

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT : GENIE ÉLECTRIQUE  
N° :.....



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
FILIERE : ELECTROMECHANIQUE  
OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER**

---

## Amélioration de la fiabilité d'un système de production par la simulation monte Carlo

---

Proposé et dirigé par :

**Dr DEFDAF Mabrouk**

Présenté par :

**HABECHE Khair-Eddine**

**MERICHE Zine elabidine**

Soutenu devant le jury composé de :

**Mr Fouad BERRABAH**

**Président**

**Mr Mabrouk DEFDAF**

**Encadreur**

**Mr Samir MABRAK**

**Examineur**

2019/2020

## *Remerciements*

NOUS TENONS TOUT D'ABORD À REMERCIER DIEU LE TOUT PUISSANT ET MISÉRICORDIEUX QUI NOUS A DONNÉ LA FORCE ET LA PATIENCE D'ACCOMPLIR CE TRAVAIL.

EN SECOND LIEU NOUS TENONS À REMERCIER NOTRE ENCADREUR DR : **DEFDAF MABROUK** POUR SES APPRÉCIATIONS COMPÉTENTES, SES PRÉCIEUX CONSEILS ET SON AIDE DURANT TOUT LA PÉRIODE DU TRAVAIL.

NOUS TENONS ÉGALEMENT À EXPRIMER NOTRE GRATITUDE ENVERS LES MEMBRES DE JURY, TOUS LES ENSEIGNONS ET LE PERSONNEL ADMINISTRATIF DE LAFARGE EN PARTICULIER **ALLAL MUSTAPHA, MEKAIDCHE ABDEL-KADER, HABILE AYOUN** ET **LAIFA FAKHREDDINE** QUI ONT CONTRIBUÉ À NOTRE FORMATION ET À L'ÉLABORATION DE CE PRÉSENT TRAVAIL.

NOS VIF ONT PORTÉ À NOTRE TRAVAIL, EN DE L'ENRICHIR PAR LEUR PROPOSITIONS.

ENFIN, NOUS TENONS ÉGALEMENT À REMERCIER TOUTES LES PERSONNES QUI ONT PARTICIPÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA RÉALISATION DE CE MODESTE TRAVAIL.

## *Résumé*

Dans ce travail, Nous évoquerons en premier lieu les concepts de base de la maintenance et de la sûreté de fonctionnement des systèmes industrielles ayant un effet direct sur l'évaluation des performances de la maintenance, et en second lieu nous présentons des généralités sur les chaînes de Markov et simulation de monte Carlo. Ensuite, une méthode a été présentée pour évaluer la fiabilité et la disponibilité, basée sur le processus de Markov et la méthode de Monte Carlo. Ces domaines d'évaluation consistent en une évaluation probabiliste.

Dans le but d'améliorer la fiabilité et la disponibilité des systèmes de productions on a procédé à une évaluation des paramètres de la SDF de concasseur de la société Lafarge de m'sila.

**Mots clés :** Sûreté de fonctionnement (SDF), simulation de Monte Carlo, Processus de Markov, Fiabilité, Disponibilité...

## *Abstract*

In this work, we will first discuss the basic concepts of maintenance and safety of industrial systems having a direct effect on the evaluation of maintenance performance, and secondly we present generalities on the Markov chains and Carlo monte simulation. Then a method was presented to assess reliability and availability, based on the Markov process and the Monte Carlo method. These areas of evaluation consist of a probabilistic evaluation. In order to improve the reliability and availability of production systems, an evaluation of the settings of the SDF crusher of the company Lafarge de m'sila was carried out.

**Keywords:** Operational safety (SDF), Monte Carlo simulation, Markov Process, Reliability, Availability...

## ملخص

في هذا العمل، أولاً سوف نناقش المفاهيم الأساسية للصيانة وسلامة النظم الصناعية التي لها تأثير مباشر على تقييم أداء الصيانة، وثانياً نقدم العموميات على سلاسل ماركوف ومحاكاة مونت كارلو. ثم عرض طريقة لتقييم الموثوقية والتوافر، استناداً إلى عملية ماركوف وطريقة مونت كارلو. وتتألف مجالات التقييم هذه من تقييم احتمالي. من أجل تحسين موثوقية وتوافر أنظمة الإنتاج، تم إجراء تقييم لأوضاع كسارة لشركة لافارج المسيلة.

**الكلمات الرئيسية:** السلامة التشغيلية (SDF)، محاكاة مونت كارلو، عملية ماركوف، الموثوقية، توافر ...

# Table des matières

<b>Table des matières.....</b>	<b>i</b>
<b>Liste des Figures.....</b>	<b>v</b>
<b>Liste des Tableaux.....</b>	<b>vii</b>
<b>Glossaire.....</b>	<b>ix</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>2</b>
<b>Chapitre I. Generalité sur la maintenance et la surete de fonctionnement .....</b>	<b>4</b>
I.1 Introduction.....	6
I.2 La Maintenance.....	6
I.2.1 Evolution de la maintenance .....	5
I.2.2 Politiques et stratégies de maintenance.....	7
I.2.2.1 Productive Maintenance (TPM).....	8
I.2.2.2 Objectifs de la TPM .....	9
I.2.3 Objectifs de la maintenance .....	9
I.2.3.1 Objectifs financiers .....	10
I.2.3.2 Objectifs opérationnels .....	10
I.2.4 Fonction maintenance .....	10
I.2.4.1 Méthodes.....	11
I.2.4.2 Ordonnancement.....	12
I.2.4.3 Réalisation des interventions .....	12
I.2.5 Les fonctions d'un système de maintenance.....	12
I.2.6 Les Méthodes de la maintenance .....	13
I.2.6.1 Maintenance corrective .....	14
I.2.6.2 Maintenance préventive.....	16
I.2.7 Les niveaux de maintenance .....	17
I.2.7.1 1er niveau de maintenance .....	18
I.2.7.2 2ème niveaux de maintenance .....	18
I.2.7.3 3ème niveaux de maintenance .....	18
I.2.7.4 4ème niveaux de maintenance .....	18
I.2.7.5 5ème niveaux de maintenance .....	18
I.2.8 Choix de la forme de maintenance à mettre en oeuvre : l'aide à la décision .....	19
I.2.9 L'environnement de la maintenance .....	20
I.3 La Sureté de fonctionnement .....	20
I.3.1 Définition .....	20
I.3.2 Fiabilité .....	21
I.3.2.1 Différents types de fiabilité.....	21
I.3.2.2 Analyse de la fiabilité .....	22
I.3.2.3 Fiabilité d'un système .....	22
I.3.2.4 Etude de la fiabilité .....	23
I.3.3 Quelques définitions .....	23
I.3.3.1 Défaut.....	23
I.3.3.2 Défaillance .....	23
I.3.3.3 Panne.....	24
I.3.3.4 Taux de défaillance $\lambda(t)$ .....	24
I.3.3.5 Taux de réparation .....	25

