	15
II.3.1. Permutations sans remise	15
II.3.2. Permutations avec remise	16
III. Algèbre des événements	16
III.1. Commutativité de l'union et de l'intersection	16
III.2. Distribution de l'union et de l'intersection	16
III.3. Absorption	17
III.4. Élément neutre et complémentation	17
IV. Axiomes et théorèmes des probabilités	17
IV.1. Théorème de probabilité totale	17
IV.2. Théorème de probabilité conditionnelle	18
IV.3. Théorème de Bayes	18
V. Application de la probabilité dans l'électronique	18
Conclusion	19

Chapitre III : APPLICATION A LA FIABILITE DES THEOREMES DE PROBABILITES

Introduction	20
I. Notions fondamentales	21
II. Fonction de fiabilité $R(t)$ – Fonction de défaillance $F(t)$	21
III. Fiabilité des systèmes constitués de plusieurs composants	22
III.1. Système série	22
III.2. Système parallèle	23
III.3. Système mixte à configuration symétrique	24
III.3.1. Système série–parallèle	24
III.3.2. Système parallèle–série	25
III.4. Système mixte à configuration non symétrique	25
IV. Application du théorème de Bayes sur les configurations précédentes	26
Conclusion	26

Chapitre IV : LES DÉFAILLANCES

Introduction	27
I. Notions fondamentales	27
II. Fonction de répartition et densité de probabilité des défaillances	31
II.1. Fonction de répartition des défaillances	31
II.2. Fonction densité de probabilité	31
III. Indices de fiabilité	31
III.1. Taux instantané de défaillance	31
III.2. Temps Moyen de Bon Fonctionnement (MTBF)	33
IV. Lois de probabilité usuelles utilisées en fiabilité	33
IV.1. Loi Binomiale	33
IV.2. Loi de Poisson	34
IV.3. Loi de Weibull	34
IV.4. Loi exponentielle	35
V. Arbre de défaillance	35
Conclusion	37

Chapitre V : POLITIQUES DE MAINTENANCE

Introduction	38
I. Types de maintenance	38
I.1. Maintenance corrective	39
I.1.1. Actions de la maintenance corrective	39
I.1.2. Le temps en maintenance corrective	40
I.2. Maintenance préventive	41
I.2.1. Actions de la maintenance préventive	42
I.2.2. Objectifs visés par la maintenance préventive	42
II. Niveaux et échelons de maintenance	43
II.1. Premier niveau	43

II.2. Deuxième niveau	43
II.3. Troisième niveau	44
II.3. Quatrième niveau	44
II.3. Cinquième niveau	45
Conclusion	46
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	47

CHAPITRE 1. DÉFINITION DES PRINCIPAUX CONCEPTS DE LA MAINTENANCE

Introduction

La maintenance industrielle était uniquement perçue comme une activité d'arrière-plan, dont l'utilité était considérée comme toute relative et à laquelle on ne faisait appel que lorsque la machine tombait en panne. Ses fonctions étaient très limitées et assez axées sur l'électricité, la mécanique ou encore le graissage. Les notions de prévision ou de prévention n'avaient pas encore fait leur apparition. On se contentait par exemple d'intervenir sur les graissages et les stratégies alors employées se basaient uniquement sur le dépannage. Évidemment, ce mode de fonctionnement est à replacer dans son contexte. Le monde industriel n'était pas ce qu'il est aujourd'hui et les implications étaient bien différentes. L'industrie étant à cette période en plein essor, les conséquences sur les lignes de production étaient bien moindres, les arrêts de production pouvaient bien entendu perturber la production sans pour autant affoler l'usine et engendrer des pertes conséquentes, comme c'est le cas aujourd'hui, car les équipements n'étaient tout simplement pas autant intégrés à un ensemble.

Fallait attendre les années 1950 pour que la maintenance se développe, d'abord aux États-Unis puis au Japon. En 1951, l'armée américaine lance la publication d'un magazine (*The Preventive Maintenance Monthly*) destiné à présenter des méthodes de maintenance préventive (il est toujours publié soixante-douze ans plus tard), cette dernière consiste alors à réaliser des opérations de maintenance en suivant les recommandations des fabricants d'équipements, quelques années plus tard, des ingénieurs japonais développent la maintenance productive dont l'objectif est d'améliorer la productivité de l'entreprise au meilleur coût. Ils reconnaissent en particulier l'importance de la prise en compte de la maintenance dès la conception des équipements.

Au fil du temps, les entreprises, et notamment celles issues des secteurs de la chimie, des transports ou encore de l'énergie, ont progressivement pris conscience des enjeux socio-économiques croissants liés à la sécurité des hommes et des matériels, aux exigences de protection de l'environnement, de réduction des nuisances et aux gains de productivité sur des systèmes de plus en plus complexes. Depuis quelques années les activités de maintenance ont connu de fortes évolutions et ont pris une place plus importante au sein des usines : les premières procédures de maintenance ont vu le jour et grâce à elles, on a pu limiter les risques d'accident, contrôler de manière assidue le fonctionnement des machines et éviter au maximum les défaillances critiques pour toute la chaîne de production. La maintenance des systèmes industriels est devenue un point essentiel lors de leur conception et de leur exploitation, tant pour des questions de sécurité et de sûreté de fonctionnement, que pour des questions de rentabilité. Une maintenance mal adaptée à un système peut également conduire à une situation critique, dangereuse aussi bien pour les personnes que pour le matériel ou l'environnement.

C'est dans ce contexte d'évolution et de prise de conscience des risques liés à l'utilisation de machines de plus en plus performantes que les premières normes ont fait leur apparition. En France comme à travers toute l'Union Européenne, la mise en place de normes relatives à la maintenance industrielle s'est peu à peu concrétisée : en 1979, puis en 1985, les normes AFNOR X60 et X60 000 ont vu le jour.

Bien que ces nouvelles stratégies aient permis de réduire les défaillances et le temps d'arrêt en général, elles étaient très coûteuses pour ces entreprises. Le besoin de stratégies de maintenance optimales est donc né à partir de là et n'a cessé d'évoluer jusqu'au jour d'aujourd'hui.

Le présent chapitre a pour objectif de comprendre le concept de la maintenance et son importance dans les entreprises modernes, en allant des notions fondamentales de la maintenance jusqu'à la gestion de la maintenance, en passant par tous les concepts permettant une bonne organisation du service maintenance au sein de l'entreprise.

I. Notions fondamentales

- *Un système* peut être défini comme un ensemble de composants interdépendants, connus pour réaliser une fonction donnée, dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné.
- Une première définition normative de *la maintenance* est donnée par l'AFNOR en 1994 (**norme NFX 60-010**), à savoir 'l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé' [1]. Depuis 2001, elle a été remplacée par une nouvelle définition, désormais européenne (**NF EN 13306 X 60-319**) : '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].
- *La fiabilité (Reliability)*, selon la norme (**NF EN 13306 X 60-319**), elle caractérise l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant une durée de temps donné [3]. Elle exprime l'aptitude à la continuité du service.
- *La maintenabilité*, selon la norme (**NF EN 13306 X 60-319**), elle caractérise l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise quand il est défaillant, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits [4]. Elle exprime 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.
- *La disponibilité*, selon la norme (**NF EN 13306 X 60-319**), elle caractérise l'aptitude d'un bien 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 nécessaires est assurée [5]. Elle exprime la probabilité que le système délivre le service attendu dans des conditions données et à un instant donné.
- *La durabilité*, selon la norme (**NF EN 13306 X 60-319**), elle caractérise l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données d'usage et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint [5]. Elle représente la durée de vie ou durée de fonctionnement potentielle d'un système pour la fonction qui lui a été assignée dans des conditions d'utilisation et de maintenance données.
- *La panne*, selon la norme (**NF EN 13306 X 60-319**), elle caractérise l'état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures [5].
- *La défaillance*, selon la norme (**NF EN 13306 X 60-319**), elle caractérise la cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise. On note qu'après une défaillance, le bien est en panne, totale ou partielle ; et qu'une défaillance est un événement à distinguer d'une panne qui est un état [5].
- *La réparation*, selon la norme (**NF EN 13306 X 60-319**), elle représente les actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne [5].

- **Le dépannage**, selon la norme (NF EN 13306 X 60-319), il représente les actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée [5].
- **Le diagnostic**, selon la norme (NF EN 13306 X 60-319), il représente les actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause [5].
- **La GMAO** (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) est une méthode / outil de gestion de la maintenance effectuée à l'aide d'un progiciel de GMAO en vue de gérer les tâches de maintenance des équipements au sein d'une entreprise, d'une collectivité territoriale ou d'une administration.
- L'entretien c'est l'action de dépanner et réparer un parc matériel, afin d'assurer la continuité de la production: Entretien donc, c'est subir la panne.
- **La terotechnologie** est la technologie d'installation, de mise en service, d'entretien, de remplacement et d'enlèvement des machines et équipements de l'usine, de la transmission vers l'exploitation et la conception de celles-ci, ainsi que sur les sujets et pratiques connexes, elle représente la maintenance des actifs de manière optimale. C'est la combinaison de la gestion, de la finance, de l'ingénierie et d'autres pratiques appliquées aux biens physiques tels que les installations, les machines, l'équipement, les bâtiments et les structures dans la poursuite des coûts économiques du cycle de vie. Elle s'intéresse à la fiabilité et à la durabilité des actifs physiques et prend également en compte les processus d'installation, de mise en service, d'exploitation, de maintenance, de modification et de remplacement.

II. Le service maintenance

Ces dernières années les entreprises ont connu une évolution qui s'est manifestée par le remplacement de M machines en parallèle par M unités de production en série, nous distinguerons trois types d'industrie, possédant des services maintenance intégrés à leur structure :

- Entreprises manufacturières : Un grand parc machine et des produits nombreux (Exemple : chaudronnerie et métallurgie)
- Entreprise à processus : Postes en série et peu de produits (Exemple : agroalimentaire et papeterie)
- Entreprise de service : Équipements très divers (Exemple : hôpitaux, postes et transports)

Pour les entreprises à processus: le coût de défaillance élevé et la disponibilité exigée aux équipements et pour les entreprises de service: la sécurité et la disponibilité des équipements font que la maintenance a une importance capitale.

Le but principal de service maintenance est de diminuer le rapport suivant :

$$\frac{D \acute{e} penses \ de \ maintenance \ + \ co \ \hat{u} \ ts \ d' \ arr \ \hat{e} \ ts}{Quantit \ \acute{e} \ et \ qualit \ \acute{e} \ de \ service \ rendu}$$

Cela ne peut se faire qu'en fonction d'objectifs qui doivent être clairement définis à partir de la prise de trois facteurs :

- Facteur technique :

- Accroître la durabilité et la durée de vie des équipements.

- Améliorer la disponibilité et les performances des équipements.

➤ Facteur économique :

- Réduire les coûts de défaillance qui peut se traduire par l'amélioration des prix de revient.
- Réduire le coût global de possession de chaque équipement sensible.
- Réduire les coûts directs de prestations, énergie, transport etc.

➤ Facteur social:

- Réduire le nombre des événements imprévus, car moins d'interventions en urgence réduit le risque d'accident.
- Améliorer les conditions de travail.
- Assurer la sécurité du personnel.
- Revaloriser la nature du travail.

Une fois les objectifs à atteindre sont précisés, la mission du service maintenance consiste à surveiller le comportement du matériel et à gérer les moyens à mettre en œuvre en s'acquittant des tâches suivantes:

- Analyse des causes de défaillance.
- Préserver et respecter l'environnement.
- Analyse et optimisation des coûts de maintenance.
- Définition des critères de remplacement des équipements.
- Amélioration des conditions de travail et optimisation des dépenses.
- Gestion du stock des pièces de rechange, du consommable et d'outillage.
- Définition du programme de maintenance préventive et les moyens associés.
- Exécution de la maintenance des équipements, (actions correctives et préventives).
- Amélioration du matériel, dans l'optique de la qualité, de la productivité ou de la sécurité.
- Entretien général des bâtiments administratifs ou industriels, des espaces verts, des véhicules...
- Participation au choix, à la réception, à l'installation et au démarrage des nouveaux équipements.
- Exécution et réparation des pièces de rechanges ainsi que l'approvisionnement et la gestion des outillages.
- Diagnostic permanent des équipements et installations en apportant les remèdes aux dégradations constatées.

II.1 Situation dans l'entreprise

Il existe deux tendances quant au positionnement de la maintenance dans l'entreprise :

II.1.1 Maintenance centralisée: Où toute la maintenance est assurée par un service (bureau des méthodes ainsi qu'un atelier central de maintenance) qui regroupe tout les moyens nécessaires pour le bon fonctionnement du service maintenance, parmi ses avantages:

- Vision globale de l'état du parc du matériel à gérer.
- Optimisation des moyens nécessaires aux activités de maintenance.
- Possibilité d'investir dans du matériel onéreux grâce au regroupement.
- Gestion plus souple des moyens et personnels concerné par la maintenance.

- Standardisation des méthodes, des procédures et des moyens de communication.
- Communication simplifiée avec les autres services grâce à sa situation centralisée.
- Diminution des quantités de pièces de rechange disponibles (meilleure maîtrise des coûts).

Parmi ses inconvénients:

- Contrôle difficile des métiers.
- Motivation des employés plus difficile.
- Conflits entre métiers (définition des tâches et responsabilités).
- Priorisation affectée par la maintenance plutôt que la production.
- Assignations différentes à chaque interventions (personnel- machines).

La Figure I.1 montre l'organisation de la maintenance centralisée au sein de la direction d'une usine.

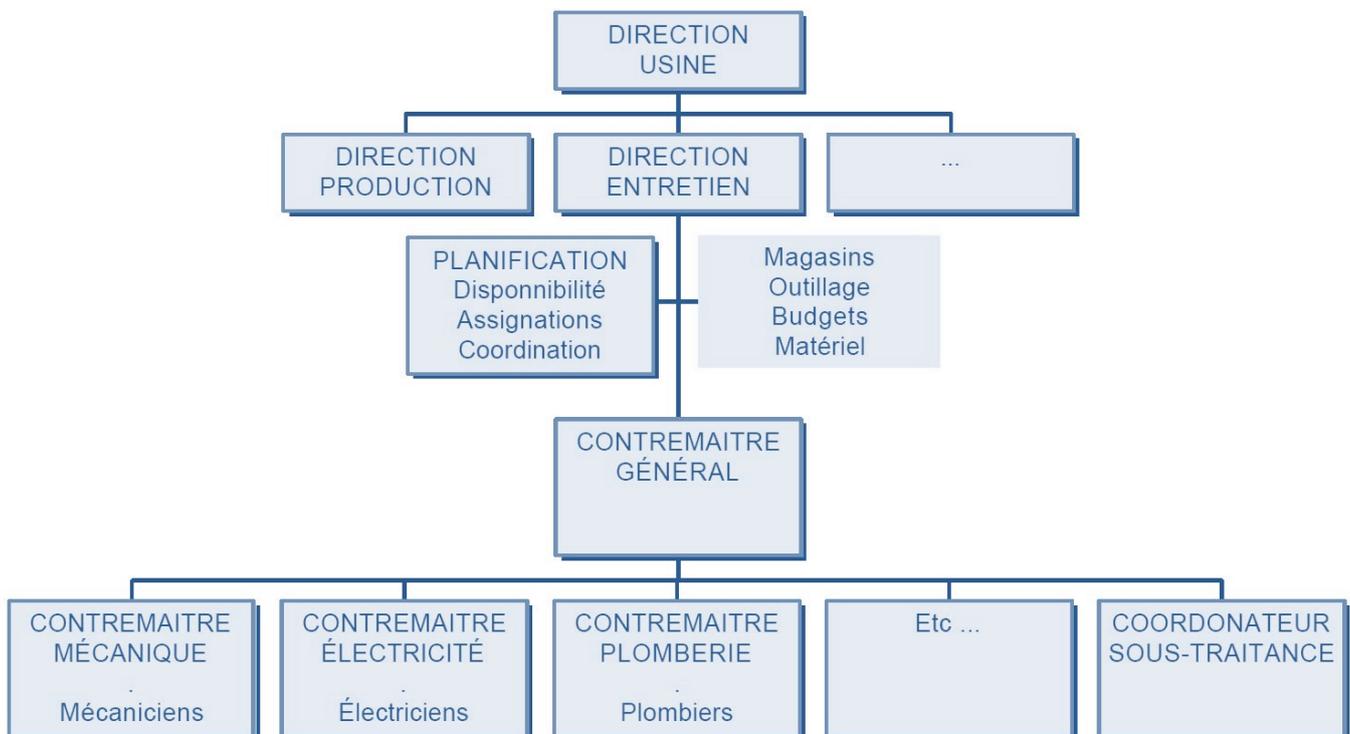


Figure I.1 Organisation de la maintenance centralisée

II.1.2 Maintenance décentralisée: Où la maintenance est confiée à plusieurs services, de dimension proportionnellement plus modeste, et liés à chacun des services de l'entreprise. On distingue deux cas:

➤ **Maintenance décentralisée par secteur:** Parmi ses avantages on trouve

- Arrêts au minimum.
- Contrôle plus facile.
- Équipes vites affectées.
- Déplacements plus courts.
- Connaissance des équipements.
- Utilisation de la sous-traitance plus facile.
- Expertise reliée aux équipements du secteur.