I.3.3.6	MTBF.....	25
I.3.3.7	MTTF.....	25
I.3.4	Maintenabilité .....	26
I.3.5	La Disponibilité.....	26
I.3.6	Sécurité .....	27
I.3.6.1	Sécurité d'une machine.....	28
I.3.6.2	Risque .....	28
I.3.7	Méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement .....	28
I.3.7.1	L'analyse ABC.....	28
I.3.7.2	Analyse Préliminaire de Risque .....	30
I.3.7.3	La méthodologie AMDEC .....	31
I.3.7.4	Réseaux de pétri.....	33
I.3.7.5	Arbre de Défaillance .....	34
I.3.7.6	Graphes de Markov .....	34
I.3.7.7	Simulation de Monte Carlo et convergences .....	35
I.4	Conclusion .....	36
<b>Chapitre II. Chaîne de Markov et Simulation de Monte Carlo.....</b>		<b>38</b>
II.1	Introduction .....	38
II.2	Chaîne de Markov .....	38
II.2.1	Définitions et propriétés.....	39
II.2.1.1	Définition 1 :(Chaîne de Markov).....	39
II.2.1.2	Définition 2 :(Chaîne de Markov homogène) .....	39
II.2.1.3	Définition 3 :(Probabilité de transition) .....	40
II.2.1.4	Définition 4 : (Matrice de transition) .....	40
II.2.2	Propriété de la matrice P.....	40
II.2.3	Caractérisations d'une chaîne de Markov homogène .....	41
II.2.4	Les graphes d'états.....	41
II.2.5	Loi de probabilité de $X_n$ .....	42
II.2.6	Distributions stationnaires et limites pour les chaînes de Markov homogènes.....	43
II.2.6.1	Définition 1 (Distribution limite).....	43
II.2.6.2	Définition 2(Chaîne de Markov Stationnaire).....	43
II.2.7	Classification des états .....	44
II.2.7.1	Classes irréductibles.....	44
II.2.7.2	Récurrence et transenne .....	45
II.2.7.3	Périodicité .....	45
II.3	Simulation Monte Carlo .....	46
II.3.1	Définition .....	46
II.3.1.1	Définition 1 .....	46
II.3.1.2	Définition 2 .....	46
II.3.1.3	Définition 3 .....	46
II.3.2	Les modèles de simulation .....	47
II.3.2.1	Evolution des variables : Se compose de trois types.....	48
II.3.2.2	Nature des variables : Se compose de deux types .....	48
II.3.2.3	Domaines d'application .....	49
II.3.2.4	La simulation Monte Carlo présente plusieurs avantages .....	50
II.3.3	Les atouts de la méthode Monte Carlo.....	50
II.3.4	Les étapes de la simulation Monte Carlo .....	51
II.3.5	Explication des étapes de la simulation Monte Carlo .....	52
II.3.6	Application de la simulation Monte Carlo dans un système de production .....	54
II.3.7	Les types de la simulation Monte Carlo.....	55
II.3.7.1	Simulation Monte Carlo séquentielle ou chronologique.....	56
II.3.7.2	Simulation Monte Carlo non séquentielle (ou aléatoire) .....	56
II.4	Conclusion.....	56

---

<b>Chapitre III. Titre du chapitre 3 ...</b>	<b>58</b>
III.1 Introduction.....	58
III.2 Système de production (concasseur).....	58
III.2.1 Définition de concasseur.....	58
III.2.2 Principes de concassage.....	58
III.2.3 Types d'installation de concasseur.....	58
III.2.3.1 Concasseur à marteaux FLS, type EV.....	59
III.2.3.2 Composition Concasseur à marteaux FLS, type EV.....	61
III.3 Notions de base des systèmes industrielles.....	63
III.3.1 Systèmes non réparables.....	63
III.3.2 Systèmes réparables.....	63
III.4 Les lois de probabilité utilisées en fiabilité.....	64
III.4.1 Loi exponentielle.....	64
III.5 L'étude de la fiabilité par chaîne de Markov.....	65
III.6 Etudes de concasseur.....	66
III.6.1 Types et nombre d'heures d'arrêts du concasseur.....	66
III.6.2 L'analyse ABC.....	68
III.6.3 Diagrammes de Pareto en $N$ , $N_t$ , $\bar{t}$ .....	69
III.7 Etudes statistiques sur le concasseur.....	71
III.7.1 Paramètres de fiabilité du concasseur.....	72
III.8 application de simulation monte Carlo par chaîne de Markov dans concasseur pour la modalisation de la fiabilité et disponibilité.....	73
III.9 Représentation graphique des chaînes de Markov.....	74
III.9.1 La disponibilité.....	75
III.9.2 La fiabilité.....	80
III.10 Propositions pour améliorer la disponibilité et la fiabilité.....	87
III.11 Conclusion.....	88
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>90</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>92</b>



## Liste des Figures

Figure I.1– Evolution de la maintenance depuis 1940.....	6
Figure I.2– Politique de maintenance. ....	8
Figure I.3– Le principe de TPM. ....	9
Figure I.4– Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance.....	11
Figure I.5– Le contenu fonctionnel d’un système de maintenance. ....	13
Figure I.6– Les méthodes de la maintenance.....	17
Figure I.7– Structure de la maintenance conditionnelle. ....	16
Figure I.8– Exemple d’arbre de décision pour choisir la forme de maintenance adaptée à un sous ensemble. ....	19
Figure I.9– L’assurance produit.....	20
Figure I.10– Arbre de la Sûreté de Fonctionnement.....	21
Figure I.11– fiabilité et défiabilité. ....	22
Figure I.12– Représentation du MTTF, du MUT, du MDT et du MTBF.....	23
Figure I.13– Relation faute-erreur-défaillance. ....	27
Figure I.14– Taux de défaillance en fonction du temps.....	24
Figure I.15– La disponibilité.....	27
Figure I.16– courbe théorique d’analyse ABC. ....	29
Figure I.17– Démarche de l’analyse préliminaire des risques ....	30
Figure II.1– Graphe représenté l’état Markov. ....	41
Figure II.2– Graphe transition entre 5 état.....	44
Figure II.3– Classification des différents types de modèles. ....	47
Figure II.4– Classification des types de simulation ....	48
Figure II.5– Schéma explicatif des étapes de la simulation Monte. ....	52
Figure II.6– Modélisation du système à étudier par la simulation Monte Carlo. ....	53
Figure II.7– Algorithme général d’une simulation Monte Carlo.....	54
Figure III.1– Concassage à un étage en une passe avec concasseur à marteaux rotatifs et grille de sortie ou avec concasseur à barre d’impact.....	61
Figure III.2– (a) : Concasseur à marteaux à un cylindre d’avancement ;(b) Concasseeur à marteaux a deux cylindres d’avancement (c) Concasseeur à marteaux éclaté.....	64
Figure III.3– Graphe d’état pour système non réparable. ....	65
Figure III.4– Graphe d’état pour système réparable. ....	65
Figure III.5– Un modèle Markovien.....	66
Figure III.6– Bilan des arrêts du concasseuseur pour l’année 2019.....	67
Figure III.7– Courbe de ABC. ....	68
Figure III.8– Mise en évidence des éléments les moins fiables.....	69
Figure III.9– Mise en évidence des éléments les moins disponibles. ....	70
Figure III.10– Mise en évidence des éléments les moins maintenables. ....	73

Figure III.11– Chaîne de production de système .....	73
Figure III.12– Graphe des états de la disponibilité.....	74
Figure III.13– Graphe des états de la fiabilité.....	75
Figure III.14– Graphe probabilité la disponibilité par années. ....	80
Figure III.15– Graphe probabilité de fiabilité par années.....	86
Figure III.16– Graphe de défaillance par années. ....	86
Figure III.17– Graphe de la densité par année.....	87

## Liste des Tableaux

Tableau I.1 – Cotation d’un mode de défaillance. ....	32
Tableau III.1 – Types et nombre d’heures d’arrêts. ....	66
Tableau III.2 – les donnés des pannes. ....	68
Tableau III.3 – Les présentations de l’analyse ABC. ....	68
Tableau III.4 – N, Nt et $t^-$ . ....	71
Tableau III.5 – l’indice de fiabilité N. ....	71
Tableau III.6 – l’indice de l’indisponibilité Nt. ....	72
Tableau III.7 – l’indice de maintenabilité $t^-$ . ....	73
Tableau III.8 – Heures d’exploitation du concasseur (2019). ....	74
Tableau III.9 – les donnés de chaine de Markov de la disponibilité. ....	77
Tableau III.10 – Probabilité de la disponibilité Après n année. ....	81
Tableau III.11 – les donnés de chaine de Markov de la fiabilité. ....	82
Tableau III.12 – Probabilité de la fiabilité Après n année ....	86
Tableau III.13 – Tableaux les valeurs de fiabilité et défaillance. ....	87
Tableau III.14 – Tableaux les valeurs de densité. ....	88



## Glossaire

<b>MTT</b>	L'estimation de la durée moyenne s'écoulant entre la mise en service du système et la survenance.
<b>MBF</b>	Maintenance basé sur la fiabilité
<b>MTBF</b>	La durée moyenne entre deux défaillances consécutives
<b>MTTR</b>	Le temps moyen mis pour réparer le système
$\lambda(t)$	Taux de défaillance
$\mu(t)$	Taux de réparation.
<b>TBF</b>	Temps de bon fonctionnement entre deux défaillances
<b>f(t)</b>	Densité de probabilité
<b>F (t)</b>	La fonction de répartition
<b>R (t)</b>	La fonction de fiabilité
<b>M(t)</b>	Fonction maintenabilité
<b>D (t)</b>	Fonction de disponibilité
<b>Di</b>	Disponibilité intrinsèque
<b>SDF</b>	Sûreté de fonctionnement
<b>MUT</b>	moyenne de temps de bon fonctionnement
<b>MTTF</b>	durée moyenne de fonctionnement avant défaillance
<b>TTR</b>	temps technique de réparation
<b>FMD</b>	Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Un système de production peut se définir comme une combinaison cohérente, dans l'espace et dans le temps, de certaines quantités de force de travail (salariés, entraide, etc.) et de divers moyens de production (ateliers, bâtiments, machines, instruments, etc.) en vue d'obtenir différentes productions qui permettent de satisfaire les objectifs auxquels le système est destiné. Ainsi donc, l'étude des systèmes de production devra se faire aussi bien dans l'espace que dans le temps. Dans l'espace, il s'agira de voir à un moment donné l'organisation de la production en liaison avec son environnement, alors que dans le temps on s'attachera à l'étude des changements intervenus au niveau de cette organisation de la production (d'arrêts et défaillances) et en déduire les facteurs qui sont à la base de ces changements (dynamique) [19], afin de l'améliorer en développant des programmes avec un service de maintenance.

Le rôle du service de la maintenance, est de choisir une politique de maintenance adéquate en prenant en considération l'aspect technique, économique et financier, des différentes méthodes en vue d'optimiser la sûreté de fonctionnement des systèmes de productions qui permettent de prendre des décisions; Pour évaluer la performance d'un système [14], dans ce mémoire, nous utilisons la simulation de monte Carlo pour trouver des solutions aux problèmes du système de production.

La simulation de Monte Carlo constitue une méthode très intéressante car elle donne accès à de nombreux paramètres inaccessibles par les autres méthodes et conduit à des analyses extrêmement détaillées des systèmes étudiés, Avec la simulation Monte Carlo, l'analyste voit clairement les combinaisons de valeurs en entrée associées aux issues et dispose ainsi d'une information extrêmement utile à la poursuite de l'analyse du système.

Le travail présenté dans ce mémoire est pour but d'évaluer les performances de la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité,..) d'un système de production réel, par la simulation de monte Carlo pour chaine de Markov.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre traite des concepts de base de la maintenance et de SDF, ainsi que les différentes stratégies et politiques de maintenance dans les entreprises. Nous présentons les

définitions de base et en particulier les méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement; ainsi que les différents niveaux de maintenance appliqués aux milieux industriels. Le but de cette introduction à la maintenance est de déterminer les objectifs des actions de maintenance, Pour atteindre les objectifs de maintenance des processus industrielles, en se basant sur l'amélioration des performances de la fiabilité, la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement de ces derniers.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les notions de base exprimant la simulation de monte Carlo, et les éléments importants à considérer dans la mesure de performance d'un système de production. Et nous avons aussi mis l'accent sur les processus stochastiques et les chaîne de Markov qui servent comme des outils mathématiques de base pour résoudre les problèmes de défaillances.

La troisième partie de ce travail détermine à un premier temps les notion de base des systèmes industrielles, et en particulier le concasseur au niveau de la société Lavarg de m'sila. Ainsi qu'un détermination des indices de fiabilité, disponibilité et maintenabilité. Celles-ci sera utiliser par la suite pour évaluer les performances de la maintenance à l'aide de théorie des chaîne de Markov.



# **Chapitre I. Généralité Sur La Maintenance Et La Sûreté De Fonctionnement**

# GENERALITE SUR LA MAINTENANCE ET LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

## I.1 Introduction

La technologie industrielle accrue, la complexité et le coût croissant des équipements industriels et par conséquent la nécessité de réduire les temps d'indisponibilité de ces derniers, donne à la maintenance une importance croissante [1].