Parmi ses inconvénients:

- Difficulté lors de projets majeurs.
- Problèmes de ressources humaines.
- Outillage plus nombreux (duplication).
- Augmentation du nombre total de main-d'œuvre.
- Justification de spécialistes parfois difficile (polyvalence).

La Figure I.2 montre l'organisation de la maintenance décentralisée par secteur au sein de la direction d'une usine.

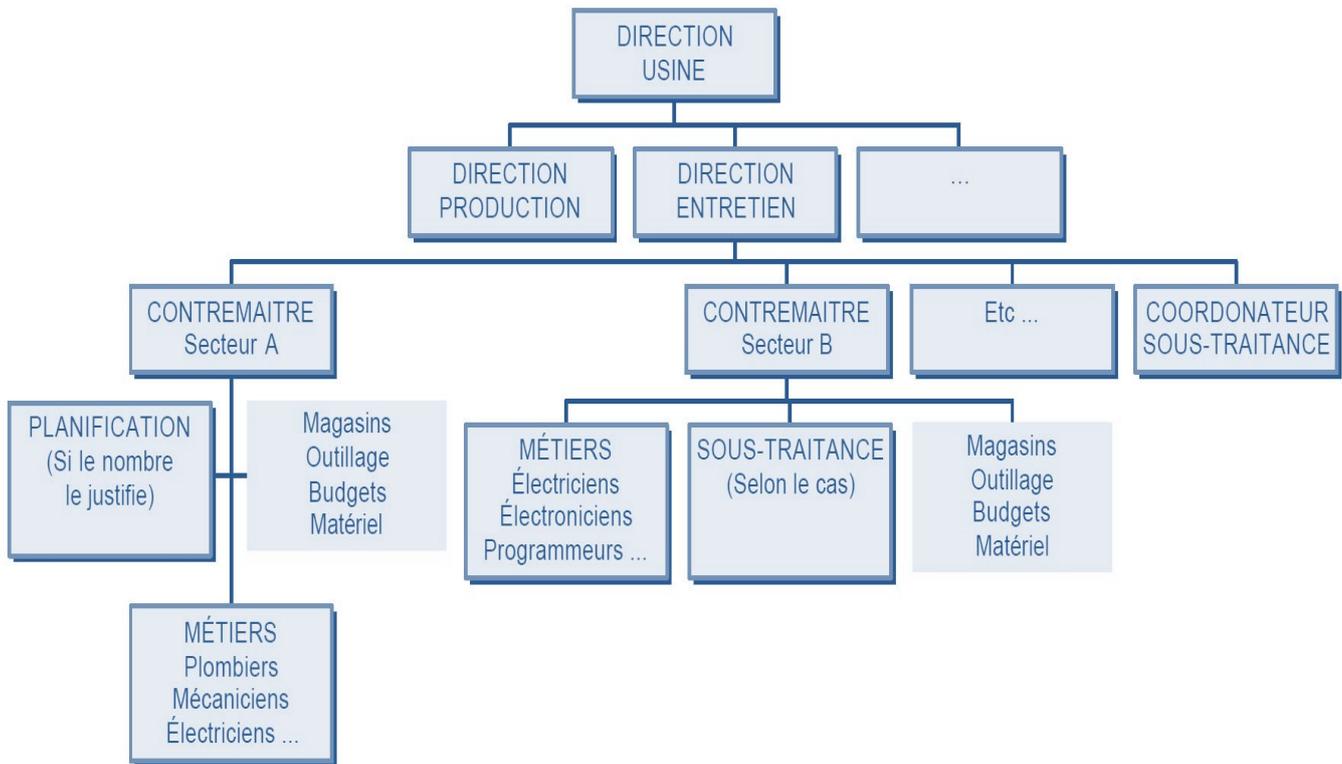


Figure I.2 Organisation de la maintenance décentralisée par secteur

➤ **Maintenance décentralisée par département:** Parmi ses avantages on trouve

- Arrêts au minimum.
- Contrôle plus facile.
- Équipes vites affectées.
- Déplacements plus courts.
- Connaissance des équipements.
- Utilisation de la sous-traitance plus facile.
- Expertise reliée aux équipements du département.

Parmi ses inconvénients:

- Contrôle des coûts plus difficile.
- Décentralisation totale des ressources.
- Responsabilités de la maintenance partagées.
- Ressources au minimum souvent insuffisantes.

La Figure I.3 montre l'organisation de la maintenance décentralisée par département au sein de la direction d'une usine.

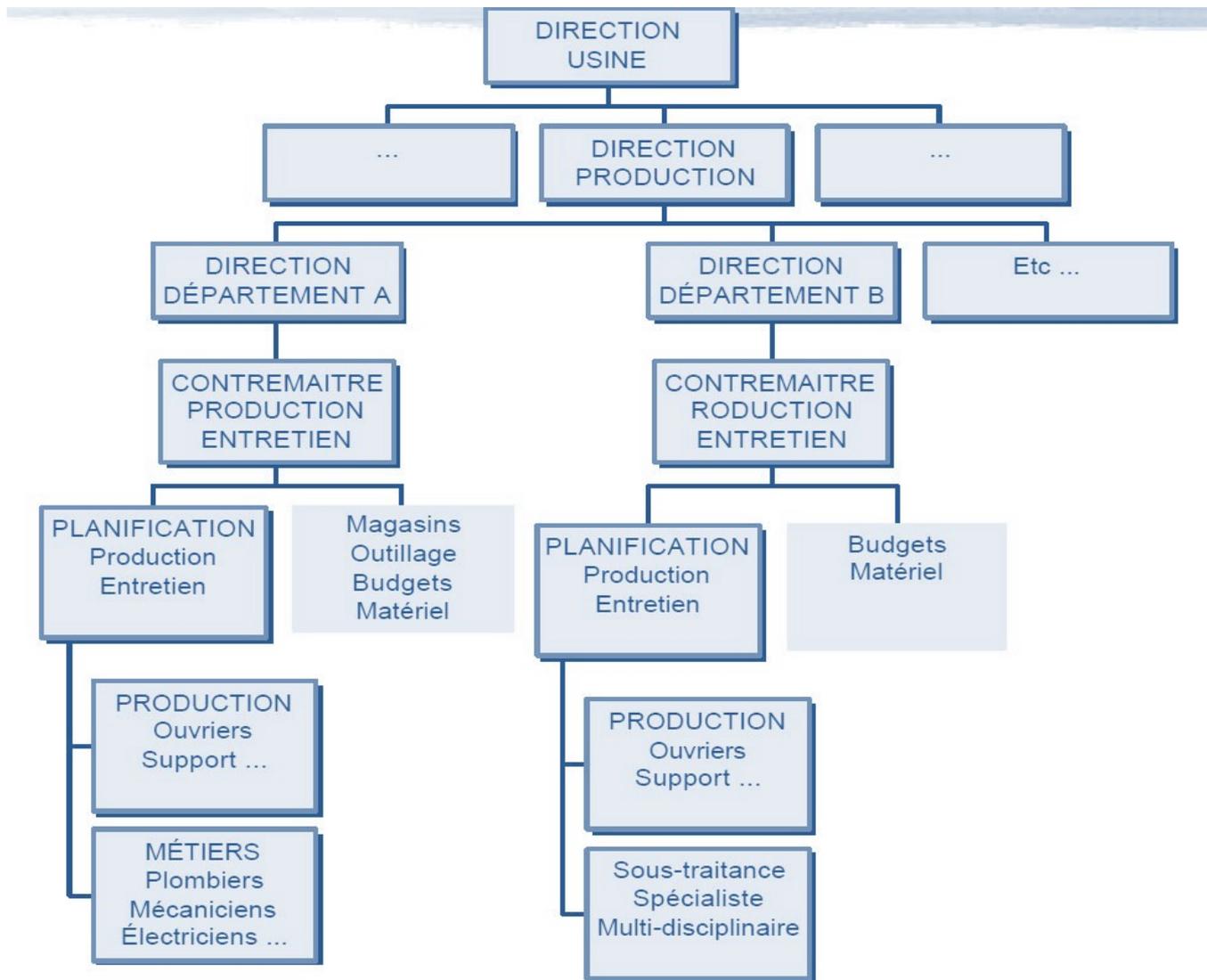


Figure I.3 Organisation de la maintenance décentralisée par département

III. Structure du service maintenance

Le service maintenance assure trois fonctions essentielles :

III.1 La fonction Méthode (rôle étude et préparation)

La fonction méthode est caractérisée par les verbes d'action savoir, analyser, prévoir, anticiper et améliorer. Il s'agit d'optimiser les tâches en fonction des critères retenus dans le cadre de la politique de maintenance définie par l'entreprise.

Cette fonction permet la préparation des travaux de maintenance qui comprend :

- L'analyse et/ou les études des travaux à effectuer y compris les améliorations possibles (plans de graissage, de maintenance préventive, etc..).
- Le contrôle de la réalisation sachant que la réalisation est confiée à une équipe terrain.

- La synthèse de cette analyse, c'est à dire la préparation des interventions.
- La mise à jour des dossiers techniques et des normes.
- La gestion économique de l'activité maintenance.
- L'assistance technique.

L'objectifs de la fonction méthode dans le service maintenance est de diminuer le plus possible les coûts de maintenance tout en maintenant au maximum la qualité du service, et cela passe par :

- Réduire au minimum les temps d'immobilisation ou d'arrêt de l'outil de production (réduction du coût indirect).
- Améliorer les conditions de travail et de sécurité, utiliser au mieux les compétences.
- Répondre aux besoins des utilisateurs (qualité des prestations).
- Réduire les temps d'intervention (réduction du coût direct).
- Réduire le stock de pièces nécessaires.

Le domaine de responsabilité du service méthodes peut être résumé dans les points suivants :

- **Participation au choix des politiques de maintenance à appliquer au matériel** : Choix des méthodes et techniques, choix des moyens, détermination des normes d'entretien, etc.
- **Gestion technique du parc matériel** : Études techniques de fiabilité, de disponibilité, d'amélioration, de gestion des pièces de rechange, des problèmes de lubrification, etc.
- **Gestion du matériel sur le plan économique et humain** : Analyse des coûts et des temps, sécurité et ergonomie ;
- **Préparation du travail** : Préparation des interventions fortuites ou programmée, des rondes et visites, d'expertises, élaboration des cahiers de charge de sous-traitance ;
- **Assistance technique** : Localisation, diagnostic et expertise des défaillances, réception technique des travaux neufs et du nouveau matériel, mise en œuvre des techniques particulières (contrôle non destructif, analyse vibratoire, etc.).

Pour assurer ces tâches l'entreprise doit disposer d'un agent des méthodes polyvalent et généraliste, à la fois homme de bureau et de terrain. Les domaines de responsabilités de l'agent des méthodes sont illustrés sur la Figure I.4. :

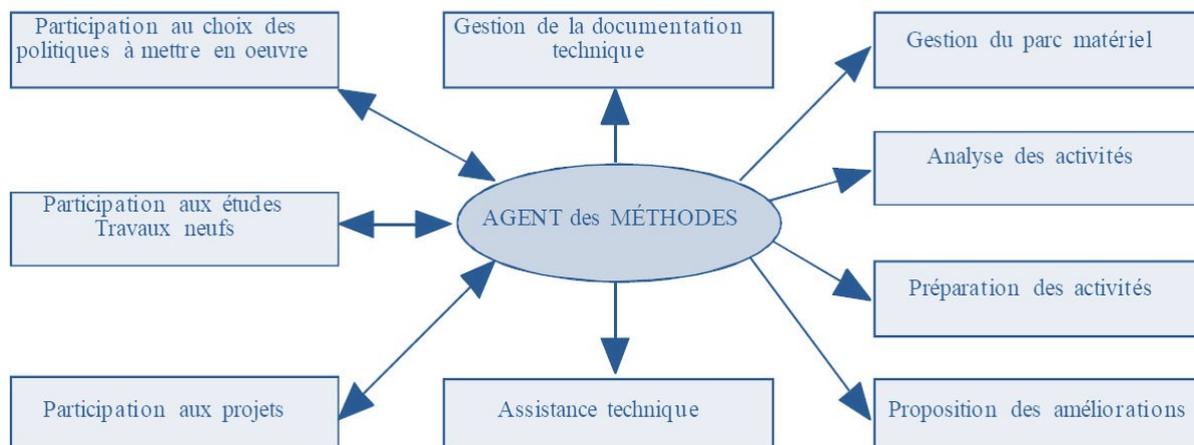


Figure I.4 Les domaines de responsabilité de l'agent des méthodes

III.2 La fonction Ordonnancement (rôle de coordination)

La fonction ordonnancement est caractérisée par les verbes d'action planifier, coordonner et synchroniser. Elle permet l'intervention optimale avec tous les moyens nécessaires : personnel, outillage, préparation, dossier technique, consignes de sécurité, moyens spéciaux (appareils de levage, échafaudage, etc..), pièces de rechange.

La fonction ordonnancement a pour mission de coordonner les activités du service maintenance, ce dernier est caractérisé par une variété de tâches en nature, en durée, en urgence et en criticité. L'absence d'une bonne organisation débouche vite sur une anarchie totale. L'ordonnancement se situe entre la fonction méthode, chargée de la définition des tâches à effectuer et des moyens à mettre en œuvre, et la fonction réalisation chargée de leur exécution.

Ayant la responsabilité de la conduite et de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées, la fonction ordonnancement a pour mission de:

- Lancer les travaux au moment choisi, en rendant tous les moyens nécessaires disponibles.
- Gérer les projets (prévision, optimisation logistique, avancement et respect des délais).
- Optimiser l'utilisation des moyens nécessaires en fonction des délais et des chemins.
- Prévoir la chronologie de déroulement des différentes tâches.
- Analyser les écarts entre prévision et réalisation.
- Contrôler l'avancement et la fin des travaux.
- Ajuster les charges aux capacités connues.

La fonction méthodes affecte une durée à un travail, la fonction ordonnancement planifie cette tâche (i.e. elle fixe l'heure H et le jour J l'endroit X où un personnel P muni d'un outillage O et des matières M exécutera la tâche T en harmonie avec d'autres travaux connexes, la fonction réalisation, au moment choisi par l'ordonnancement et suivant les prescriptions des méthodes, met en œuvre la tâche en question.

Cette fonction stratégique est peu visible (effectif dédié faible) est souvent peu étudiée, mais elle repose sur des méthodes à connaître. Son absence ou son insuffisance est par contre fort visible : tâches préventives négligées, gaspillage de temps en recherche des moyens indispensables, améliorations toujours reportées à plus tard, techniciens parfois inoccupés associés à des heures supplémentaires évitables, etc.

Pour que le service ordonnancement réalise ses tâches il a besoin des moyens tel que:

- Répertoire d'enregistrement et de suivi des travaux.
- Dispositif d'enclenchement et de suivi de la maintenance préventive.
- Analyse de la charge prévisionnelle (outil de gestion des moyens de maintenance destiné à réduire les coûts en optimisant les effectifs en nombre et en spécialité, en définissant la meilleure adéquation besoins - moyens, en prévoyant au besoin la sous-traitance).
- Fichier stock des pièces de rechange.
- Dispositif de déclenchement et de suivi des approvisionnements.

III.3 La fonction Réalisation (rôle intervention)

La fonction réalisation est caractérisée par les verbes d'action effectuer, vérifier et rendre compte, elle consiste à mettre en œuvre les moyens définis par le service méthode pour atteindre les résultats attendus dans les délais préconisés par le service ordonnancement, elle concerne tout le personnel opérationnel de maintenance, des équipes polyvalentes (EP) sont attachées à un équipement dont elles ont une parfaite connaissance.

La fonction réalisation a pour mission d'utiliser les moyens mis à disposition, suivant les procédures imposées, pour remettre ou maintenir le matériel dans l'état spécifié. Elle a en charge le personnel d'exécution

renfermant tous les corps de métier exigés par la nature du matériel à prendre en charge (mécanique, électricité, instrumentation, chaudronnerie, automatisme, etc.), les magasins d’outillage et moyens matériels et les ateliers.

Il est à noter que cette décomposition peut évoluer en fonction de la taille de l’entreprise. Dans les petites et moyennes entreprises, le service ordonnancement est souvent intégré au service méthode. Dans les grandes entreprises, d’autres secteurs tels que la sécurité ou l’entretien général sont spécifiquement structurés. Dans les petites et moyennes entreprises, ces secteurs sont gérés par le bureau des méthodes.