Les activités de maintenance sont d'une importance fondamentale pour la sûreté et la productivité des installations industrielles. Aussi, depuis les années 1950-1960 et les travaux de nombreuses publications proposent des modèles mathématiques permettant de définir la politique de maintenance optimale à adopter. [3]

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

Généralement ces approches consistent à établir, puis à optimiser, une fonction prenant en compte les coûts de réparation, l'indisponibilité et la fiabilité du système pour une politique de maintenance définie Les variables de décision dépendent des modèles appliqués. [3]

## I.2 La Maintenance

On définit la maintenance selon des normes telle que :

- La norme AFNOR X60-010 [2], qui définit la maintenance par l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé . Au sens strict du terme, la maintenance agit sur les biens et considère l'ensemble des opérations d'entretien destinées à accroître la fiabilité ou pallier des défaillances.

• La norme AFNOR NF EN 13306 [4], offre une vision plus précise de la maintenance en indiquant que la maintenance intègre l'ensemble des activités techniques, administratives ou de management qui ont pour but de "maintenir ou de rétablir un équipement dans un état ou des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise .

Généralement, elle fait partie d'un ensemble d'actions effectuées pour que l'entreprise Plus puisse prospérer. En effet, les installations industrielles sont perturbées, tout au long de leur exploitation, par des dysfonctionnements qui affectent les coûts de production, la qualité des produits et des services, la disponibilité, la sûreté, la sécurité des personnes... [5]

•Selon la norme française NF EN 13306 X 60-319[4], la maintenance peut-être définie par:" l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise".

## I.2.1 Evolution de la maintenance

Au fil du développement de la concurrence et de la course à la compétitivité qui entraîne la recherche de la qualité totale et surtout la réduction des coûts, au fur et à mesure de la complexification et de l'automatisation des processus de production, la maintenance est devenue une des fonctions stratégiques de l'entreprise. Loin d'être aujourd'hui stabilisée, elle évolue au gré des nouvelles technologies de l'information et de communication NTIC, l'introduction de nouvelles méthodes de gestion, du développement technologique des outils de production, en particulier dans les domaines de la mesure et du contrôle de fonctionnement, de la systématisation progressive, de l'usage des normes et des procédures [6].

l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations (Figure I.1)

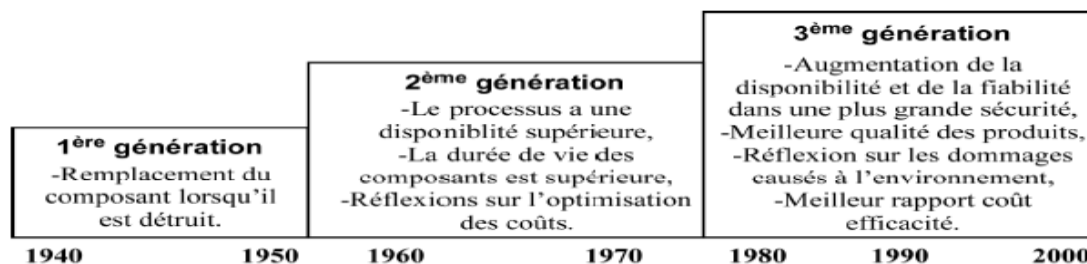


Figure I.1– Evolution de la maintenance depuis 1940 [7].

La première génération couvre la période allant jusqu'à la seconde guerre mondiale. Pendant cette période, les temps d'arrêt n'avaient pas beaucoup d'importance.

La prévention de la défaillance de l'équipement n'était pas une priorité dans les esprits de la plupart des gestionnaires. La majorité des équipements était techniquement plus simple qu'aujourd'hui et de ce fait, fiable et facile à réparer. Par conséquent, les activités de maintenance se résumaient à des routines de nettoyage et de lubrification.

Le besoin de compétences était également inférieur à ce qu'il est aujourd'hui. Durant la deuxième génération, des changements significatifs ont eu lieu. Avec l'arrivée des années 50, on note une augmentation de la demande des marchandises, mais au lendemain de la guerre, le volume de main-d'œuvre industrielle disponible chute. Cette situation conduit à une « *mécanisation accrue* ». Cela a conduit à une « *mécanisation accrue* ». Pendant les années 50, des machines de tous types apparaissent en nombre et de plus en plus complexes. Pour maintenir ou augmenter ses performances, l'industrie commence à en dépendre. La gestion des temps d'arrêt rentre dans l'orientation générale de l'organisation de l'entreprise. Cela conduit à l'idée que les pannes des équipements pourraient et devraient être évitées ! Cette idée amène à son tour, à la notion de maintenance préventive. Dans les années 60, cela consiste principalement à effectuer des révisions à intervalles fixes sur les composants. Le coût de la maintenance commence à augmenter fortement par rapport à d'autres coûts d'exploitation. Cela entraîne la croissance de la planification de la maintenance et des systèmes de contrôle.

La troisième génération commence au milieu des années 70, le processus de changement dans l'industrie rassemble encore plus de dynamiques et de remises en cause. Ces changements peuvent être classés sous les rubriques :

- nouvelles attentes ;
- nouvelles recherches ;
- nouvelles techniques.

La complexification de l'outil de production doit relever le double challenge « *développement durable / flexibilité et réactivité* ». Cela nécessite que chacun des sous processus de production apporte sa propre contribution à l'obtention de la performance globale. En ce sens, le processus de Maintien en Conditions Opérationnelles (MCO) met en œuvre un ensemble d'activités et de moyens logistiques (ravitaillement, acquisition et gestion des pièces de rechange, opérations de maintenance, outillages, documentation, formation...) dans l'objectif de garantir, tout au long de la phase d'exploitation, la finalité (produit ou service) attendue du système.

Une plate-forme logicielle (OPTIMAIN) a été développée s'orientant principalement vers l'élaboration de stratégies de maintenance de systèmes complexes, en développant une approche de modélisation combinant optimisation et simulation. Cette plate-forme est capable de prendre en compte le comportement dynamique des systèmes à maintenir en tenant compte de leur fiabilité. [7]

## **I.2.2 Politiques et stratégies de maintenance**

Dans la gestion de maintenance on distingue les notions de politique et de stratégie de maintenance suivantes [8] :

- La politique de maintenance : définit les méthodes de management utilisées en vue d'atteindre les objectifs de maintenance.
- La stratégie de maintenance : définit un type ou une combinaison de types de maintenance (corrective, préventive, améliorative) à appliquer à un équipement donné dans le but d'optimiser la production sur ce dernier.

Aussi, plusieurs concepts de maintenance existent [Ibidem] :

- La maintenance productive totale (TPM) ;
- La maintenance qualité totale, centrée sur la fiabilité (MBF) ;
- La maintenance basée sur le risque (MBR) ;
- La maintenance en conception (MC) ;
- Le BenchMarking ou le maintien en conditions opérationnelles (MCO).