IV. Temps relatifs à la maintenance

Dans le cadre de la gestion de la maintenance, nous distinguerons les temps d’arrêt (d’indisponibilité) *TA* relatif à la maintenance notés *TAM* et non relatif à la maintenance *TAF*. Pour une question de saisie de temps, les temps d’attente seront ajoutés au *TAF*.

$$TO = \Sigma TBF + \Sigma TAM + \Sigma TAF$$

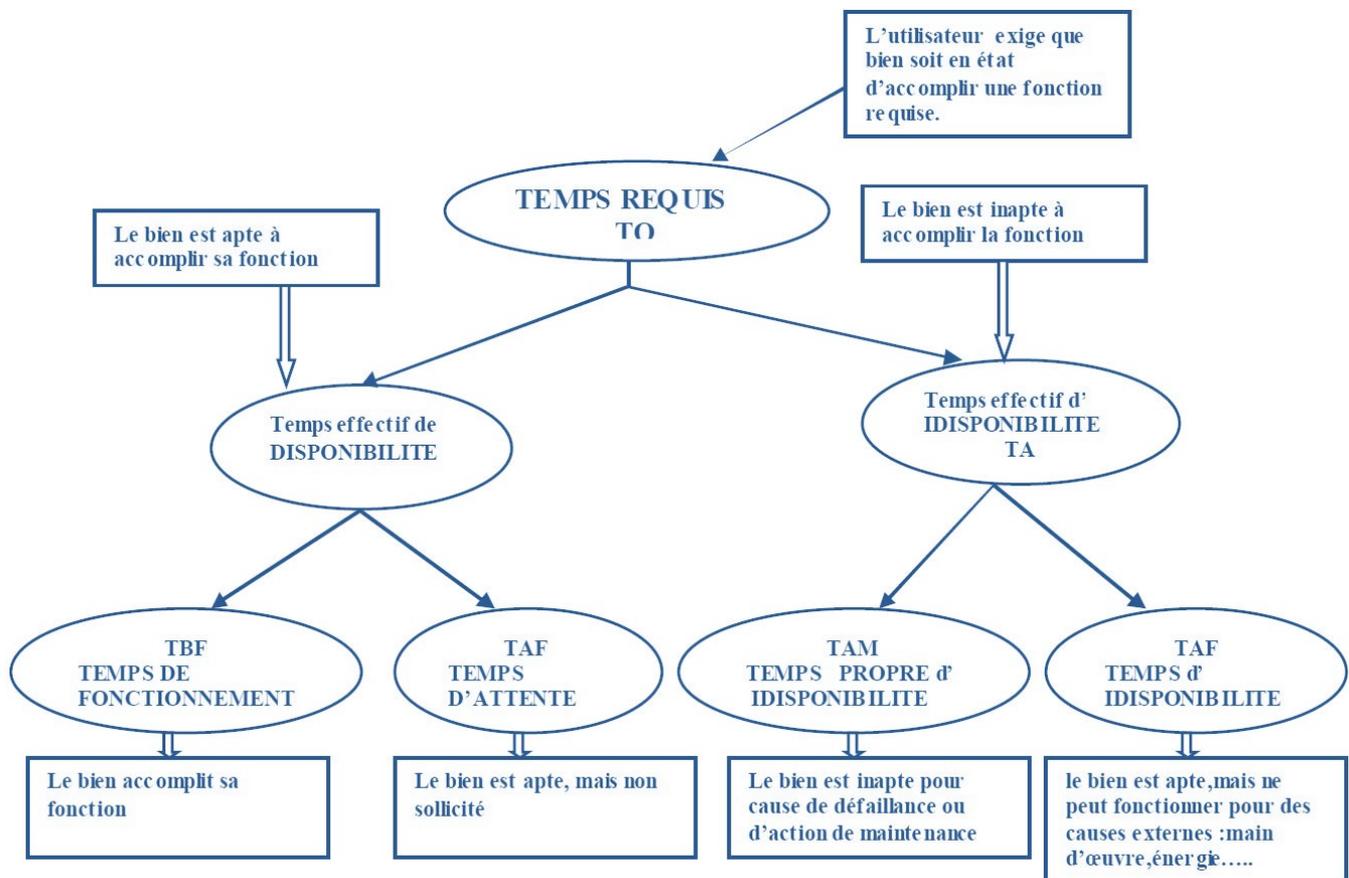


Figure I.5 Temps relatifs à la maintenance

On définit trois indicateurs de la maintenance :

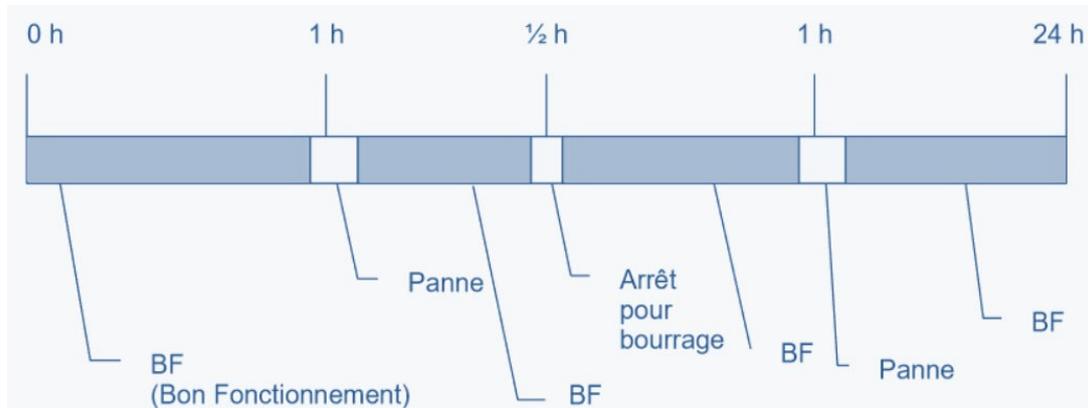
MTBF : ‘Mean Time Between Failure’(Caractérise la Fiabilité) : Durée moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances consécutives. Si le relevé des pannes se fait sur une période donnée et l’étude s’arrête alors que le système est en panne, on a alors :

$$MTBF = \Sigma (\text{Temps de bon fonctionnement}) / \text{Nombre de défaillances.}$$

Si par contre l’étude s’arrête alors que le système fonctionne, on a alors :

$$MTBF = \Sigma (\text{Temps de bon fonctionnement}) / (\text{Nombre de défaillances} + 1).$$

Exemple : Fonction d'un équipement sur 24H :



$$MTBF = 21.50 / 4 = 5.375 \text{ heures.}$$

MTTR : 'Mean Time To Repair' (Caractérise la Maintenabilité) : Durée moyenne de réparation.

$$MTTR = \Sigma (\text{Temps d'arrêt}) / \text{Nombre d'arrêts}$$

La disponibilité moyenne sur un intervalle de temps donné peut être exprimée en fonction des indicateurs précédents de la manière suivante :

$$\text{Disponibilité} = MTBF / (MTTR + MTBF)$$

On définit d'autres abréviations qu'on rencontrera souvent dans les documents concernant la maintenance et la fiabilité tel que :

MTTF : 'Mean Time To Failure' (Caractérise la Fiabilité) : Durée moyenne entre la mise en service d'un équipement et la première défaillance. Cet indice est utilisé pour estimer la fiabilité d'un système.

MTTR : 'Mean Time To Repair' (Caractérise la Maintenabilité) : Durée moyenne de réparation dans des conditions définies.

MUT : 'Mean Up Time' : Durée moyenne de bon fonctionnement après une remise en état.

MDT : 'Mean Down Time' : Durée moyenne entre l'apparition de la défaillance et la remise en état de fonctionnement.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts de la maintenance, le service maintenance sa situation dans l'entreprise et ses principales fonctions, ainsi que la signification de quelques sigles et abréviations utilisés dans le domaine de maintenance. Dans le prochain chapitre, on fera un rappel sur les notions générales de l'analyse combinatoire et la probabilité. Après l'introduction de quelques théorèmes de la probabilité, nous présenterons l'application de ces théorèmes dans le domaine d'électronique.

CHAPITRE 2. MODÈLE DE BASE DE PROBABILITÉ

Introduction

L'homme est curieux et c'est sans doute ce qui explique le mieux son cheminement depuis le début de l'humanité jusqu'à nos jours. Ce besoin de comprendre les phénomènes observés et le désir de les anticiper est au cœur de ses préoccupations. C'est ce qui explique l'émergence et le succès des probabilités et statistique, une discipline scientifique en plein essor. Pour définir son objet, on ne saurait mieux faire que Christian Robert : 'L'objet principal de la statistique est de mener, grâce à l'observation d'un phénomène aléatoire, une inférence sur la distribution probabiliste à l'origine de ce phénomène, c'est-à-dire de fournir une analyse (ou une description) d'un phénomène passé, au une prédiction d'un phénomène à venir de nature similaire' [6].

Le hasard intervient dans la vie quotidienne sous forme d'événements dont on ne peut pas prévoir s'ils vont ou ne vont pas se produire : la sortie d'un numéro se terminant par 42 à la loterie, la naissance d'une fille plutôt que d'un garçon, ou encore la victoire de l'équipe de football d'Algérie sur celle du Maroc. Ces événements sont imprévisibles dans la mesure où l'on ne peut pas dire avec certitude s'ils auront lieu. Cependant, notre ignorance du résultat à venir n'est pas totale. A chacun des événements ci-dessus, on attribue un nombre qui mesure notre attente, notre espoir ou notre pronostic : on dit que le 42 sortira avec la probabilité 0.01, qu'une petite fille naîtra avec la probabilité 0.5, que l'Algérie l'emportera sur le Maroc avec la probabilité 0.5. Ces chiffres sont certes discutables mais ils témoignent que la notion de probabilité est solidement ancrée dans notre mode de pensée sous une forme quantifiable et ils suggèrent qu'une théorie mathématique en est possible.

Afin de rendre cette notion opérationnelle et de lui donner un intérêt pratique, il faut l'établir dans un formalisme clair et sans ambiguïtés. C'est une chose simple, comme on le verra bientôt, bien que la présentation axiomatique moderne ait mis quelques siècles à se dégager. Pendant ce temps, des gens comme PASCAL, FERMAT, HUYGHENS, BERNOULLI, LAPLACE et bien d'autres faisaient des probabilités et poussaient des calculs qui étaient souvent justes [7].

La connaissance de méthodes de dénombrement est indispensable au calcul des probabilités qui constituent le fondement des statistiques. On dit qu'un ensemble est dénombrable si on peut numéroter ses éléments pour les compter. Avant tout dénombrement, il faut s'assurer si, dans la manière de ranger les objets, l'ordre compte ou non, si certains objets sont répétés ou non, si tous les objets sont pris ou non. Selon les cas, la manière de compter change complètement. Les questions des dénombrements constituent une branche des mathématiques qu'on appelle 'Analyse combinatoire'.

Ce chapitre introduit les notions essentielles de l'analyse combinatoire, les modèles de base et les théorèmes de la probabilité. Nous commençons par un rappel sur les notions de base de probabilité tel que (événements, probabilité, expérience, variable aléatoire, probabilité conditionnelle, indépendance) et sur l'analyse combinatoire (arrangement, permutation, combinaison, etc.) Ensuite, nous présentons quelques opérations de l'algèbre des événements tels que : la commutativité de l'union et de l'intersection, l'absorption, la distribution de l'union et de l'intersection, l'élément neutre et la complémentation. Enfin, nous illustrons les axiomes et les théorèmes des probabilités (probabilité totale, théorème de Bayes, etc.).

I. Notions fondamentales de probabilité

- **Expérience aléatoire**, une expérience aléatoire E est un processus dans lequel intervient le hasard et qui est susceptible de produire différents résultats [8]; elle se caractérise de quatre façons :
 - Nous ne pouvons prédire avec certitude le résultat,
 - Nous pouvons décrire à priori l'ensemble de tous les résultats possibles,
 - Elle peut être répétée,
 - Elle a un but précis.

Exemples d'expériences aléatoires :

- Lancer deux dés et observer le total,
- Tirer le numéro gagnant d'une loterie,
- Jeter une pièce de monnaie deux fois et noter le côté qui apparaît.

- **Espace échantillonnal**, l'espace échantillonnal d'une expérience aléatoire E est l'ensemble de tous les résultats possibles de cette expérience, noté Ω [7].

Exemples d'espace échantillonnal : les espaces échantillonnaux associés aux expériences aléatoires présentées dans l'exemple précédent sont respectivement :

- $\Omega = \{2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12\}$,
- $\Omega = \{1000, 1001, \dots, 9999\}$,
- $\Omega = \{ff, fp, pf, pp\}$.

- **Événement**, un événement relié à une expérience aléatoire E est un sous-ensemble de l'espace échantillonnal Ω . On note habituellement les événements par A, B, C, \dots [7]

Exemple d'événement : soit l'expérience consistant à jeter une pièce de monnaie deux fois et de noter le côté qui apparaît. Ainsi, l'espace échantillonnal est :

$$\Omega = \{ff, fp, pf, pp\}$$

Voici quelques exemples d'événements :

- $A = \text{"obtenir face au premier lancer"} = \{fp, ff\}$,
- $B = \text{"obtenir face au deuxième lancer"} = \{pf, ff\}$,
- $C = \text{"obtenir le même côté lors des deux lancers"} = \{pp, ff\}$,
- $D = \text{"obtenir des côtés différents lors des deux lancers"} = \{fp, pf\}$.

- **Événement élémentaire** : C'est un sous-ensemble de l'espace ne contenant qu'un seul élément. Ainsi, on a autant d'événements élémentaires que d'éléments dans l'espace (i.e. les événements élémentaires de l'espace E précédent sont : $\{f\}$ et $\{p\}$).
- **Événement certain** : C'est l'ensemble de toutes les possibilités (l'espace des événements). Il est appelé événement certain car il est toujours réalisé.
- **Événement impossible** : C'est un événement qui n'a aucune possibilité de se réaliser. Il correspond à l'ensemble \emptyset .
- **Événements compatibles** : Ce sont deux événements qui peuvent être réalisés en même temps : $A \cap B \neq \emptyset$
- **Événements incompatibles (disjoints)** : Ce sont deux événements qui ne peuvent être réalisés simultanément : $A \cap B = \emptyset$

II. Rappels d'analyse combinatoire

L'analyse combinatoire, qui est une branche des mathématiques, comprend un ensemble de méthode qui a pour but d'apprendre à compter le nombre d'éléments d'un ensemble fini, ce n'est pas l'énumération de toutes les possibilités (souvent long et fastidieux) mais bien le dénombrement de celle-ci par un calcul. Les méthodes de dénombrement se classeront selon 3 catégories [9]:

- Les Multiplets
- Les arrangements,
- Les permutations,
- Les combinaisons.

II.1 Multiplets

Permet de compter le nombre de résultats d'expériences qui peuvent se décomposer en une succession de sous-expériences.

Principe : suppose qu'une expérience est la succession de m sous-expériences, si la i éme expérience a n_i résultats possibles pour $i = 1, \dots, m$, alors le nombre total de résultats possibles de l'expérience globale est :

$$n = \prod_{i=1}^m n_i = n_1 n_2 n_3 \dots n_m$$

Exemple : Vous achetez une valise à code 4 chiffres. Combien de possibilités avez-vous de choisir un code ?

$m = 4$ avec $n_1 = 10, n_2 = 10, n_3 = 10, n_4 = 10$, donc le nombre total de code possible est $10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^4$.

II.2 Arrangements

Etant donné un ensemble E de n objets, on appelle arrangements de p objets toutes suites ordonnées de p objets pris parmi les n objets. Le nombre d'arrangements de p objets pris parmi n est noté : A_n^p .

On a nécessairement $l \geq p \geq n \geq et n, p \in \mathbb{N}$.

Deux arrangements de p objets sont donc distincts s'ils diffèrent par la nature des objets qui les composent ou par leur ordre dans la suite.

Il faut distinguer le nombre d'arrangements avec répétition et le nombre d'arrangements sans répétition (arrangements au sens strict).

II.2.1 Arrangements avec répétitions: Lorsqu'un objet peut être observé plusieurs fois dans un arrangement, le nombre d'arrangement avec répétition de p objets pris parmi n , est alors:

$$A_n^p = n^p \quad (l \geq p \geq n).$$

Exemple d'arrangement avec répétitions : Combien de mots de 5 lettres peut-on former avec les 26 lettres de l'alphabet si on peut réutiliser les lettres ?

A chaque position (1 à 5) on peut mettre 26 lettres différentes $26 \times 26 \times 26 \times 26 \times 26 = 26^5$, donc c'est un arrangement de 26 lettres 5 à 5 avec répétition.

II.2.2 Arrangements sans répétitions: Lorsque chaque objet ne peut être observé qu'une seule fois dans un arrangement, le nombre d'arrangements sans répétition de p objets pris parmi n est alors :

$$A_n^p = n! / (n-p)! \quad (1 \leq p \leq n).$$

Exemple d'arrangement sans répétitions : Quel est le nombre de façons de tirer 3 cartes sans remise dans un jeu de 32 cartes ?

$$A_{32}^3 = 32! / (32-3)! = 32 \times 31 \times 30.$$

II.3 Permutations

Etant donné un ensemble E de n objets, on appelle une permutation de n éléments distincts e_1, e_2, \dots, e_n tout arrangement ordonné de n éléments dans E .

Il faut distinguer le nombre de permutations avec répétition et le nombre de permutations sans répétition (permutation au sens strict).

II.3.1 Permutation avec répétitions: Dans le cas où il existerait plusieurs répétitions k d'un même objet ou plusieurs objets (notée k_1, k_2, \dots, k_m) parmi les n objets, le nombre de permutations possibles des n objets doit être rapporté aux nombres de permutations des k_i objets identiques, il est alors :

$$P_{(n/k_i)} = n! / \prod_{i=1}^m k_i! \quad (1 \leq k_i \leq n).$$

Exemple de permutation avec répétitions : Combien de permutations distinctes peut-on former avec toutes les lettres du mot 'sociologique' ?

$$P_{(12/3,2)} = 12! / (3! 2!).$$

II.3.2 Permutation sans répétitions: Etant donné un ensemble E de n objets, on appelle permutations de n objets distincts toutes suites ordonnées de n objets ou tout arrangement n à n de ces objets, il est alors :

$$P_n = n!$$

Exemple de permutation sans répétitions : Le nombre des permutations des 3 éléments de l'ensemble $\{1, 2, 3\}$ est : $3!$, ces permutations sont : $(1, 2, 3), (1, 3, 2), (2, 1, 3), (2, 3, 1), (3, 2, 1), (3, 1, 2)$.

II.4 Combinaisons

Etant donné un ensemble E de n objets, on appelle combinaison de k éléments pris dans l'ensemble E tout sous-ensemble de k éléments de cet ensemble. Les éléments ne sont pas ordonnés.

Il faut distinguer le nombre de combinaisons avec remise et le nombre de combinaisons sans remise.

II.4.1 Combinaison sans remise: Étant donné un ensemble E de n objets, on appelle combinaisons de k objets tout ensemble de k objets pris parmi les n objets sans remise. Le nombre de combinaisons de k objets pris parmi n est noté: C_n^k , il est alors :

$$C_n^k = n! / k!(n-k)! = A_n^k / k! \quad (1 \leq k \leq n).$$

Exemple de combinaison sans remise : De combien de manières peut-on réaliser un circuit électronique composé de 3 résistances si l'on dispose de 7 résistances.

$$C_7^3 = 7! / 3!(4)!.$$

II.4.2 Combinaison avec remise: Étant donné un ensemble E de n objets, on appelle combinaisons de k objets tout ensemble de k objets pris parmi les n objets avec remise. Le nombre de combinaisons de k objets pris parmi n est noté: C_{n+k-1}^k , il est alors :

$$C_{n+k-1}^k = (n+k-1)!/k!(n-1)! \quad (I \geq k \geq n).$$

Exemple de combinaison avec remise : De combien de manières peut-on réaliser une combinaison de deux éléments pris de l'ensemble $\{1, 2, 3\}$ avec remise ?

$$C_{3+2-1}^2 = 4!/2!(2)!$$

Ces combinaisons sont : (1, 1), (1, 2), (1, 3), (2, 2), (2,3), (3, 3).

III. Algèbre des événements

Soit Ω l'ensemble d'issues d'une expérience aléatoire E , $P(\Omega)$ est l'ensemble des parties de Ω muni des opérations (U, \cap , complémentation). ($P(\Omega), U, \cap, -$) s'appelle algèbre des événements à l'expérience E .

On considère trois événements A, B et C de l'espace Ω , Les propriétés suivantes sont valables :

III.1 Commutativité de l'union et de l'intersection

Les propriétés de l'intersection et celles de l'union sont dites similaires (duales), car on obtient les unes des autres en remplaçant le signe de l'union par celui de l'intersection. L'intersection (ou l'union) de deux événements ne dépend pas de l'ordre dans lequel ces deux événements sont pris. On a donc:

$$A \cup B = B \cup A$$

Dans ce cas on dit que l'événement A ou l'événement B est réalisé.

Exemple : On lance un dé aléatoire, l'issue de cette expérience est le numéro de la face supérieure. Soit A l'événement 'le numéro est pair' et B l'événement 'le numéro est un multiple de 3', $A \cup B$ est 'les numéros 2, 3, 4, 6'.

$$A \cap B = B \cap A$$

Dans ce cas on dit que l'événement A et l'événement B sont réalisés.

Exemple : On lance un dé aléatoire, l'issue de cette expérience est le numéro de la face supérieure. Soit A l'événement 'le numéro est pair' et B l'événement 'le numéro est un multiple de 3', $A \cap B$ est 'le numéro est le numéro 6'.

III.2 Distribution de l'union et de l'intersection

L'intersection de l'union de deux événements avec un troisième événement est égale à l'union de l'intersection de chacune des événements avec le troisième événement :

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

L'union de l'intersection de deux événements avec un troisième événement est égale à l'intersection de l'union de chacune des événements avec le troisième événement :

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

III.3 Absorption

L'inclusion d'un événement B dans l'événement A signifie que la réalisation de l'événement B implique la réalisation de A . On a donc :

$$\forall B \subset A \Rightarrow A \cap B = B$$

III.4 Élément neutre et complémentation

On dit que deux événements A et \bar{A} sont complémentaires lorsqu'ils sont incompatibles, autrement dit si la réalisation de l'un implique la non-réalisation de l'autre, et que leur union correspond à l'univers des résultats possibles, on a les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \bar{\bar{A}} &= A \\ A \cup \bar{A} &= \bar{A} \cup A = \Omega \\ A \cap \bar{A} &= \bar{A} \cap A = \Phi \\ \overline{A \cup B} &= \bar{A} \cap \bar{B} \\ \overline{A \cap B} &= \bar{A} \cup \bar{B} \end{aligned}$$

IV. Axiomes et théorèmes des probabilités

Le passage d'une description des phénomènes aléatoires à l'élaboration d'un modèle mathématique se fait en introduisant les théorèmes de probabilité.

Dans une épreuve aléatoire donnée, la probabilité $P(A)$ est toute application de l'espace des événements Ω dans l'intervalle $[0,1]$, qui associe à chaque événement A de Ω , un nombre $P(A)$ tel que :

$$A \rightarrow P(A) : P(A) = \frac{\text{Nombre de cas favorables}}{\text{Nombre de cas possibles}}$$

et satisfait les axiomes suivantes :

- **Axiome (1)** : $\forall A \in \Omega \Rightarrow P(A) \geq 0$
- **Axiome (2)** : $P(\Omega) = 1$
- **Axiome (3)** : $\forall A, B \in \Omega : \text{si } A \cap B = \Phi \Rightarrow P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

IV.1 Théorème de probabilité totale

La formule des probabilités totales est un théorème qui permet de calculer la probabilité d'un événement en le décomposant suivant un système exhaustif d'événements [10].

Si $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ est un système complet d'événements, quel que soit l'événement B , alors:

$$P(B) = P(B|A_1)P(A_1) + P(B|A_2)P(A_2) + \dots + P(B|A_n)P(A_n)$$

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B | A_i) P(A_i)$$

Exemple : Une population animale comporte 1/3 de mâles et 2/3 de femelles. L'albinisme frappe 6 % des mâles et 0.36 % des femelles. Quelle est la probabilité pour qu'un individu pris au hasard (dont on ignore le sexe) soit albinos ?

Si $A = \{\text{m\^a}le\}$ et $\bar{A} = \{\text{femelle}\}$ constitue un syst\eme complet d'\ev\enements, $B = \{\text{albinos}\}$ et $\bar{B} = \{\text{non albinos}\}$ sachant que $P(B) = P(B|A)P(A) + P(B|\bar{A})P(\bar{A})$

Alors $P(B) = (0.06 \times 1/3) + (0.0036 \times 2/3) = 0.0224$, soit 2.24% d'albinos dans cette population.

IV.2 Th\eor\eme de probabilit\e conditionnelle

Soit deux \ev\enements A et B de l'espace Ω avec $P(B) \neq 0$. On appelle probabilit\e conditionnelle de A sachant B , not\ee $P_B(A)$ ou bien $P(A|B)$, le rapport donne par [11] :

$$P_B(A) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

Exemple : 4 % des fran\cais sont atteints du cancer du poumon, 75 % des malades sont des fumeurs, 60 % des fran\cais sont des fumeurs. Quel est la probabilit\e qu'un fumeur soit atteint du cancer ?

Soit A l'\ev\enement '\^etre atteint du cancer' et B l'\ev\enement ''\^etre fumeur'.

Nous avons: $P_A(B) = 0.75$, $P(A) = 0.04$ et $P(B) = 0.6$.

D'o\`u $P(A \cap B) = P(A)P_A(B)$; (probabilit\e qu'un fran\cais soit atteint de la maladie et fumeur)

$P_B(A) = P(A \cap B)/P(A)$; (probabilit\e qu'un fumeur soit atteint du cancer).

IV.3 Th\eor\eme de Bayes

Le th\eor\eme de Bayes est une cons\eq\ence imm\ediate des probabilit\es conditionnelles et des probabilit\es totales. Si $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ est un syst\eme complet d'\ev\enements, quel que soit l'\ev\enement B tel que $P(B) \neq 0$, alors [12] :

$$P(B) = P(A_1)P(B | A_1) + P(A_2)P(B | A_2) + \dots + P(A_n) \cdot P(B | A_n)$$

$$P(A_1 | B) = P(A_1)P(B | A_1)/P(B)$$

$$P(A_2 | B) = P(A_2) P(B | A_2)/P(B)$$

...

$$P(A_n | B) = P(A_n) P(B | A_n)/P(B)$$

Exemple : Dans une ville 1 habitant sur 100 est atteint d'une maladie chronique A , lors d'un d\epistage, le r\esultat est positif (T) ou n\egatif (\bar{T}). Sachant que :

$P(T | A) = 0.8$ et $P(\bar{T} | \bar{A}) = 0.9$.

Un patient \^etant tester positivement, quelle la probabilit\e qu'il soit atteint de cette maladie chronique A ?

$$P(A|T) = \frac{P(A \cap T)}{P(T)} = \frac{P(T \vee A)P(A)}{P(T \vee A)P(A) + P(T \vee \bar{A})P(\bar{A})} = \frac{0.8 * 0.01}{0.8 * 0.01 + 0.1 * 0.99} = 0.075$$

La probabilit\e d'\^etre malade avant le test \^etait $P(A) = 0.01$ (probabilit\e \`a priori) et apr\es le test est $P(A|T) = 0.075$ (probabilit\e \`a posteriori). On conclusion, le test ajoute un compl\ement d'information.

V. Application de la probabilité dans l'électronique

Dans plusieurs domaines scientifique, sociologique ou médical, on s'intéresse à des phénomènes dont l'effet du hasard est prépondérant. Ces phénomènes sont caractérisés par les résultats des observations qui changent d'une expérience à une autre. Une épreuve est dite 'aléatoire' s'il est impossible de prédire son résultat et si, refaite dans des conditions similaires, elle peut donner des résultats différents, on peut prendre comme exemple la durée de vie d'un composant, la durée de fonctionnement sans panne d'appareil. Ci-après, quelques exemples d'application de la probabilité dans le domaine d'électronique.

Les jeux de hasard sont l'application la plus naturelle des probabilités mais de nombreux autres domaines s'appuient ou se servent des probabilités, on peut citer par exemple:

On considère un système formé par plusieurs composants, on s'intéresse à la fiabilité du système : on va chercher à calculer la probabilité que le système fonctionne encore à un instant donné. Il faut pour cela connaître la probabilité que chacun des composants fonctionne à cet instant et tenir compte du fait que les composants ne fonctionnent peut-être pas indépendamment les uns des autres.

En télécommunications, on doit souvent tenir compte du 'bruit' dans les systèmes. Par exemple, supposons qu'un système émet soit un 0 , soit un 1 , et qu'il y a un risque pour que le chiffre émis soit mal reçu. Il est alors intéressant de calculer la probabilité qu'un 0 ait été émis, sachant qu'un 0 a été reçu, ou encore la probabilité qu'il y ait une erreur de transmission.

Les statistiques, sont un vaste domaine qui s'appuie sur les probabilités pour le traitement et l'interprétation des données.

La théorie des jeux s'appuie fortement sur la probabilité et est utile en économie et plus précisément en micro-économie.

L'estimation optimale par usage de la loi de Bayes, qui sert de fondement à une grande partie des applications de décision automatique (imagerie médicale, astronomie, reconnaissance de caractères, filtres anti-pourriel).

En physique ainsi qu'en biologie moléculaire l'étude du mouvement brownien pour de petites particules ainsi que les Équation de *Fokker-Planck* font intervenir des concepts s'appuyant sur le calcul stochastique et la marche aléatoire

Les mathématiques financières font un large usage de la théorie des probabilités pour l'étude des cours de la bourse et des produits dérivés. Citons par exemple le Modèle de *Black-Scholes* pour déterminer le prix de certains actifs financiers (notamment les options).

Les Etudes Probabilistes de Sécurité où l'on évalue la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable. C'est devenu un outil d'évaluation des risques dans bon nombre d'installations industrielles.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques rappels sur les notions de base de l'analyse combinatoire et de probabilité. Ensuite, nous avons présenté les axiomes et quelques théorèmes de probabilité 'totale, conditionnelle et théorème de Bayes' et donné quelques exemples de domaine d'application des probabilités.

Le prochain chapitre, introduira les différents types de systèmes ; série, parallèle et mixte (à configuration symétrique et non symétrique). Enfin, nous verrons l'application du théorème de Bayes sur les différentes configurations précédentes.

CHAPITRE 3. APPLICATION A LA FIABILITE DES THEOREMES DE PROBABILITES

Introduction

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, elle exprime l'aptitude à la continuité du service. La fiabilité, comme on l'a présentée dans le premier chapitre, caractérise l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant une durée de temps donné, d'un point de vue probabiliste, la fiabilité est la probabilité qu'un système soit non défaillant de manière continue pendant l'intervalle de temps $[0, t]$.

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 souvent faux d'où l'intérêt d'outils, de modèles ou de méthodes plus adaptées. Le calcul de la fiabilité des systèmes est influencé par les caractéristiques suivantes:

- La notion du taux de défaillance n'existe pas
- Le recueil des informations sur la fiabilité est plus difficile
- Le système est de plus en plus performant et compliqué
- Les défaillances ont des origines variées (la durée de vie des composants est principalement conditionnée par les problèmes de fatigue avec une forte influence des différentes contraintes.

Ainsi, le choix d'une loi de comportement du matériel (calcul de la fiabilité) devient une tâche très compliquée, la conduite du calcul est conditionnée par le choix convenable d'une loi de fiabilité décrivant le comportement des différents composants constituant une entité.

Pour calculer la fiabilité d'un système on doit en premier lieu définir un modèle, les modèles les plus utilisés dans la littérature sont : les modèles combinatoires, les modèles basés sur les chaînes de Markov, les modèles basés sur les réseaux de Pétri.

On s'intéresse dans cette partie aux modèles combinatoires qui utilisent le diagramme de blocs ou l'arbre de fautes pour le calcul de fiabilité totale du système. Ce calcul sera réalisé à partir d'une analyse quantitative par évaluation des probabilités d'occurrence de défaillances élémentaires.

Dans les systèmes chaque élément a un poids dans la fiabilité du système complet car cette dernière est calculée en fonction des fiabilités de tous ses éléments. Dans ce chapitre le calcul est effectué en supposant que le taux de défaillance (taux de panne), qui est à son tour déterminé à partir des modèles développés dans des bases de données ou bien à partir des tests réalisés sur ces composants ou encore à partir des résultats d'exploitation de ces derniers, est constant.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par la définition d'un système ainsi que la relation qui existe entre la fiabilité et la probabilité. Ensuite, nous présentons les différents types et configurations de systèmes et on termine par l'application du théorème de Bayes sur les différents types de systèmes.

I. Notions fondamentales

- **La fiabilité** caractérise l'aptitude d'un système ou d'un matériel à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné.

La notion de temps peut prendre la forme :

- De nombre de cycles effectués (machine automatique)
 - De distance parcourue (matériel roulant)
 - De tonnage produit (équipement de production)
- **Système**, un système est un ensemble d'éléments interconnectés, mis en service à l'instant $t = 0$, afin de réaliser une fonction donnée [13], On distingue deux types de systèmes (les systèmes réparables et les systèmes non réparables).
 - **Système réparable**, c'est un système qui peut être remis en état, une fois tombé en panne, par des opérations de maintenance corrective. C'est le cas de la majorité des systèmes électroniques, informatiques... etc.
 - **Système non réparable**, c'est un système qui est mis à la casse dès qu'il tombe en panne, c'est le cas des petits systèmes (piles, ampoules, etc.) ou des systèmes qui coûtent plus cher à réparer qu'à remplacer.

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. La défaillance (la non fiabilité) augmente les coûts d'après-vente (application des garanties, frais judiciaires,...etc.). Construire plus fiable augmente les coûts de conception et de production, en pratique, le coût total d'un produit prend en compte ces deux tendances.

Les prédictions de fiabilité des systèmes ont forcément un caractère probabiliste, car elles nécessitent la connaissance du taux de défaillance de chaque composant. La valeur de ces taux, étant obtenus sur des échantillons limités en taille, est gérée par des lois statistiques (intervalles de confiance notamment).

Le fondement mathématique de la fiabilité consiste en l'application des probabilités liée aux problèmes de durée de fonctionnement sans incidents. L'approximation la plus utilisée en électronique, suppose la distribution exponentielle des défaillances des composants qui permet d'additionner les taux de panne pour les sous-ensembles non redondants.

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

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

$$F(t) = P(T \leq t)$$

Le nombre $F(t)$ représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard ait une défaillance avant l'instant t . 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 .

III. Fiabilité des systèmes constitués de plusieurs composants

La fiabilité d'un système constitué de plusieurs composants, dépend à la fois de la fiabilité de chaque composant et de l'interconnexion (l'interaction) entre ces différents composants. Ainsi, la fiabilité d'un tel système est obtenue à partir de la fiabilité de tous ces composants.

III.1 Système série

Un système série est un dispositif, constitué de n composants montés en série. On dit qu'un système est un système série si le bon fonctionnement du système nécessite le bon fonctionnement des tous ses composants simultanément, autrement dit le système est en série si la défaillance d'un composant entraîne la panne de tout le système. Un exemple de représentation d'un système série est donné par la Figure III.1.



Figure III.1 Exemple de représentation d'un système 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 [14].

$$R_s = R_A * R_B * R_C * \dots * R_n$$

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

$$R(s) = R^n$$

Le système série fonctionne, si A et B, \dots , et n fonctionnent, cependant le système est défaillant si A ou B, \dots , ou n sont défaillants.