On peut résumer les différentes politiques de maintenance selon la Figure I.2

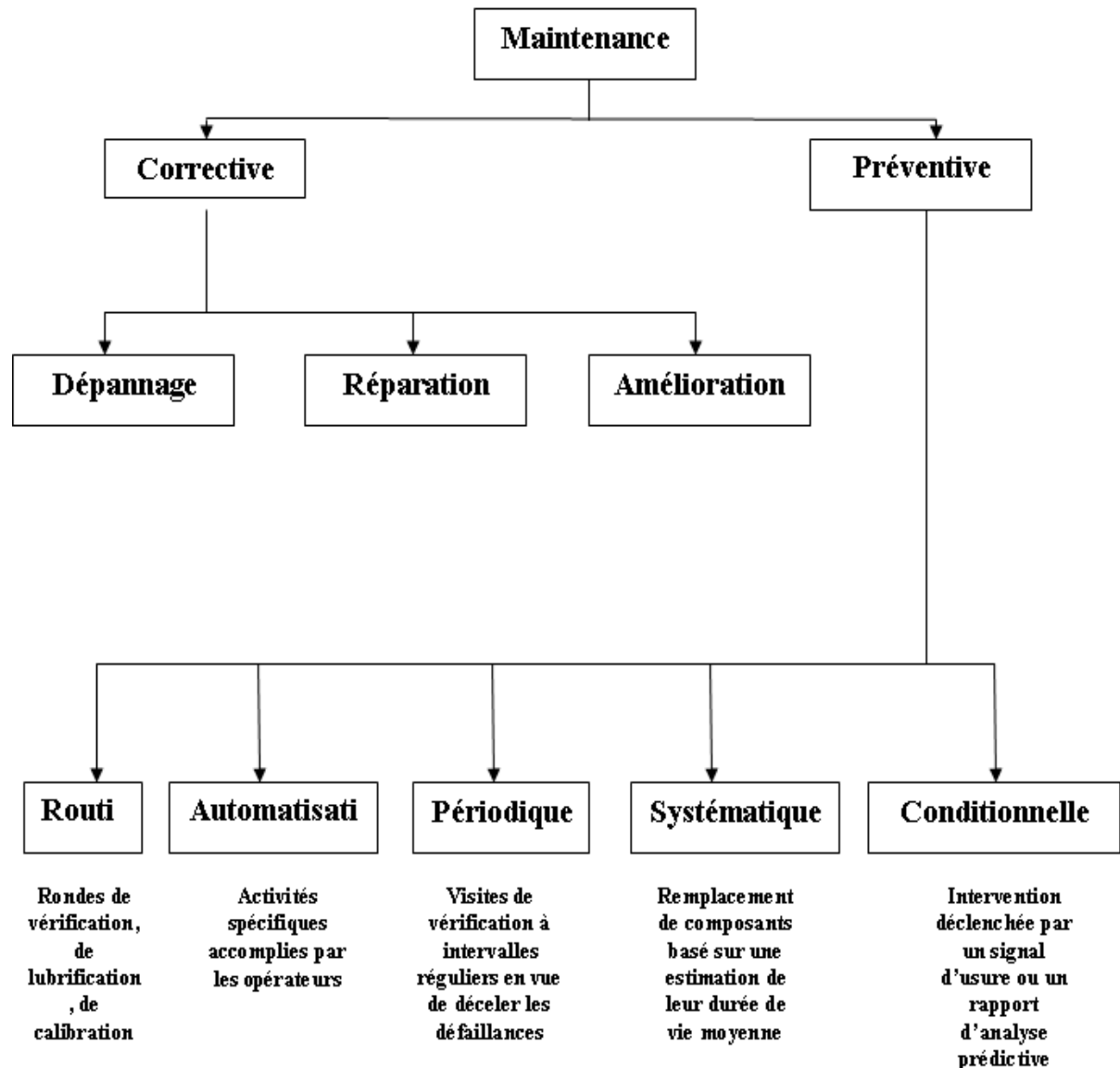


Figure I.2– Politique de maintenance [1].

### I.2.2.1 Productive maintenance (TPM)

La maintenance productive totale (TPM) est un concept poussé de maintien, de modification et d'amélioration des machines et équipements. Avec le concept de la Maintenance Productive Totale, la maintenance n'est plus seulement considérée comme une activité non-génératrice de valeur ajoutée, mais comme un processus important d'amélioration de la productivité globale. Le but de la maintenance productive totale est de réduire autant que possible les arrêts d'activités pour cause de maintenance, améliorer la productivité globale en impliquant tout le personnel.

Métaphoriquement, la TPM est aux équipements et machines ce qui est la médecine aux êtres humains. La figure I.3 présente le principe de la TPM : [6]

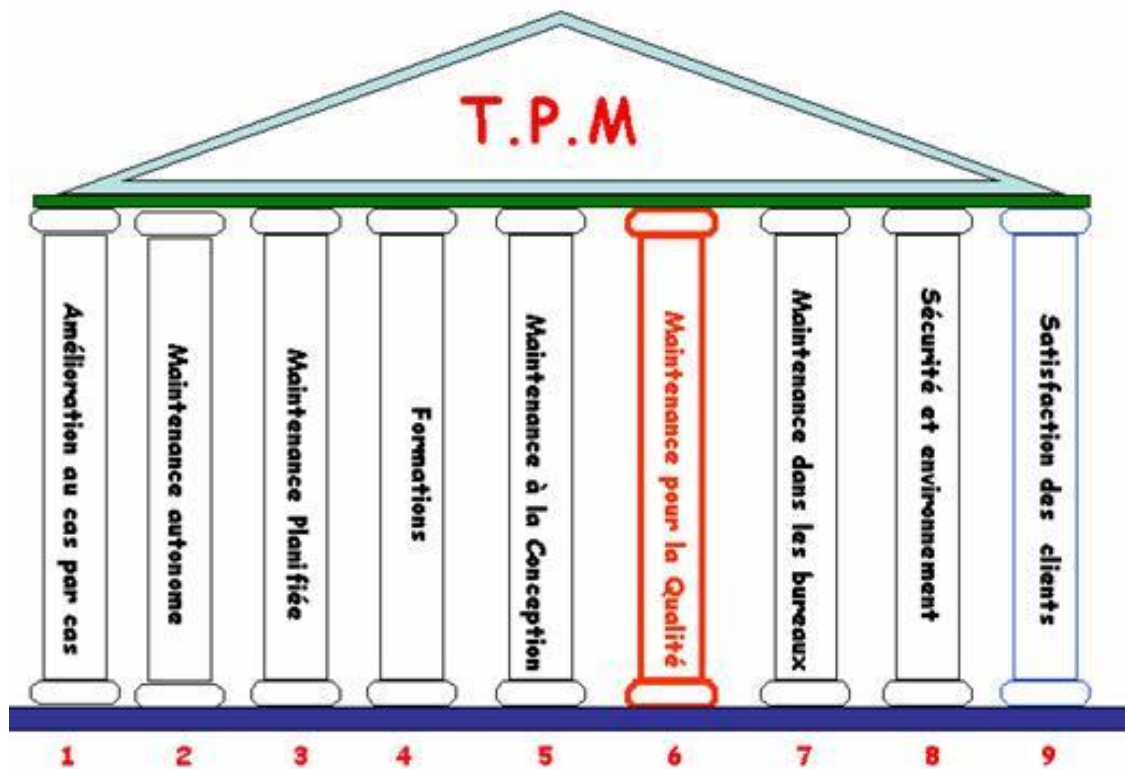


Figure I. 3 : Le principe de TPM.

### I.2.2.2 Objectifs de la TPM

- Réduction du délai de mise au point des équipements ;
- Augmentation de la disponibilité et du taux de rendement systématique ;
- Augmentation de la durée de vie des équipements ;
- Participation des utilisateurs à la maintenance appuyés des spécialistes de maintenance ;
- Pratique se la maintenance préventive et conditionnelle [6].

### I.2.3 Objectifs de la maintenance

Les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types [9] :

### **I.2.3.1 Objectifs financiers :**

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance.
- Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget.

### **I.2.3.2 Objectifs opérationnels :**

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles ;
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum ;
- Augmenter la durée de vie des équipements. ;
- Entretenir les installations avec le minimum d'économie et les remplacer à des périodes  
Prédéterminées ;
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace à tout moment.

## **I.2.4 Fonction maintenance**

La mission principale de la fonction maintenance est le maintien par des actions préventives et correctives de la disponibilité de l'outil de production ; c'est-à-dire de son aptitude à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation données, pendant une période donnée par les normes AFNOR [2]. Autrement dit, la mission principale de la maintenance est la gestion optimisée des équipements de production en fonction des objectifs propres à l'entreprise [1].

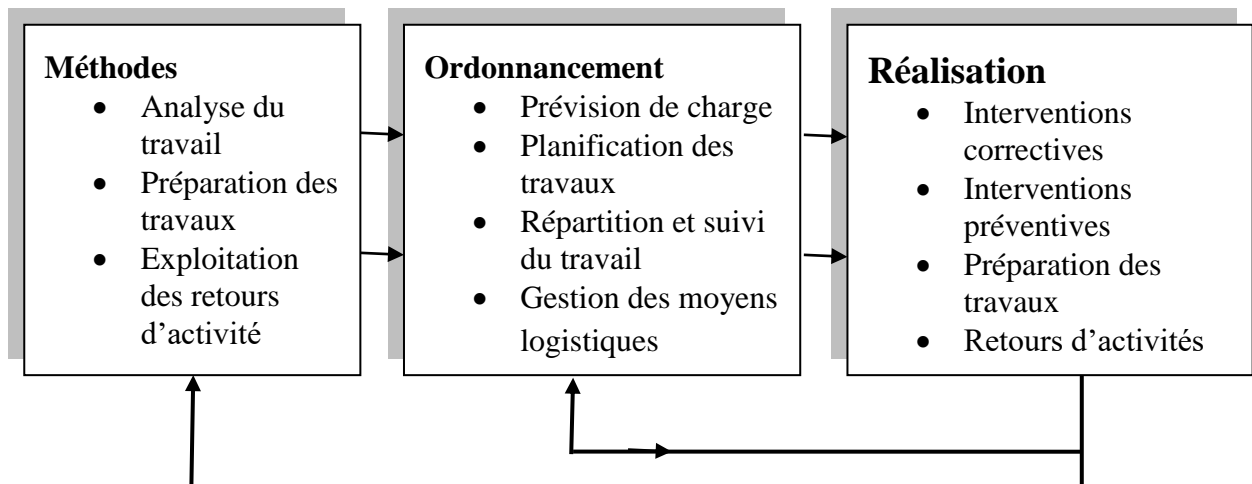


Figure I.4 : Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance [1].

### I.2.4.1 Méthodes

La préparation est la vocation première des services méthodes. Pour la maintenance corrective, la préparation passe par l'anticipation des risques encourus, puis par une anticipation des problèmes qui peuvent freiner l'intervenant. Pour la maintenance préventive, elle consiste à définir le plan de maintenance d'un équipement, puis à évaluer son coût et son efficacité afin de les optimiser. Pour la maintenance externalisée, la préparation consiste à définir les règles et les procédures destinées au prestataire choisi, puis « d'accompagner » le prestataire lors de ces travaux sur site. [1]

D'autres activités sont généralement confiées au service méthode :

- Propositions d'améliorations techniques et/ou organisationnelles ;
- Assistance technique sur site - soutien aux intervenants sur site - aide au diagnostic ;

Les Agents méthodes doivent être en phase avec le terrain et doivent également prendre du recul Par rapport à l'évènement instantané, qui était seul pris en compte au temps de l'entretien. [1]

### **I.2.4.2 Ordonnancement**

La fonction ordonnancement est le chef d'orchestre de la maintenance. Elle a la responsabilité de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées. Les missions principales de l'ordonnancement sont la planification des travaux, l'optimisation des moyens en fonction des délais et chemins critiques, et le contrôle de l'avancement des travaux. Cela peut s'exprimer sous la forme : prévoir à l'instant  $t$  et un endroit  $x$  où un personnel  $p$  muni d'un outillage  $o$  et des matières  $m$  exécutera la tâche  $M$  en harmonie avec les autres travaux connexes. La difficulté principale de l'ordonnancement vient du caractère fortuit de la panne : comment intégrer les dépannages à un planning Certains services de maintenance prétextent cette contradiction pour ne pas ordonnancer leurs activités, si 90% de leurs activités sont fortuites, ils ne peuvent guère faire autrement. Mais si grâce à une politique de prévention, ce taux passe à moins de 50% ce fortuit devient programmable. [1]

### **I.2.4.3 Réalisation des interventions**

La fonction réalisation a pour objet d'utiliser les moyens mis à disposition, suivant les procédures imposées, dans les délais préconisés, pour réaliser dans les règles de l'art, une tâche définie et remettre le matériel dans un état spécifié. La réalisation peut nécessiter un diagnostic c'est-à-dire identifier et caractériser la défaillance. [1]

## **I.2.5 Les fonctions d'un système de maintenance**

Les fonctions d'un système de maintenance regroupent deux sous-ensembles [8] :

- Les activités relatives à des aspects techniques : représentent les tâches industrielles primaires d'entretien, et sont souvent englobées dans la supervision, notamment quand il s'agit de traiter des systèmes complexes tels que des centrales nucléaires.

- Les activités relatives à la gestion et à l'organisation de la maintenance : représente les tâches de gestion du parc d'équipements, les ressources humaines et matérielles, la documentation, etc. et d'organisation des activités correspondantes.