Exemple : Déterminer la fiabilité totale R_s du système suivant constitué de huit blocks connectés en série et ayant les fiabilités suivantes : Antenne $R_A = 0.98$, Ampli HF $R_{HF} = 0.96$, Ampli BF $R_{BF} = 0.94$, Haut-parleur $R_{HP} = 0.89$, Démodulateur $R_D = 0.97$, Changeur de Fréquence $R_{CF} = 0.93$, Fréquence Intermédiaire $RF_{I1} = RF_{I2} = 0.94$.

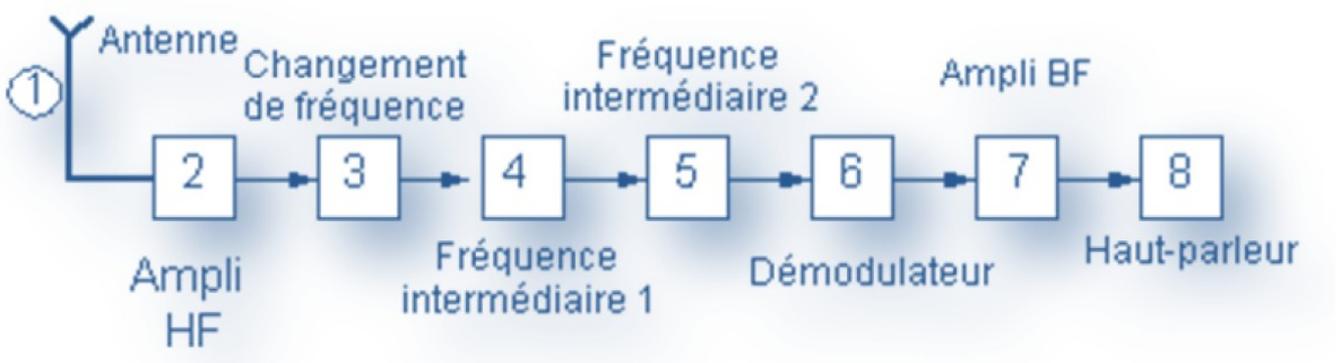


Figure III.2 Exemple de système en série

$$R_s = R_A \times R_{HF} \times R_{BF} \times R_{HP} \times R_D \times R_{CF} \times R_{F_{11}} \times R_{F_{12}}$$

$$R_s = 0.6674 \text{ (Soit une fiabilité de 66.74\%)}$$

III.2 Système parallèle

Un système parallèle est un dispositif constitué de n composants montés en parallèle. On dit qu'un système est un système parallèle si le bon fonctionnement du système nécessite le bon fonctionnement d'au moins un composant, autrement dit le système est en parallèle si la défaillance d'un composant n'entraîne pas la panne du système. Le système est en panne si tous les composants sont défaillants (typiquement les systèmes de redondance dans les avions, les fusées ou les centrales nucléaires). Un exemple de représentation d'un système parallèle est donné par la Figure III.3.

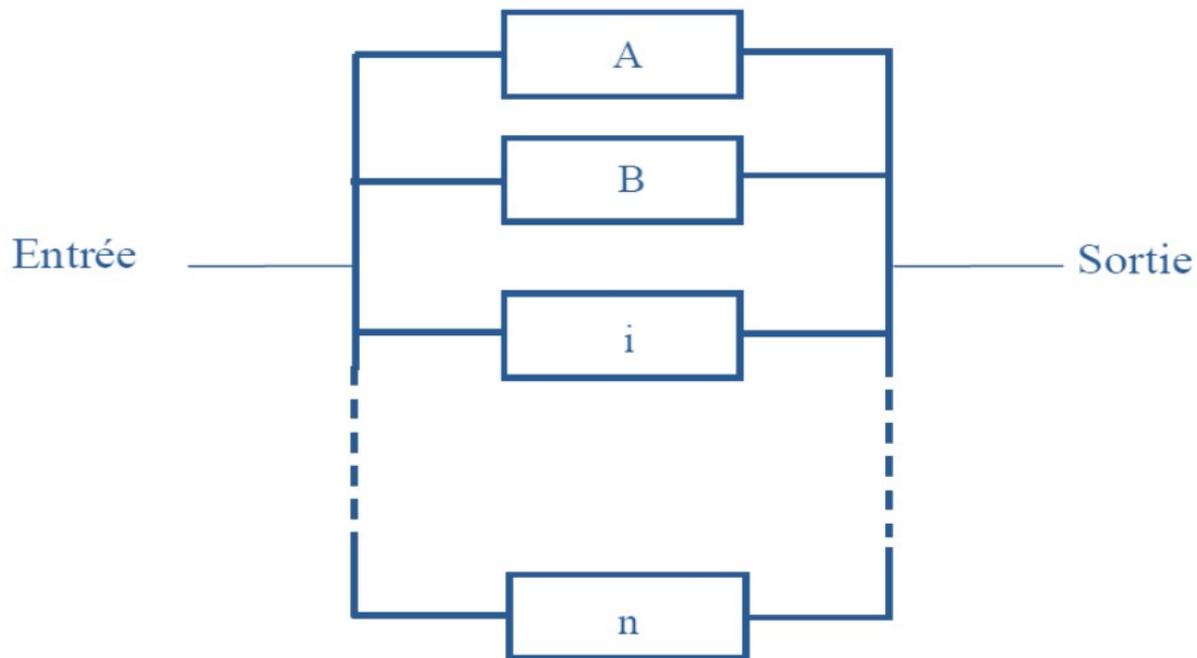


Figure III.3. Exemple de représentation d'un système en parallèle

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_i est son complémentaire:

$$F_i = 1 - R_i$$

F_i représentant la probabilité de panne associée.

Soit les n composants de la figure ci-dessus montés en parallèle. Si la probabilité de panne pour chaque composant repéré i est notée F_i alors:

$$R_s = 1 - (1 - R_i)^n$$

Le système parallèle fonctionne, si A ou B , ... , ou n fonctionnent, cependant le système est défaillant si A et B , ... , et n sont défaillants.

Exemple : Trois composants A , B et C ayant les fiabilités respectives suivantes : $R_A = 0.85$, $R_B = 0.95$, $R_C = 0.86$ sont connectés en parallèle.

Déterminer la fiabilité R_S globale du système.

$$R_S = 1 - (1 - R_A) (1 - R_B) (1 - R_C) = 99.895\%$$

Déterminer la fiabilité de l'ensemble dans le cas où les trois composants ont la même fiabilité $R_A = R_B = R_C = 0.85$

$$R_S = 1 - (1 - 0.85)^3 = 99.662\%$$

Combien de composants de même fiabilité (86%) doit-on mettre en parallèle pour avoir une fiabilité globale de 99.9% ?

$$R_S = 0.999 = 1 - (1 - 0.85)^n = 1 - (0.15)^n \Rightarrow (0.15)^n = 1 - 0.999 = 0.001$$

En utilisant les logarithmes népériens on aura:

$$n \ln(0.15) = \ln(0.001) \Rightarrow n = 3.641$$

Ce qui implique avoir au moins 4 composants en parallèle.

III.3 Système mixte à configuration symétrique

Ce type de systèmes est constitué de sous-systèmes en série et des sous-systèmes en parallèle. La fiabilité de ces systèmes est évaluée en décomposant le système en sous-systèmes (séries et parallèles) et chaque sous-système est réduit en un seul composant. On distingue deux types de systèmes mixtes à configuration symétrique: système série-parallèle et système parallèle-série [15].

III.3.1 Système série-parallèle: Ce type de système est constitué de m sous-systèmes connectés en parallèle tel que chaque sous-système est composé de n éléments placés en série. Un exemple de représentation d'un système parallèle est donné par la Figure III.4.

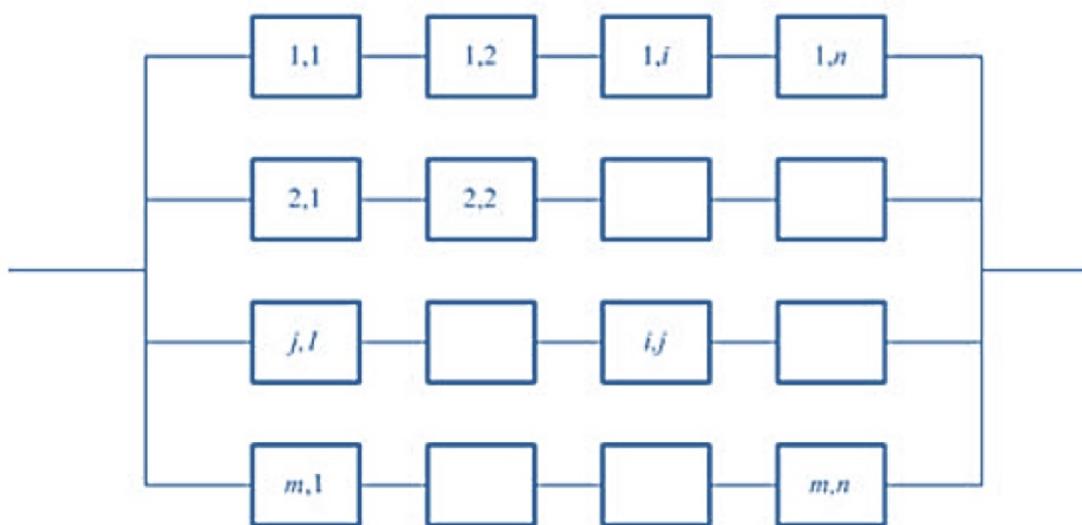


Figure III.4. Exemple de représentation d'un système série-parallèle

La fiabilité d'un système série-parallèle, résultant de la combinaison d'un système série et d'un système parallèle, peut être calculée en le décomposant en un système parallèle et en modélisant chaque sous-système série par un seul composant. Dans ce cas, la fiabilité d'un sous-système en série i est donnée comme suit [13]:

$$R_i = \prod_{j=1}^n R_{ij}$$

D'où la fiabilité R_S du système complet :

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_i) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - \prod_{j=1}^n R_{ij})$$

III.3.2 Système parallèle-série: Ce type de système est constitué de n sous-systèmes connectés en série tel que chaque sous-système est composé de m éléments placés en parallèle. Un exemple de représentation d'un système parallèle est donné par la Figure III.5.

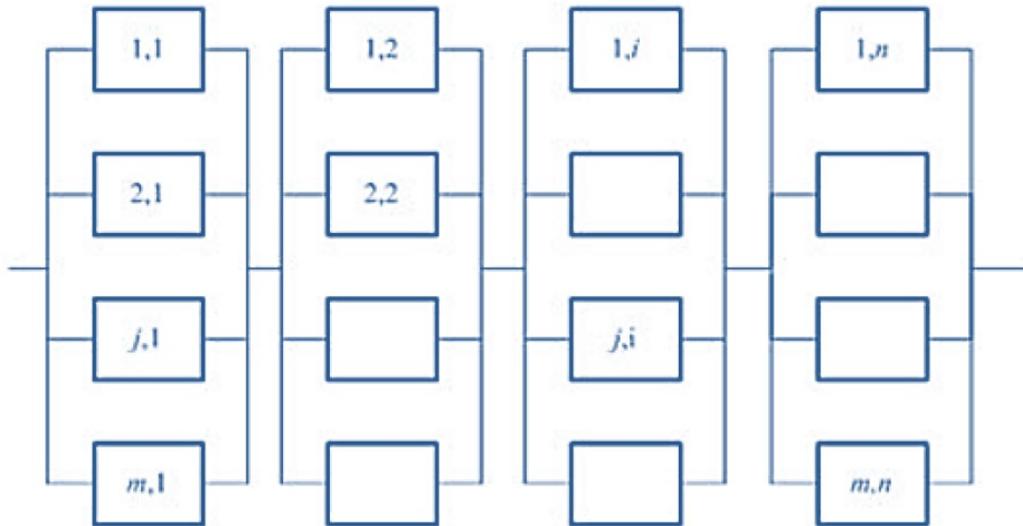


Figure III.5. Exemple de représentation d'un système parallèle-série

De même, la fiabilité d'un système parallèle-série, résultant de la combinaison d'un système parallèle et un système série, peut être calculée en le décomposant en un système série et en modélisant chaque sous-système parallèle par un seul composant. Dans ce cas, la fiabilité d'un sous-système en parallèle j est donnée comme suit [13]:

$$R_j = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_{ij})$$

D'où la fiabilité R_S du système complet :

$$R_S = \prod_{j=1}^n R_j = \prod_{j=1}^n (1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_{ij}))$$

III.4 Système mixte à configuration non symétrique

Ce type de systèmes résulte de la combinaison des structures séries avec des structures parallèles d'une manière non symétrique (complexe). La fiabilité de ces systèmes est évaluée en décomposant le système complet en sous-systèmes séries et sous-systèmes parallèles) et chaque sous-système est réduit en un seul composant. Un exemple de représentation d'un système parallèle est donné par la Figure III.6.

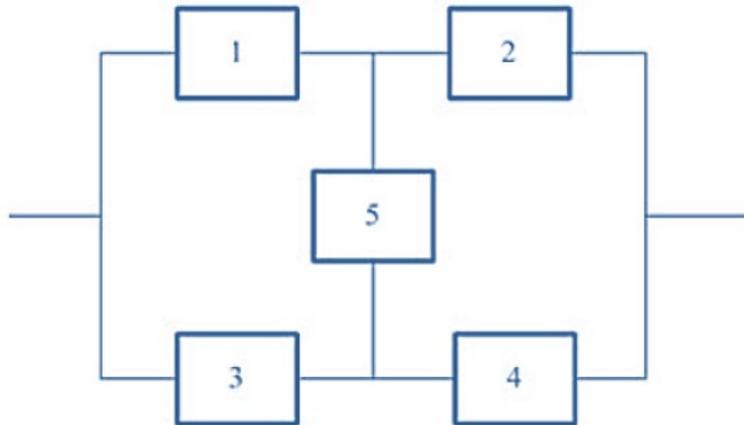


Figure III.6. Exemple de représentation d'un système mixte à configuration non symétrique

IV. Application du théorème de Bayes sur les configurations précédentes

L'application du théorème de Bayes en fiabilité utilise la notion de loi de probabilité à priori et de loi de probabilité à posteriori, dont les paramètres sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance. Ceci est le principe d'actualisation dynamique des connaissances utilisé particulièrement pour les banques de données. La méthode bayésienne nous permet d'intégrer et d'utiliser l'information au-delà de celles contenues dans les données expérimentales.

Un spécialiste de la fiabilité saura souvent d'autres informations pertinentes sur la valeur des paramètres de fiabilité inconnus. Cette approche ne répond pas seulement à la demande de prédiction de paramètres de fiabilité dans le futur à partir de la connaissance présente et passée, mais aussi à la nécessité de définir les paramètres d'un système dès sa conception

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions fondamentales concernant les systèmes en fiabilité, puis défini deux fonctions essentiels à la compréhension de ce chapitre, à savoir la fonction de fiabilité et la fonction de défaillance, puis présenté les différents types de systèmes ; séries, parallèles et mixtes (à configuration symétrique et non symétrique). Enfin, nous avons illustré l'application du théorème de Bayes sur les différentes configurations précédentes.

Dans le prochain chapitre, nous allons découvrir les notions de taux de défaillance, le temps moyen de bon fonctionnement ainsi que les fonctions de répartition et de densité de probabilité des défaillances. Ensuite, nous présenterons les lois utilisées usuellement en fiabilité ; *Exponentielle*, de *Weibull*, *Binomiale* et loi de *Poisson*. A la fin du chapitre, nous allons donner des détails sur l'arbre de défaillance.

CHAPITRE 4. LES DÉFAILLANCES

Introduction

L'analyse du retour d'expérience des banques de données sur les défaillances des équipements industriels fait ressortir qu'elles sont dues à plusieurs causes retenus lors de leur conception, de leur transport et de leur utilisation. Pendant le fonctionnement, les équipements sont soumis à des sollicitations mécaniques, thermiques, à des environnements agressifs et des phénomènes de vieillissement. La connaissance des mécanismes de dégradation et de défaillance est indispensable lors de la conception et la mise en marche des équipements pour sélectionner les matériaux et l'environnement qui assureront une fiabilité et une durée de vie optimale. La connaissance de ces mécanismes est également incontournable en diagnostic pour rechercher les causes des défaillances afin de sélectionner les actions correctives et pour estimer et prédire la durée de vie utile restante (*DVUR*) et la durée estimée de fonctionnement avant défaillance (*DEFAD*).

Au début, la fiabilité s'intéressait uniquement aux systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial, etc.). De nos jours, la fiabilité est devenue un paramètre très important dans l'étude de la majorité des équipements et des processus industriels. Le concept de fiabilité se traduit généralement dans la pratique comme étant l'aptitude d'une entité à avoir une faible fréquence de défaillance. La meilleure façon de connaître la fiabilité d'un équipement provient de l'analyse de ses taux de défaillance quand il est en plein service.

La fiabilité et la disponibilité prévisionnelle et opérationnelle représentent des enjeux majeurs pour la compétitivité des secteurs industriels exploitant des équipements techniques. Ces indicateurs de performance mesurés pendant la durée de vie des équipements dépendent en grande partie du choix des matériaux retenus lors de leur conception. Cette phase doit prendre en compte leurs conditions d'exploitation, de maintenance et d'environnement pour sélectionner les matériaux assurant une durée de vie optimale. La connaissance des mécanismes fondamentaux de défaillance des équipements est indispensable pour établir des programmes de maintenance préventive et prévisionnelle, réaliser les diagnostics avant et après défaillance et fournir un pronostic du temps de fin de vie utile des équipements.

Le présent chapitre a pour objectif de comprendre les notions de défaillance, les causes qui induisent à la défaillance des équipements et les différents modes et mécanismes de défaillance, le taux de défaillance ainsi que la fonction de répartition et la densité de probabilité des défaillances. Ensuite, nous introduisons les lois utilisées usuellement dans la fiabilité tels que ; loi exponentielle, loi de Weibull, loi binomiale, et loi de poisson. A la fin, on présente les arbres de défaillance.

I. Notions fondamentales

- La définition de *la défaillance* est donnée selon l'AFNOR (norme NF X 60 – 011) par: 'altération ou cessation d'un bien à accomplir sa fonction requise' [17]. Autrement dit la défaillance peut être définie comme étant le passage d'un bien d'un état de bon fonctionnement à un état de panne. Autres synonymes usuels non normalisés : 'failure' (anglais), dysfonctionnement, dommages, dégâts, anomalies, avaries, incidents, défauts, pannes, détériorations.

Une défaillance peut être :

- ✓ Partielle : s'il y a altération d'aptitude du bien à accomplir sa fonction requise.
- ✓ Complète : s'il y a cessation d'aptitude du bien à accomplir sa fonction requise.
- ✓ Intermittente : si le bien retrouve son aptitude au bout d'un temps limité sans avoir subi d'action corrective externe.

Un système est déclaré défaillant lorsque ses grandeurs caractéristiques évoluent en dehors des tolérances définies lors de la conception.

- **Une fonction requise** est la fonction d'un produit dont l'accomplissement est nécessaire pour la fourniture d'un service donné [5]. Une fonction requise pourra être une fonction seule ou un ensemble de fonctions.
- **La sûreté de fonctionnement (SdF)** d'un système est l'ensemble des propriétés qui décrivent la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent : fiabilité, maintenabilité, et logistique de maintenance [5]. C'est la propriété qui permet à ses utilisateurs de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre. On dit aussi que la **SdF** est la science des défaillances. La sûreté de fonctionnement est une notion générale sans caractère quantitatif.

La défaillance est la conséquence d'un défaut, dont la cause est une faute.

- **Une faute** peut être physique (interne ou externe) ou due à l'utilisateur. C'est la notion de *5M* : Matières, Matériel, Milieu, Moyens et Main d'œuvre.
- **Un défaut** peut être *soudain* (s'il était imprévisible), *catalectique* (s'il est soudain et irréversible), *progressif* (s'il était prévisible et éventuellement réversible), *précoce* (s'il se manifeste en début de vie de l'équipement), *d'usure* (s'il se manifeste en fin de vie de l'équipement).
- **Une Dégradation** est l'évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une cause externe [5]. C'est l'état d'un bien présentant une perte de performances d'une des fonctions assurées par celui-ci, ou continue à accomplir une partie seulement de ces fonctions requises. Une dégradation peut conduire à la défaillance, on fait souvent référence à une dégradation en parlant d'usure.
- **Une Panne** est l'état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation, (On ne va pas prendre en considération l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures) [5].
- **Le mécanisme de défaillance** est le processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou qui ont conduit à une défaillance [5].
- **Le mode de défaillance** est l'effet par lequel une défaillance se manifeste.
- **La cause de défaillance** est les circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance [5].

Les défaillances peuvent être classifiées selon plusieurs critères, parmi les classes proposées par l'**AFNOR (norme NF X 60 – 500)** on retrouve [18]:

- En fonction de **la vitesse d'apparition** :
 - ✓ Défaillance progressive : défaillance due à une évolution progressive des caractéristiques d'un bien. En général, elle peut être repérée par une inspection ou un contrôle antérieur. Elle peut aussi être évitée par la mise en place d'une maintenance spécifique. Ces défaillances concernent principalement les organes mécaniques.

- ✓ Défaillance soudaine : défaillance brutale, elle est due à une évolution quasi instantanée des caractéristiques d'un bien. Une anticipation de ce type de défaillance est impossible pour effectuer une intervention avant la manifestation de cette défaillance.
- En fonction de *l'instant d'apparition* :
 - ✓ Défaillance en fonctionnement: défaillance se produisant sur l'entité, alors que la fonction requise est utilisée
 - ✓ Défaillance à l'arrêt: défaillance se produisant sur l'entité, alors que la fonction requise n'est pas utilisée.
 - ✓ Défaillance à la sollicitation: défaillance se produisant au moment où la fonction requise est sollicitée.
- En fonction du *degré d'importance* :
 - ✓ Défaillance partielle: défaillance qui entraîne l'inaptitude d'une entité à accomplir certaines fonctions requises, mais non toutes.
 - ✓ Défaillance complète: défaillance qui entraîne l'inaptitude totale de l'entité à accomplir toutes les fonctions requises.
 - ✓ Défaillance intermittente : défaillance d'un dispositif pour une période de temps limité, après laquelle le dispositif retrouve son aptitude à accomplir la fonction requise sans avoir été soumis à une action corrective extérieure. De telles défaillances sont souvent répétitives.
 - ✓ Défaillance permanente : au contraire à la précédente, pour cette défaillance on est besoin d'une action de réparation pour que le système puisse fonctionner correctement.
- En fonction des *causes* :
 - ✓ Défaillance due à une faiblesse inhérente : défaillance attribuable à une faiblesse inhérente au dispositif lui-même lorsque les contraintes ne sont pas au-delà des possibilités données du dispositif (faiblesse due à la conception ou à la réalisation du dispositif).
 - ✓ Défaillance due à un mauvais emploi : défaillance attribuable à l'application de contraintes en utilisation au-delà des possibilités données du dispositif ou attribuable à un manque de précaution dans son utilisation.
 - ✓ Défaillance par fausse manœuvre: défaillance d'une entité causée par une opération incorrecte dans son utilisation.
 - ✓ Défaillance première : défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte n'est pas la défaillance d'un autre dispositif.
 - ✓ Défaillance seconde : défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte est la défaillance d'un autre dispositif (c'est une défaillance externe au dispositif).
- En fonction des *conséquences* :
 - ✓ Défaillance critique : défaillance qui empêche l'accomplissement de la mission et fait encourir des risques de blessures graves à des personnes ou des dégâts très importants au matériel.
 - ✓ Défaillance majeure: défaillance qui risque de réduire l'aptitude d'un dispositif plus complexe à accomplir la fonction requise.
 - ✓ Défaillance mineure: défaillance qui n'est pas susceptible d'affecter de façon importante une fonction considérée comme d'importance majeure.
- En fonction de leur *caractère* :

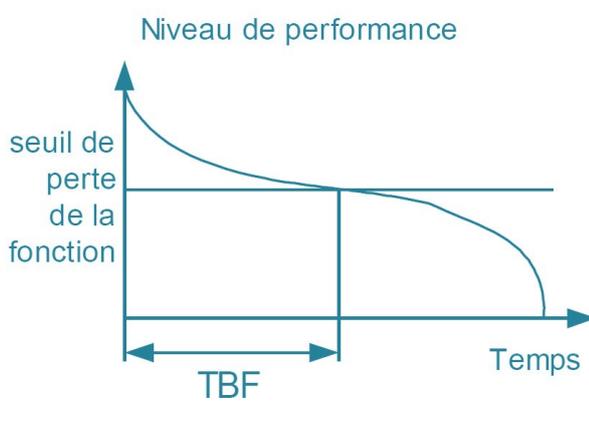
- ✓ Défaillance systématique: défaillance liée d'une manière certaine à une cause qui ne peut être éliminée que par une modification de la conception, du procédé de fabrication, du mode d'emploi, de la documentation, ou d'autres facteurs appropriés
 - ✓ Défaillance reproductible: défaillance qui peut être provoquée à volonté en simulant ou en reproduisant ses causes.
 - ✓ Défaillance non reproductible: défaillance se produisant dans des conditions telles que l'application de ses causes (volontairement ou involontairement) ne reproduit jamais la défaillance, ou que la reproduction est impossible à réaliser
- En fonction de leur *origine* :
- ✓ Défaillances de causes intrinsèques : défaillances dues à une mauvaise conception du bien, à une fabrication non conforme du bien ou à une mauvaise installation du bien. Les défaillances par usure (liées à la durée de vie d'utilisation) et par vieillissement (liées au cours du temps) sont des défaillances intrinsèques.
 - ✓ Défaillance de causes extrinsèques : défaillances de mauvais emploi, par fausses manœuvres, dues à la maintenance, conséquences d'une autre défaillance.
- En fonction du *moment où elle se manifeste par rapport au cycle de vie de l'entité* :
- ✓ Défaillance précoce : défaillances qui se manifestent au début ; dans ce cas elle se rapporte à la période de déverminage.
 - ✓ Défaillance aléatoire : défaillances qui se produisent durant le cycle de vie utile de l'entité.
 - ✓ Défaillance d'usure : défaillances qui se rapportent à la fin du cycle de vie du produit par des processus de détérioration par usure, corrosion, échauffement, etc.

La combinaison de deux classes (suivant le degré d'importance et la vitesse d'apparition) nous donne une autre classe :

- ✓ Défaillance par dégradation: défaillance qui est à la fois progressive et partielle.
- ✓ Défaillance catalectique: défaillance qui est à la fois soudaine et complète.

Les défaillances se manifestent selon l'un des deux modèles ci-dessous (Figure IV.1) :

Modèle de dégradation



Modèle catalectique :

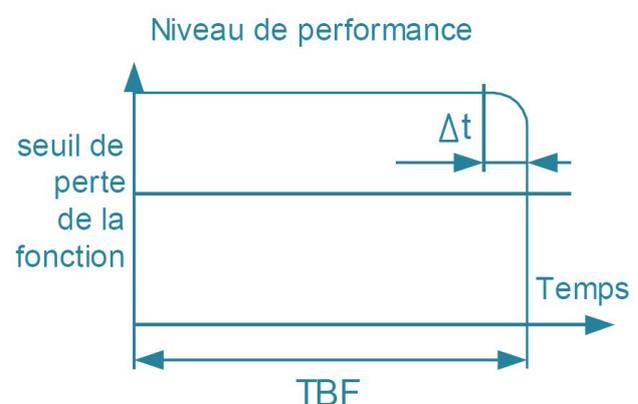


Figure IV.1 Modèle de défaillance par dégradation et catalectique

II. Fonction de répartition et densité de probabilité des défaillances

La durée de vie d'un dispositif, qui est une variable aléatoire continue et positive notée T , est la période de temps qui sépare l'instant de sa mise en marche de l'instant d'apparition de sa première défaillance ou entre deux défaillances consécutives. Pour des raisons de simplification, on choisit $t = 0$ comme origine des temps quand le dispositif est mis en marche pour la première fois [14].

II.1 Fonction de répartition des défaillances

En théorie des probabilités, la fonction de répartition, ou fonction de distribution cumulative, d'une variable aléatoire réelle X est la fonction en escalier F_X qui, à tout réel x , associe la probabilité d'obtenir une valeur inférieure ou égale [19] :

$$F_X(x) = P(X \leq x)$$

Cette fonction est caractéristique de la loi de probabilité de la variable aléatoire, elle permet de calculer la probabilité de chaque intervalle semi-ouvert à gauche $]a, b]$ où $a < b$, par :

$$P(X \in]a, b]) = P(a < X \leq b) = F_X(b) - F_X(a)$$

II.2 Fonction densité de probabilité

La fonction de densité de probabilité, notée $f(t)$, représente la probabilité de défaillance d'un dispositif à l'instant t . Elle est donnée par :

$$f(t) = dF(t)/dt = -dR(t)/dt$$

III. Indices de fiabilité

III.1 Taux instantané de défaillance

Soit T une variable aléatoire réelle continue de fonction de répartition $F(t)$, de fonction de densité $f(t)$ et de fonction de fiabilité $R(t)$.

Le taux de défaillance noté $\lambda(t)$ représente la probabilité d'avoir une défaillance entre $[t, t + dt]$, sachant qu'il n'y a pas eu de défaillance entre sur $[0, t]$. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. Pour une période de travail donnée, durée totale en service actif :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

La courbe ci-dessous montre l'évolution du taux des défaillances pour les différentes entités. Les courbes du taux de défaillance, Figure IV.2 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.

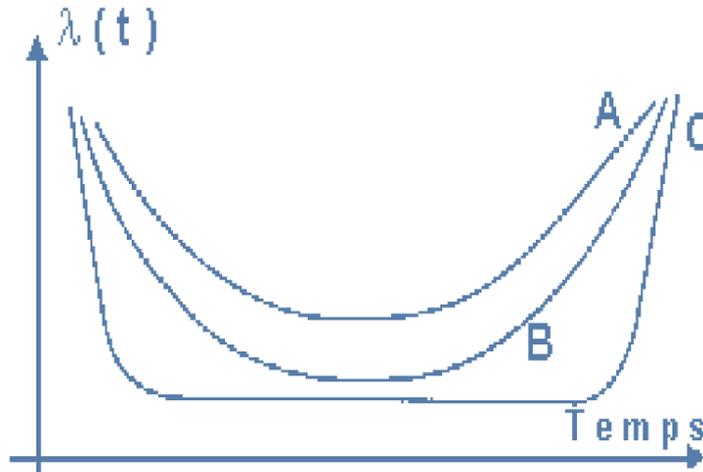


Figure IV.2 Courbes caractéristiques du taux de défaillance

Le Tableau IV.1 résume les liens entre les fonctions usuelles de fiabilité.

Tableau IV.1 Relation entre les fonctions usuelles de fiabilité

	$f(t)$	$F(t)$	$R(t)$	$\lambda(t)$
$f(t)$	—	$\frac{dF(t)}{dt}$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\lambda(t) \exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$
$F(t)$	$\int_0^t f(x)dx$	—	$1 - R(t)$	$1 - \exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$
$R(t)$	$\int_t^\infty f(x)dx$	$1 - F(t)$	—	$\exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$
$\lambda(t)$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(x)dx}$	$\frac{dF(t)}{1-F(t)}$	$-\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$	—

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 IV.3. 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.

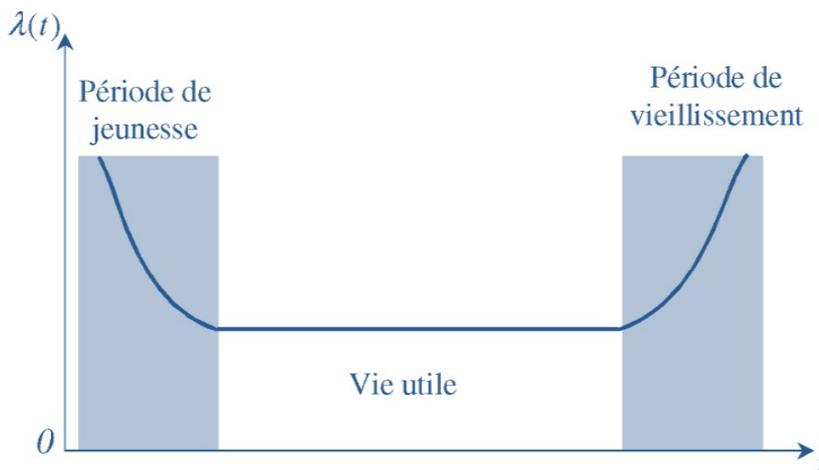


Figure IV.3 La courbe en baignoire

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). De nombreux éléments, tels que les composants électroniques, ont un taux de défaillance qui évolue de cette manière là.

III.2 Temps Moyen de Bon Fonctionnement (MTBF)

Le *MTBF* (Mean Time Between Failure) 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 .

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t) dt$$

Physiquement le *MTBF* peut être exprimé par le rapport des temps.

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

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

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

IV. Lois de probabilité usuelles utilisées en fiabilité

Quand le nombre d'épreuves croît indéfiniment, les fréquences enregistrées de l'évènement étudié tendent vers les probabilités et les distributions constatées tendent vers les lois de probabilité [10]. La fiabilité est une mesure quantitative nécessitant la connaissance des distributions des taux de défaillances et de la durée de vie de l'équipement afin de l'estimer au mieux.

Une loi de probabilité est un modèle qui représente au mieux, une distribution de fréquences d'une variable aléatoire. On distingue deux types de lois de probabilité utilisées en fiabilité : lois discrètes et lois continues [20]. Les lois discrètes prennent leurs valeurs dans N (valeurs entières, on peut citer comme exemple nombre de pannes). On compte parmi les lois discrètes : *loi de Poisson*, *loi Binomiale*, *loi de Bernoulli*, *loi Géométrique* et *loi Uniforme*. Les valeurs des lois continues sont variables avec le temps t . On peut citer comme exemples de lois continues : *loi de Weibull*, *loi exponentielle*, *loi normale*, *loi Log normale*, *loi du Khi deux*, *loi Gamma*, *loi de Cauchy*, *loi Bêta* et *loi de Fisher* [11].

Vu la complexité de toutes ces lois, on étudiera que les lois qui sont très utilisées dans le calcul de la fiabilité des systèmes. Ainsi, on étudiera :

- Pour les lois discrètes : *loi binomiale* et *loi de poisson*.
- Pour les lois continues : *loi Weibull* et *loi exponentielle*.