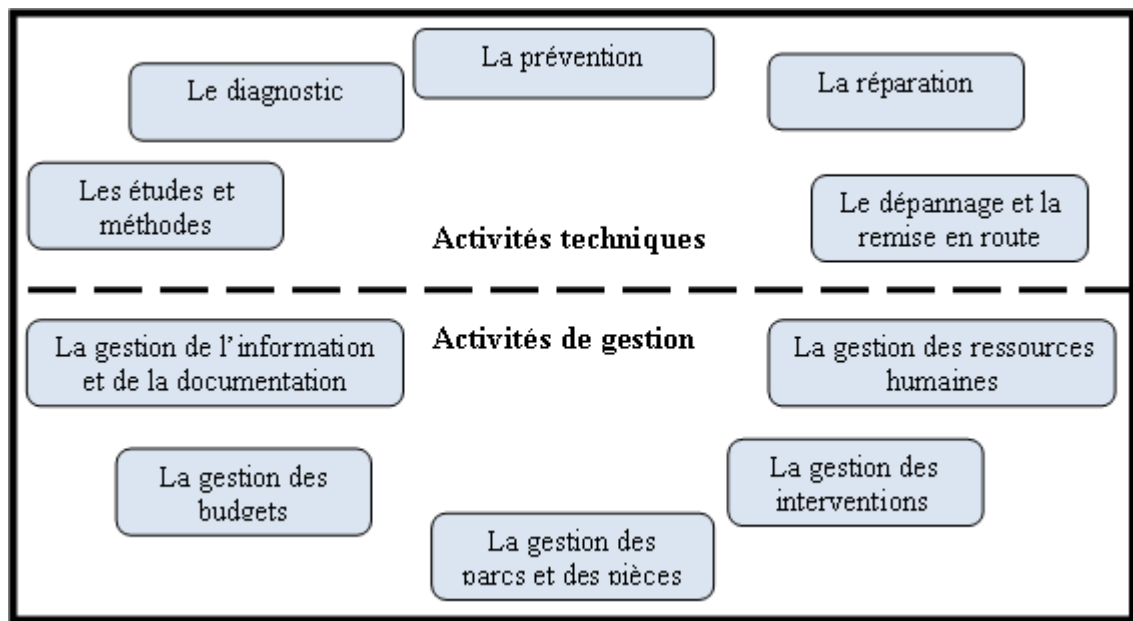


Figure I.5 : Le contenu fonctionnel d'un système de maintenance [8].

## I.2.6 Les méthodes de la maintenance :

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise. Pour choisir, il faut être informé des objectifs de la direction, des décisions politiques de maintenance, mais il faut aussi connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels ; le comportement du matériel en exploitation ; les conditions d'application de chaque méthode ; les coûts de maintenance et les coûts de perte de production.[10]

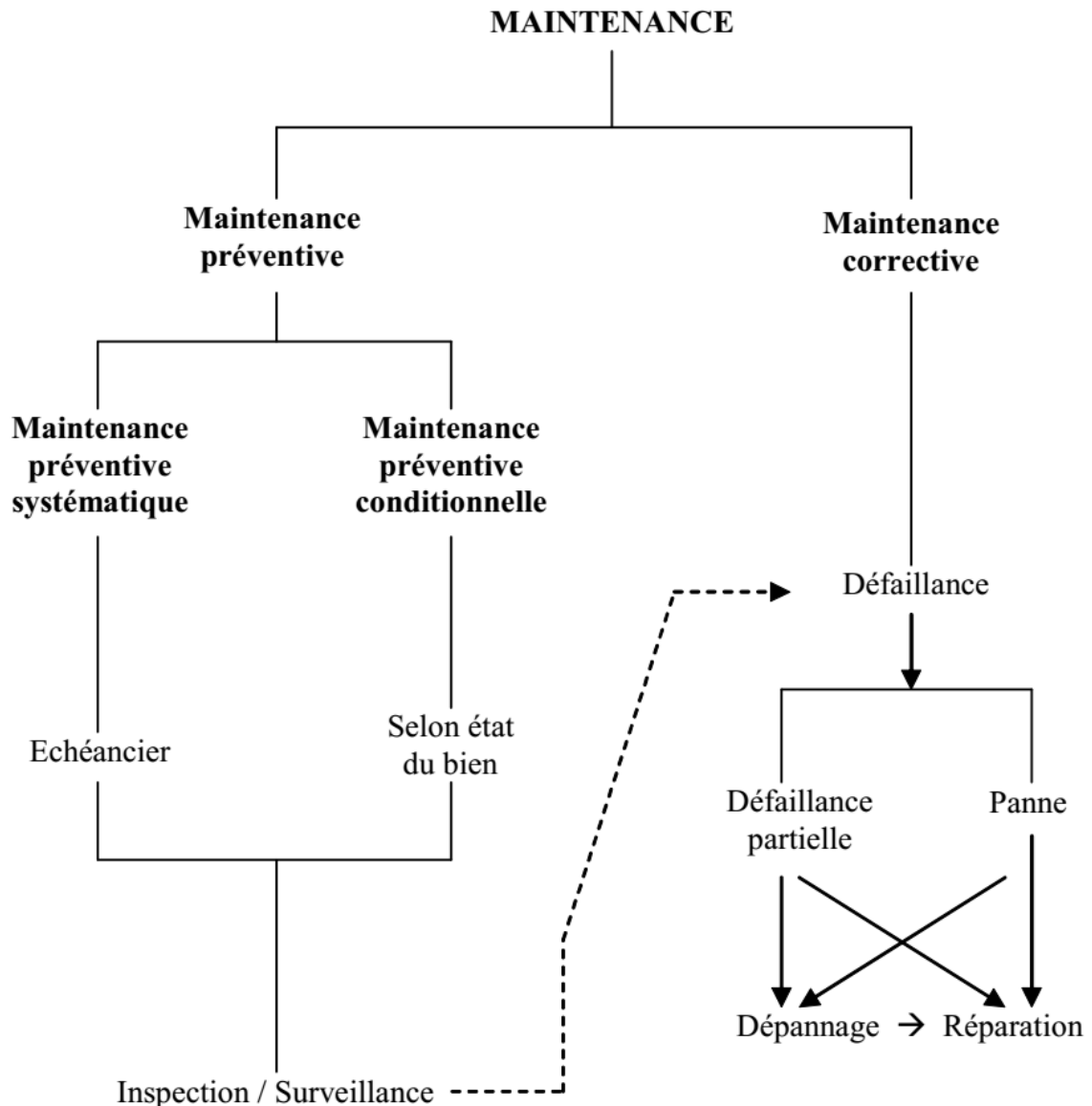


Figure I.6 : Les méthodes de la maintenance.