IV.1 Loi Binomiale

La *loi Binomiale* est l'une des lois les plus utilisées en statistique appliquée. La loi Binomiale, qui est une loi de probabilité caractérisée par les paramètres n ($n \geq 1$) et p ($0 < p < 1$), correspond à une expérience aléatoire

à deux issues appelées ‘succès’ et ‘échec’, où la probabilité d’un succès est p . Si une défaillance X a une probabilité p d’apparition, la probabilité de la voir k fois en n tests est donnée par [10]:

$$P(k) = P(X = k) = C_k^n p^k (1 - p)^{n-k}$$

Si p est la probabilité de défaillance alors $(1-p)$ est la probabilité de bon fonctionnement.

Pour n très important, le calcul de $P(X)$ devient impossible, à moins que l’on cherche à évaluer le logarithme de l’expression précédente à la place de l’expression elle-même. Ainsi, on distingue deux cas de figure :

- Si n tend vers l’infini et p tend vers 0, la *loi Binomiale* converge vers une *loi de Poisson* de paramètre a . Dans la pratique, on convertit la *loi Binomiale* en une *loi de Poisson* pour $n > 30$ et $np < 5$ ou pour $n > 50$ et $p < 0.1$.
- Si n tend vers l’infini et p et $(1 - p)$ sont proches, la *loi Binomiale* converge vers une *loi Normale*. En pratique, la *loi Binomiale* est convertit en une loi Normale pour $n > 30$, $np > 5$ et $n(1-p) > 5$.

IV.2 Loi de Poisson

La *loi de Poisson* s’applique généralement aux phénomènes imprévisible et inattendu, où la probabilité de réalisation est tres faible ($p < 0.05$). Comme elle peut aussi, dans certains cas, être définie comme limite d’une loi Binomiale.

On dit qu’une variable aléatoire X suit une *loi de Poisson* si elle prend les valeurs entières $0, 1, 2, 3, \dots, n$. La probabilité pour que X soit égale à k est donnée par [10] :

$$P(X = k) = e^{-\lambda} \frac{(\lambda)^k}{k!}$$

Avec :

λ : Nombre moyen d’événement par unité de temps.

La probabilité de constater un certain nombre de défaillances (n) dans un temps (t) et seulement (n) défaillances est donnée par :

$$P(X = n) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!}$$

IV.3 Loi de Weibull

La loi de *Weibull* est la loi la plus populaire dans le domaine de la fiabilité. Cette popularité est due notamment à sa forme flexible et au fait qu’elle englobe d’autres lois de probabilité (i.e. *loi exponentielle* et *loi de Rayleigh*). Elle est souvent définie par deux paramètres, le paramètre de forme β (qui régit la forme de la distribution) et le paramètre d’échelle η (qui régit l’aplatissement ou l’étendue de la distribution ‘durée de vie moyenne’). Un troisième paramètre est parfois considéré, le paramètre de localisation γ (qui régit la position de la distribution ‘le décalage, souvent égale à 0’), il permet de prendre en considération un éventuel décalage du point de départ de la courbe par rapport à l’origine.

La loi de *Weibull* caractérise exactement le comportement d’un matériel au cours de sa durée de vie selon les valeurs de β :

- $\beta < 1$ (taux de défaillance décroissant),
- $\beta = 1$ (taux de défaillance constant),
- $\beta > 1$ (taux de défaillance croissant).

La loi de *Weibull* est caractérisée par :

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

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\eta}}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

IV.4 Loi exponentielle

La plupart des phénomènes naturels subissent le processus de vieillissement. Cependant, il existe des phénomènes où il n'y a pas de vieillissement ou d'usure. Il s'agit dans ce cas des phénomènes accidentels. La loi *exponentielle*, qui est un cas particulier de la loi de *Weibull*, décrit la durée de vie des dispositifs qui subissent des phénomènes accidentels.

La loi exponentielle est applicable dans plusieurs domaines. Elle est souvent utilisée pour décrire la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales, ce qui justifie sa réputation dans le domaine de la fiabilité électronique. Cette loi est définie par un seul paramètre, le taux de défaillance λ .

Ainsi, la probabilité qu'un dispositif soit toujours en vie ou ne tombe pas en panne avant un délai donné sachant qu'il est en bon état à l'instant t , est indépendante du temps. Par exemple, la probabilité qu'un verre en cristal soit cassé dans les 3 ans à venir ne dépend pas de sa date de fabrication ni de son âge. Par définition, on dit qu'une durée de vie est sans usure si la probabilité de survie à l'instant t est indépendante du temps.

La loi *exponentielle* est caractérisée par:

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

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$\lambda(t) = \lambda$$

V. Arbre de défaillance

L'arbre de défaillance a été inventé à l'origine par des ingénieurs, puis ils ont été formalisés par les mathématiciens et les informaticiens ont développé des logiciels pour les manipuler. C'est une technique déductive, qui à partir d'un résultat on revient aux causes, très utilisée dans les études de fiabilité des systèmes.

Elle consiste à représenter graphiquement les combinaisons possibles des événements, ainsi que leur probabilité d'apparition, qui entraînent la réalisation d'un événement indésirable prédéfini 'défaillance'.

Basée sur l'algèbre de Boole relative à la théorie des ensembles, l'arbre de défaillance permet ainsi de quantifier la probabilité d'occurrence de l'évènement indésirable.

Un arbre de défaillance représente de façon synthétique l'ensemble des combinaisons d'événements qui, dans certaines conditions produisent un événement donné, point de départ de l'étude. Construire un arbre de défaillance revient à répondre à la question 'comment tel événement peut-il arriver?', ou encore 'quels sont tous les enchaînements possibles qui peuvent aboutir à cet événement?'.

La technique des arbres de défaillance est un outil graphique permettant de visualiser clairement les causes d'un événement indésirable à l'aide d'une structure arborescente. Plusieurs symboles graphiques sont utilisés dans la représentation de cette technique, les symboles de base utilisés dans les arbres de défaillances sont classés en plusieurs types :

- Événements
- Portes

- Symboles de transfert.

Dans les logiciels permettant d'éditer des arbres de défaillances, on pourra constater des variations mineures, quelques-uns de ces symboles sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 Quelques symboles graphiques utilisés dans la représentation les arbres de défaillances

Symbole	Nom	Description
	Événement de Base	Événement du plus bas niveau pour lequel la probabilité d'apparition ou d'information de fiabilité est disponible.
	Événement maison	Événement qui doit se produire avec certitude lors de la production ou de la maintenance. On peut aussi le définir comme un événement non-probabilisé, que l'on doit choisir de mettre à 1 ou à 0 avant tout traitement de l'arbre. Ce type d'événement permet d'avoir plusieurs variantes d'un arbre sur un seul dessin, en modifiant la logique de l'arbre selon la valeur choisie par l'utilisateur.
	Événement non développé	Le développement de cet événement n'est pas terminé, soit parce que ses conséquences sont négligeables, soit par manque d'information.
	OU (OR)	L'événement de sortie apparaît si au moins un des événements d'entrées apparaît.
	ET (AND)	L'événement de sortie apparaît si tous les événements d'entrées apparaissent.
	NON (NOT)	L'événement de sortie apparaît si l'événement d'entrée n'apparaît pas. L'état logique de la sortie est l'inverse de celui d'entrée.
	VOTE MAJORITAIRE	L'événement de sortie apparaît si au moins k événements d'entrées apparaissent ($k < n$).

L'arbre de défaillance est formé de niveaux successifs d'événements s'articulant sur des portes logiques. La première ligne (le 1^{er} niveau) ne comporte que l'événement indésirable dont on cherche à décrire la manière de son apparition. Chaque ligne détaille l'événement de la ligne précédente en présentant les combinaisons susceptibles de le produire. Les relations entre les différentes lignes sont représentées par des portes logiques, les étapes suivantes sont à suivre :

- Identifier l'évènement indésirable (sommet de l'arbre),
- Imaginer les évènements secondaires possibles expliquant l'évènement indésirable,
- Chaque évènement secondaire devient le nouvel évènement indésirable,
- Imaginer les causes possibles de chaque évènement secondaire au niveau considéré,
- Descendre progressivement dans l'arbre jusqu'aux évènements élémentaires de base.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions fondamentales sur la défaillance et leur classification, la fonction de répartition et la densité de probabilité des défaillances. Par la suite, nous avons introduit les lois utilisées usuellement dans la fiabilité, à savoir, loi Exponentielle, loi de Weibull, loi Binomiale et loi de Poisson. Enfin, on a terminé par la présentation des arbres de défaillance.

Dans le chapitre prochain, nous allons présenter les différentes formes de maintenance, préventive, corrective et prévisionnelle. Ensuite, nous détaillerons les différents niveaux de maintenance.

CHAPITRE 5. POLITIQUES DE MAINTENANCE

Introduction

La maintenance a pour fonction de garantir la plus grande disponibilité des équipements au meilleur rendement tout en respectant le budget alloué.

Les entreprises mettent en place des méthodes qui ont pour but d'atteindre leurs objectifs en termes de compétitivité et de profit. Ces méthodes sont nombreuses, chacune possédant des objectifs et des domaines d'application différents.

La politique de maintenance est la définition, à long terme, des objectifs technico-économiques relatifs à la prise en charge des équipements de l'entreprise par le service maintenance, et la stratégie de maintenance est les méthodes de management utilisées en vue d'atteindre les objectifs de maintenance [5]. Le service de maintenance met en œuvre les moyens adaptés aux objectifs fixés pour le moyen terme (qu'on appelle stratégie) et pour le court terme (qu'on appelle tactique).

Dans ce chapitre, nous allons étudier les différentes formes de maintenance, maintenance préventive, maintenance corrective, ensuite, nous présenterons les différents niveaux et échelon de maintenance.

I. Types de maintenance

La maintenance des équipements constitue une contrainte réglementaire pour les entreprises possédant des matériels sur lesquels travaillent des salariés. Le choix de type de maintenance à mettre en œuvre s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance en considérant les aspects technique, organisationnel et économique de l'entreprise [21].

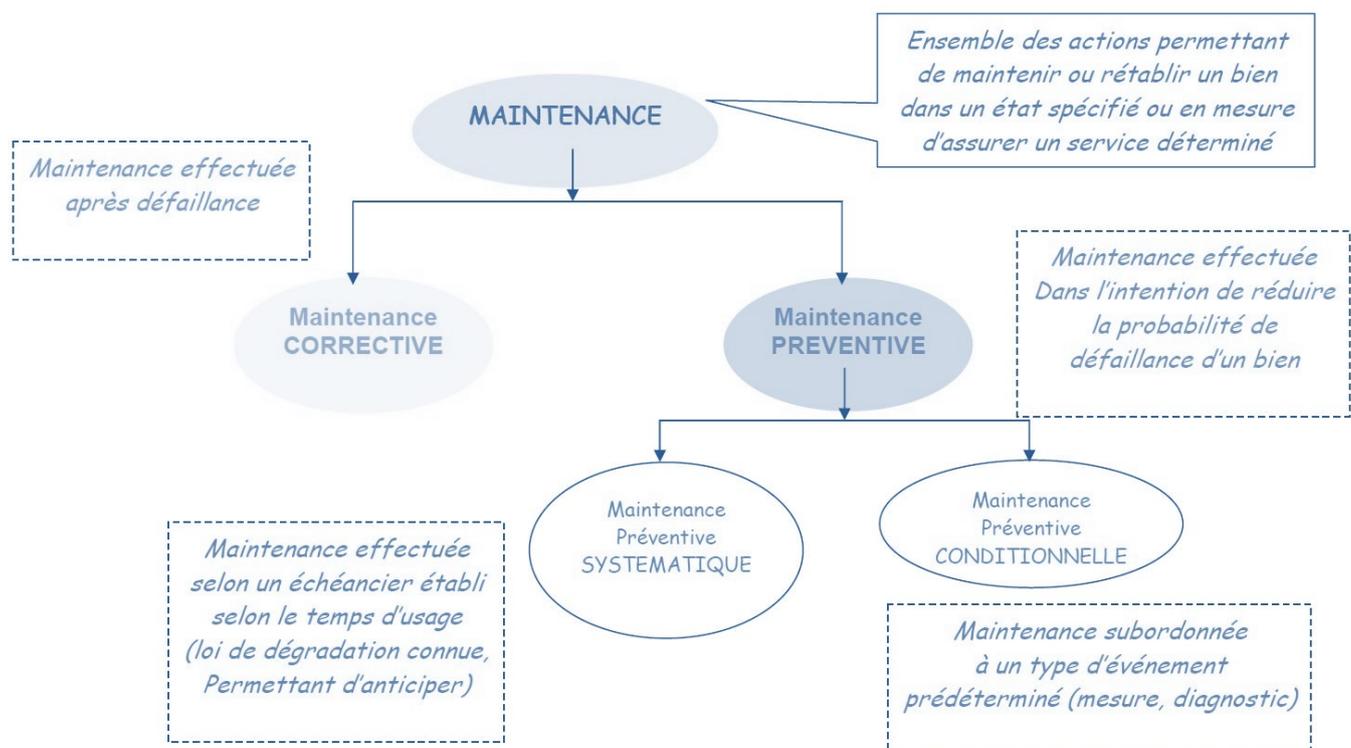


Figure V.1 Organisation de la maintenance décentralisée par département

Pour choisir, il faut donc connaître :

- Les coûts de maintenance.
- Les objectifs de la direction.
- Les coûts de perte de production.
- Le comportement du matériel en exploitation.
- Les conditions d'application de chaque méthode.
- Le fonctionnement et les caractéristiques du matériel.

Les types de maintenance sont généralement différenciés par les objectifs et les moments des actions de maintenance.

La Figure V.1 montre les types de maintenance (d'après les normes AENOR 13 306).

I.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective est, d'après la norme AENOR X60-319, Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise [5]. Elle correspond à une attitude de défense (subir), attitude caractéristique de l'entretien traditionnel. La défaillance étant de nature aléatoire, les tâches correspondant à cette forme de maintenance sont subies, et ne sont pas planifiables. Son but est de permettre à un système d'accomplir, au moins provisoirement, une fonction requise. Elle se décompose en deux formes, de définitions non normalisées :

- **Maintenance corrective palliative:** La maintenance corrective palliative regroupe les activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise [22]. Ces activités du type dépannage qui présentent un caractère provisoire devront être suivies systématiquement d'activités curatives.
- **Maintenance corrective curative:** La maintenance corrective curative regroupe les activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise [22]. L'intervention peut avoir lieu juste après l'apparition d'une défaillance ou après un dépannage. Ces activités du type réparation, modification ou amélioration doivent présenter un caractère permanent et durable contrairement à la maintenance corrective palliative.

I.1.1 Actions de la maintenance corrective : Après apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous. Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) :

- **Test :** Comparaison des réponses d'un dispositif à une sollicitation avec celle d'un dispositif de référence.
- **Détection :** Action de déceler par une surveillance accrue, l'apparition d'une défaillance ou l'existence d'un élément défaillant.
- **Localisation :** Action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.
- **Diagnostic :** Identification des causes probables de la défaillance à l'aide d'une analyse ou d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Le diagnostic confirme, complète ou modifie les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances et précise les opérations de maintenance correctives nécessaires.

- **Remise en état**: Avec ou sans modification, et le contrôle du bon fonctionnement. La remise en état peut prendre deux formes : le dépannage ou la réparation.
- **Contrôle** du bon fonctionnement après intervention.
- **Rapport d'intervention** : Ce rapport est indispensable pour renseigner les bases de données sur les statistiques de fiabilité / disponibilité et sur les coûts.

La Figure V.2 montre les différentes formes de la maintenance corrective.

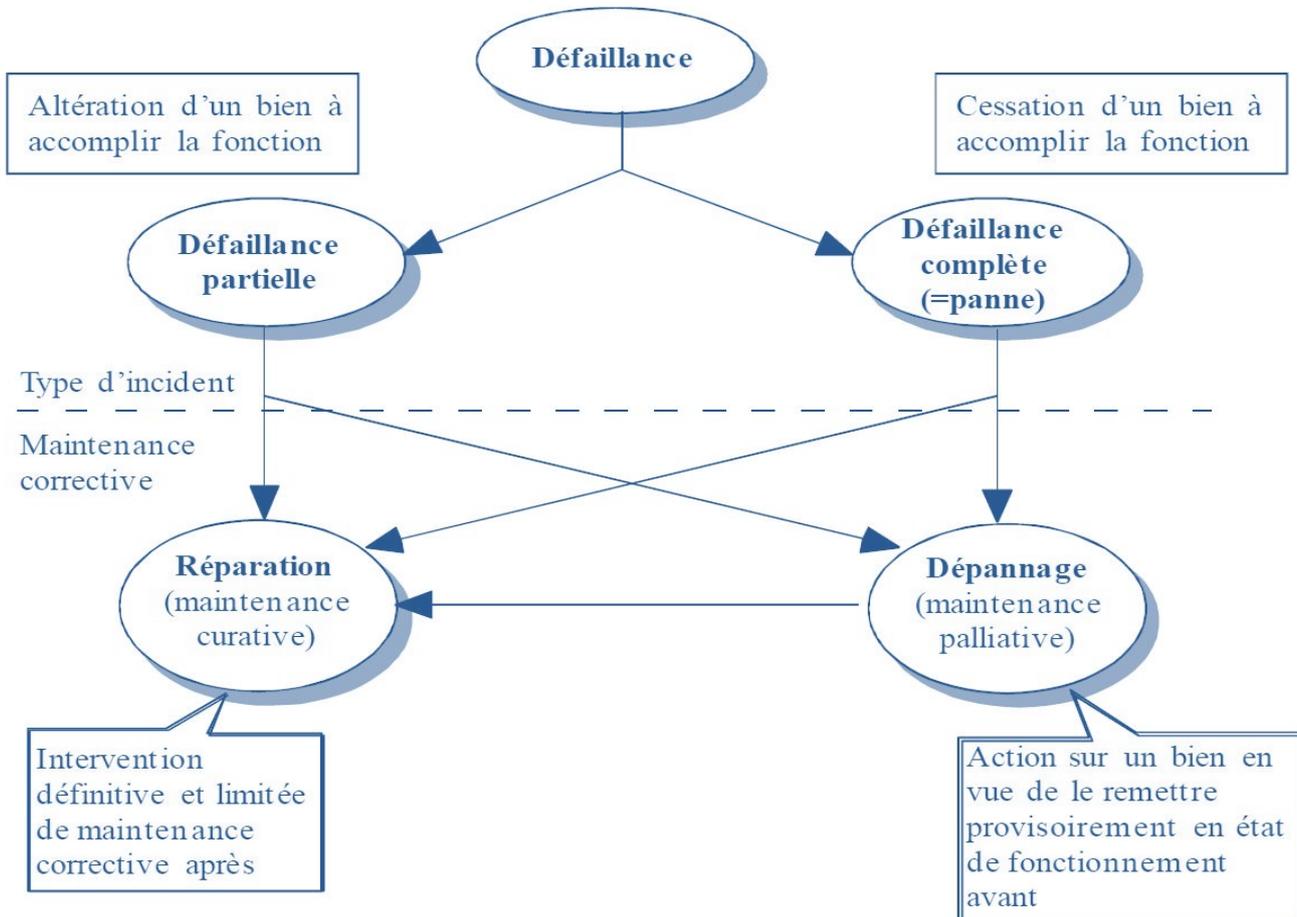


Figure V.2 Les différentes formes de la maintenance corrective (palliative et curative)

I.1.2 Le temps en maintenance corrective : Les actions de la maintenance corrective étant très diverses, il est toujours difficile de prévoir la durée d'intervention :

- Elle peut être faible (de quelques secondes pour réarmer un disjoncteur ou changer un fusible à quelques minutes pour changer un joint qui fuit).
- Elle peut être très importante (de 30 mn à plusieurs heures) dans le cas du changement de plusieurs organes simultanément (moteur noyé par une inondation).
- Elle peut être majeure en cas de mort d'homme (plusieurs jours si enquête de police).

L'efficacité des actions de maintenance corrective est liée à de nombreux facteurs, touchant à la fois à la maintenabilité des équipements, à la compétence et à la disponibilité des personnes, et à l'organisation de la logistique de maintenance. Toute faiblesse dans ces facteurs se traduit par une perte de temps d'intervention, donc par une perte de production et un surcroît de coût.

I.2 Maintenance préventive

La maintenance préventive est, d'après la norme AENOR X60-319, la maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien [5]. C'est une maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) et/ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).

Cette politique de maintenance s'adresse aux éléments provoquant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles classés comme importants pour l'entreprise. Selon la Figure V.1, la maintenance préventive se divise en deux formes :

- **Maintenance préventive systématique:** La maintenance préventive systématique est une maintenance 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 [5].

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle. Elle est donc une maintenance programmée qui consiste à remplacer un certain nombre de composants préalablement défini même si aucun signe de défaillance n'est apparu. Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que :

- Le nombre de km parcouru pour une locomotive.
- Le nombre de pièces fabriquées par une machine.
- Le nombre de tonne produite pour un haut-fourneau.
- Le nombre de palette conditionnée pour une empaqueteuse.

Cette forme de maintenance nécessite de connaître:

- Les modes de dégradation.
- Le comportement du matériel.
- Le temps moyen de bon fonctionnement entre deux défaillances.

Cette forme de maintenance s'applique à des équipements tel que :

- Les équipements soumis à une réglementation sécuritaire : ponts roulants, matériels d'incendie, réservoirs sous pression, appareils de levage...
- Les équipements pouvant entraîner des accidents graves : matériels de transport en commun des personnes, appareils et constituants utilisés dans l'énergie nucléaire...
- Les équipements présentant des coûts de défaillance très élevés : système avec processus de production continu, lignes de fabrication automatisées...

- **Maintenance préventive conditionnelle:** La maintenance préventive conditionnelle est une maintenance basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent [5]. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue.

Cette forme de maintenance est aussi appelée maintenance prédictive (terme non normalisé), elle est conditionnée par l'apparition d'un type d'événement prédéterminé et révélateur de l'état de fonctionnement du système elle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. Elle est exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien. En effet, l'idée de la maintenance préventive conditionnelle consiste à ne changer

l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement, ou d'usure mettant en danger ses performances.

La maintenance préventive conditionnelle convient pour des matériels coûtant chers en remplacement et pouvant être surveillés par des méthodes non destructives (i.e. donnée d'un capteur, mesure d'usure, analyses de vibration, analyses de l'huile et de la température, ...).

La mise en pratique de cette maintenance nécessite de décomposer les sous-systèmes ou machines en éléments maintenables et il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Cette forme de maintenance peut s'appliquer à tous les matériels.

I.2.1 Actions de la maintenance préventive: Ces opérations trouvent leurs définitions dans la norme NF X 60-010, elles peuvent être résumées par :

- **Inspection** : Contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien ; elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage).
- **Contrôle** : Vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective.
- **Visite** : Examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du *premier* et du *deuxième niveau* ; il peut également déboucher sur la maintenance corrective.
- **Test** : Comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte.
- **Echange standard** : Remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.
- **Révision** : Ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits du temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien. Le terme révision ne doit donc pas être confondu avec surveillance. Une révision est une action de maintenance de *niveau 4*.

Les trois premières opérations sont encore appelées 'opérations de surveillance'. Elles caractérisent parfaitement la phase d'apprentissage et sont absolument nécessaires si on veut maîtriser l'évolution de l'état réel d'un bien. On accepte donc de payer pour savoir puis pour prévenir. Elles sont effectuées de manière continue ou à intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou sur le nombre d'unités d'usage.

I.2.2 Objectifs visés par la maintenance préventive: Les objectifs de la Maintenance Préventive sont les suivants :

- Diminuer le budget de maintenance.
- Augmenter la durée de vie du matériel.
- Supprimer les causes d'accidents graves.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Améliorer les conditions du travail du personnel de production.
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc....

- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.

- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.

Bien que la maintenance préventive attire plus d'intérêt aux industriels, il est évident qu'on aura toujours des pannes donc on fait toujours recours à la maintenance corrective, trop de maintenance préventive n'est souvent pas économiquement viable. Chaque industrie doit trouver le niveau à atteindre.

II. Niveaux et échelons de maintenance

Selon l'AFNOR, à titre indicatif, cinq niveaux de maintenance, classés de manière croissante, selon la complexité des actions de maintenance limitée à la complexité des procédures et / ou la complexité d'utilisation ou de mise en œuvre des équipements de soutien nécessaires, et précisant le service qui en a la responsabilité.

Un niveau de maintenance se définit par rapport :

- À la nature de l'intervention.
- Aux moyens mis en œuvre.
- À la qualification de l'intervenant.

Pour chaque niveau, la liste des opérations précisées est donnée à titre d'illustration.

II.1 Premier niveau

Réglages simples prévus par le constructeur ou le service de maintenance au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture d'équipement (nettoyage, réglage ...), ou échange d'éléments consommables accessibles en toute sécurité (voyant, certains fusibles). Ce type d'intervention peut être effectué par l'exploitant du bien, sur place, sans outillage et à l'aide des instructions d'utilisation. Le stock des pièces consommables nécessaires est très faible.

➤ Exemples de maintenance corrective premier niveau

- Remplacement des ampoules.
- Remplacement de fusibles et de voyants.

➤ Exemples de maintenance préventive premier niveau

- Graissages journaliers.
- Contrôle auditif des bruits de marche.

II.2 Deuxième niveau

Dépannages par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou d'opérations mineures de maintenance préventive (contrôle de bon fonctionnement...). Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne, sur place, avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance, et à l'aide de ces mêmes instructions. On peut se procurer les pièces de rechange transportables nécessaires sans délai et à proximité immédiate du lieu d'exploitation. Un personnel est qualifié lorsqu'il a reçu une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels, et est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés, compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes.

Sont ainsi concernées par ce niveau les opérations de remplacement de pièces n'entraînant pas de démontage global de l'équipement. C'est donc un travail portant sur des éléments isolés ou des opérations de vérification de résultats tels que le contrôle des performances du matériel livré.

- Exemples de maintenance corrective deuxième niveau
 - Remplacement des filtres difficiles d'accès.
 - Remplacement de composants individuels d'usure ou détériorés par échange standard (rail, rouleaux...).
- Exemples de maintenance préventive deuxième niveau
 - Contrôle de paramètres sur équipements en fonctionnement, à l'aide de moyens de mesure intégrés au bien.
 - Prélèvement d'huile pour analyse.

II.3 Troisième niveau

En général, sont des opérations de maintenance corrective ou bien préventive systématique planifié correspondantes: à l'identification et le diagnostic des pannes, à la réparation par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, aux réparations mécaniques mineures et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réalignement des appareils de mesure, (opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien, d'utilisation ou de mise en œuvre complexes). Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien spécialisé, sur place ou dans le local de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance ainsi que des appareils de mesure et de réglage, et éventuellement des bancs d'essais et de contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien ainsi que les pièces approvisionnées par le magasin.

- Exemples de maintenance corrective troisième niveau
 - Réparation d'une fuite de fluide frigorigène.
 - Remplacement d'organes et de composants par échange standard sans usage de moyens de soutien spécialisés (vérin, pompe, moteurs, engrenage...).
- Exemples de maintenance préventive troisième niveau
 - Contrôle des protections électriques.
 - Contrôle et réglages impliquant l'utilisation d'appareils de mesure externes aux biens.

II.4 Quatrième niveau

Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons du travail par les organismes spécialisés. Ce type d'intervention peut être effectué par une équipe comprenant des techniciens qui ont reçus un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé, à l'aide d'outillage général plus spécialisé, matériel d'essais, de contrôle, ...etc. Ce niveau concerne les opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés.

- Exemples de maintenance corrective quatrième niveau

- Réparation d'une pompe suite à une défaillance.
- Dépannage de moyens de production par usage de moyens de mesure de forte complexité (valise de programmation automate, système de régulation et de contrôle des commandes numériques,...).

➤ Exemples de maintenance préventive quatrième niveau

- Révisions partielles ou générales ne nécessitant pas le démontage complet de la machine.
- Révision d'une pompe en atelier, suite à un retrait préventive

II.5 Cinquième niveau

Il s'agit d'opérations lourdes de rénovation ou de reconstruction d'un équipement ou exécution des réparations importantes confiées à un atelier central ou à une unité extérieure. Ces opérations entraînent le démontage de l'équipement et son transport dans un atelier spécialisé. Ce niveau de maintenance est réservé au constructeur ou reconstruteur. Il nécessite des moyens similaires à ceux utilisés en fabrication.

Exemples

- Révisions générales avec le démontage complet de la machine.
- Réparations importantes réalisées par le constructeur ou le reconditionnement de ses biens.

Le Tableau V.1 récapitule les cinq niveaux de maintenance.

Echelon de maintenance spécifie l'endroit où les interventions sont effectuées. On définit généralement trois échelons qui sont :

- La maintenance sur site : l'intervention est directement réalisée sur le matériel en place.
- La maintenance en atelier : le matériel à réparer est transporté dans un endroit, sur site, approprié à l'intervention.
- La maintenance chez le constructeur ou une société spécialisée : le matériel est alors transporté pour que soient effectuées les opérations nécessitant des moyens spécifiques.

Bien que les deux concepts de niveau et d'échelon de maintenance soient bien distincts, il existe souvent une corrélation entre le niveau et l'échelon.

Les opérations de niveaux 1 à 3, par exemple, s'effectuant sur site, celles de niveau 4 en atelier, et celles de niveau 5 chez un spécialiste hors site (constructeur ou société spécialisée). Si cela se vérifie fréquemment (dans le domaine militaire par exemple), il convient cependant de ne pas en faire une généralité. On peut rencontrer en milieu industriel des tâches de niveau 5 effectuées directement sur site.

Tableau V.1 Les cinq niveaux de maintenance

<i>Niveau</i>	<i>Nature de l'intervention</i>	<i>Compétences de l'intervenant</i>	<i>Lieu de l'intervention</i>	<i>Outillage nécessaire à l'intervention</i>	<i>Stock des pièces de rechange</i>
1	REGLAGES SIMPLES prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture d'équipement. ECHANGES d'éléments consommables accessibles en toute sécurité (voyants, certains fusibles.)	Exploitant du bien	Sur place.	Instructions d'utilisation. sans outillage.	Très faible en pièces consommables
2	DEPANNAGE par échange standard des éléments prévus à cet effet. OPERATIONS MINEURE de maintenance préventive (graissage, contrôle de bon fonctionnement)	Technicien habilité de qualification Moyenne (pouvant travailler en sécurité sur une machine présentant certains risques potentiels)	Sur place. Instructions d'utilisation.	Outillage portable défini par les instructions de maintenance	Pièces de rechanges nécessaires, transportables sans délai et à proximité du lieu d'exploitation
3	IDENTIFICATION ET DIAGNOSTIC des pannes. REPARATIONS par échange de composants ou éléments fonctionnels. REPARATIONS mécaniques mineures toutes opérations courantes de maintenance préventive (réglage général, réaligement des appareils de mesure)	Technicien spécialisé.	Sur place ou local de maintenance.	Outillage prévu dans les instructions de maintenance. Appareil de mesure et de réglage. Banc d'essais et de contrôle des équipements	Pièces approvisionnées par le magasin.
4	Tous les travaux important de maintenance corrective ou de préventive à l'exception de la reconstruction. REGLAGE des appareils de mesure utilisés par la maintenance. VERIFICATION des étalons de travail.	Equipe comprenant un encadrement très spécialisé.	Atelier spécialisé.	Outillage général (moyens mécaniques, de câblage de nettoyage) Bancs de mesure et étalons. Toute documentation.	
5	RENOVATION/RECONSTRUCTION exécution des réparations importantes.	Constructeur ou reconstruteur.	Atelier central ou unité extérieure.	Moyen proche de la fabrication	

Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les différents types de maintenance, à savoir, la maintenance préventive et la maintenance corrective avec les actions correspondantes à chaque type, ensuite, nous avons détaillé les différents niveaux et échelons de maintenance.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] François Monchy, 'Maintenance, Méthodes et organisations', Dunod (2003).
- [2] Claude Kojchen, 'La maintenance préventive', Dunod (2017).
- [3] Lyonnet Patrick, Thomas Marc et Toscano Rosario, 'Fiabilité, diagnostic et maintenance prédictive des systèmes', Lavoisier (2012).
- [4] Driss Bouami, 'Le grand livre de la maintenance', AFNOR (2023).
- [5] Norme Européenne, Terminologie de la maintenance, AFNOR (2001).
- [6] Christian Robert, 'Le Choix Bayésien : principes et pratique', Springer (2006).
- [7] Pierre Brémaud, 'Initiation aux Probabilités et aux chaînes de Markov', Springer (2009).
- [8] Dominique Foata et Aimé Fuchs, 'CALCUL DES PROBABILITÉS Cours, exercices et problèmes corrigés', Dunod (2022).
- [9] Pierre Dusart, 'Cours de Probabilités', Université de Limoge, France (2013).
- [10] Didier Dacunha-Castelle et Marie Duflo, 'Probabilités et Statistiques', Tome 1, Masson (1982).
- [11] Murray-R Spiegel, 'Probabilités et Statistique. Cours et problèmes', Mac Graw Hill (1996).
- [12] Benjamin Jourdain, 'Probabilités et statistique pour l'ingénieur', Ecole des Ponts ParisTech (2018).
- [13] Salima Beleulmi, 'Contribution à l'analyse bayésienne en fiabilité et maintenabilité des systèmes mécaniques', Thèse de Doctorat, Université de Constantine (2016).
- [14] Jean-Pierre Hutin, 'Gestion de la durée de vie des centrales nucléaires', Techniques Ingénieur, (2006).
- [15] Alain Pollard, Claude Rivoire, 'Fiabilité et statistiques prévisionnelles : méthode de Weibull', Eyrolles (1971).
- [16] Nabil Haneche, 'Application de quelques méthodes bayésiennes en fiabilité', Mémoire de Master, Université d'Oum El Bouaghi (2021).
- [17] Normes nationales et documents normatifs nationaux, Maintenance. Vocabulaire de maintenance et de gestion des biens durables, AFNOR (1981).
- [18] Normes nationales et documents normatifs nationaux, Terminologie relative à la fiabilité - Maintenabilité – Disponibilité AFNOR (1988).
- [19] Gilles Zwingelstein, 'Diagnostic des défaillances', Hermes (1995).
- [20] Ahmed Bellaouar, Salima Beleulmi, 'Cours Fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD)', Université Constantin1 (2014).
- [21] Jean Héng, 'Pratique de la maintenance préventive: mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, froid', Dunod (2015).
- [22] Jean-Louis Fanchon, Jean-Michel Bleux. 'Maintenance : Systèmes automatisés de production', Nathan (1997).