### I.2.6.1 Maintenance corrective

Selon la norme AFNOR NF EN 13306 X 60-319[4], c'est une « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». La maintenance corrective est le type de maintenance s'apparentant le plus à l'entretien traditionnel dans la mesure où on intervient sur le matériel après l'apparition d'une défaillance en vue de le remettre en service. On en distingue deux types :

- **Maintenance palliative** : concernant principalement des opérations de dépannage (action sur un bien en panne en vue de le remettre en état de fonctionnement, provisoirement avant réparation) dont l'objectif est de supprimer les effets de la défaillance, elles sont de caractère provisoire.

- **Maintenance curative** : regroupe les opérations de réparation (intervention définitive et limitée de maintenance corrective), dont l'objectif est de ramener le matériel à un niveau de performance donné, elles sont de caractère définitif.

### **Les opérations de maintenance corrective :**

- **Le dépannage**

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. Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette connaissance permet souvent de gagner du temps. Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnent en continu dont les impératifs de production interdisent toute visites ou intervention à l'arrêt.[11]

- **La réparation**

Actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou Systématique. [11]

- **Les révisions**

Ensemble des actions et examens de contrôle et d'intervention effectuée en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour nombre d'unités d'usage donnée.[11]

### I.2.6.2 Maintenance préventive

Selon la norme AFNOR NF EN 13306 X 60-319[4], c'est une « 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 ». Donc c'est une intervention prévue, préparée et programmée en fonction de différents paramètres en vue d'éviter l'apparition probable d'une défaillance identifiée. Il existe trois formes principales de la maintenance préventive :

- **Maintenance préventive systématique** : « Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien » (norme NF EN 13306 X 60-319) [4]. Cette maintenance comprend des inspections périodiques et des interventions planifiées.

- **Maintenance préventive conditionnelle** : « Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de son fonctionnement intégrant les actions qui en découlent » (norme NF EN 13306 X 60-319) [4]. Dans ce cas il n'y a pas d'échéancier mais c'est le franchissement d'un seuil qui provoque l'intervention. Elle peut être appliquée à des matériaux dont le comportement est peu ou pas connu.

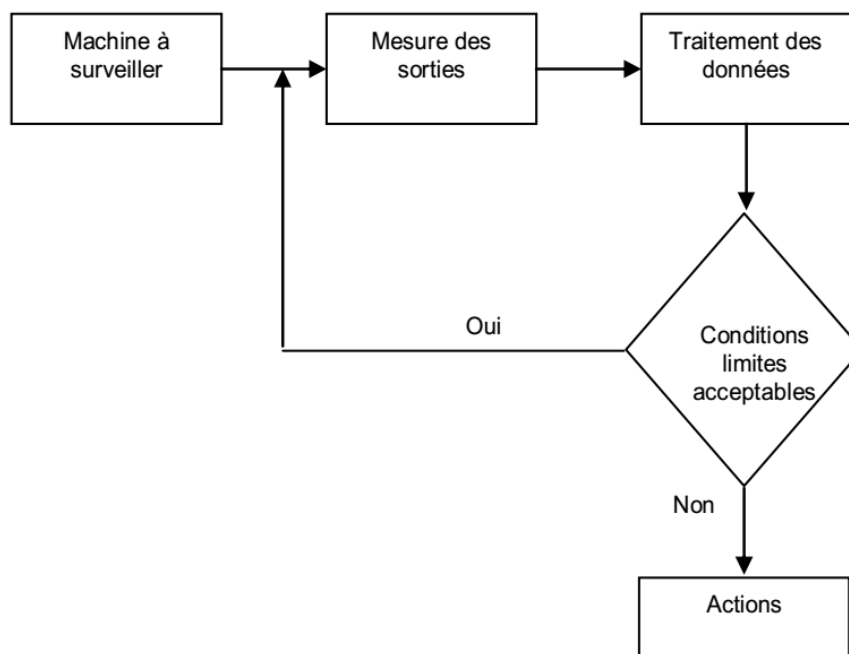


Figure I.7 : Structure de la maintenance conditionnelle.

- **Maintenance préventive prévisionnelle** : Lorsque la maintenance préventive est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste avant l'observation de l'événement redouté, on parle de maintenance prévisionnelle. Une maintenance prévisionnelle peut prendre en compte un âge du matériel qui n'est pas forcément calendaire mais par exemple le temps de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection. Cependant, la maintenance systématique est coûteuse car l'usure des pièces dépend beaucoup des conditions de fonctionnement. Elle risque donc d'intervenir trop tôt ou trop tard .

### **Les opérations de maintenance préventive :**

- **Inspection**

C'est l'activité de surveillance consistant à relever Périodiquement des anomalies, et d'exécution de réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique ni l'arrêt des équipements. [11]

- **Le contrôle**

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

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

Les opérations de surveillance (contrôles, visites, inspections) sont nécessaires pour maîtriser L'évolution de l'état réel du bien. Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles Prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage [11]

- **La visite**

C'est l'opération de surveillance de maintenance préventive systématique qui s'opère selon une périodicité prédéterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'organes et une immobilisation du matériel. [11]

## **I.2.7 Les niveaux de maintenance :**

Les opérations à réaliser sont classées, selon leur complexité, en cinq niveaux. Les niveaux pris en considération sont ceux de la norme NF X-60-01O. [2]

### **I.2.7.1 1er niveau de maintenance**

Actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien. Ce type d'opération peut être effectué par l'utilisateur du bien avec, le cas échéant, les équipements de soutien intégrés au bien et à l'aide des instructions d'utilisation.

### **I.2.7.2 2ème niveaux de maintenance**

Actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés au bien ou extérieurs) d'utilisation ou de mise en œuvre simple. Ce type d'actions de maintenance est effectué par un personnel qualifié avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance. 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.

### **I.2.7.3 3ème niveaux de maintenance**

Opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation ou de mise en œuvre complexes. Ce type d'opération de maintenance peut être effectué par un technicien qualifié, à l'aide de procédures détaillées et des équipements de soutien prévus dans les instructions de maintenance.

### **I.2.7.4 4ème niveaux de maintenance**

Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés. Ce type d'opération de maintenance est effectué par un technicien ou une équipe spécialisée à l'aide de toutes instructions de maintenance générales ou particulières.

### **I.2.7.5 5ème niveaux de maintenance**

Opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels, Par définition, ce type d'opérations de maintenance (rénovation, reconstruction, etc.) est effectué par

le constructeur ou par un service ou société spécialisée avec des équipements de soutien définis par le constructeur et donc proches de la fabrication du bien concerné [6].

### I.2.8 Choix de la forme de maintenance à mettre en œuvre : l'aide à la décision

Pour faciliter le choix de la forme de maintenance à mettre en œuvre, une « arbre de décision » oriente l'agent des méthodes sur une des formes de maintenance envisageable a priori [12].

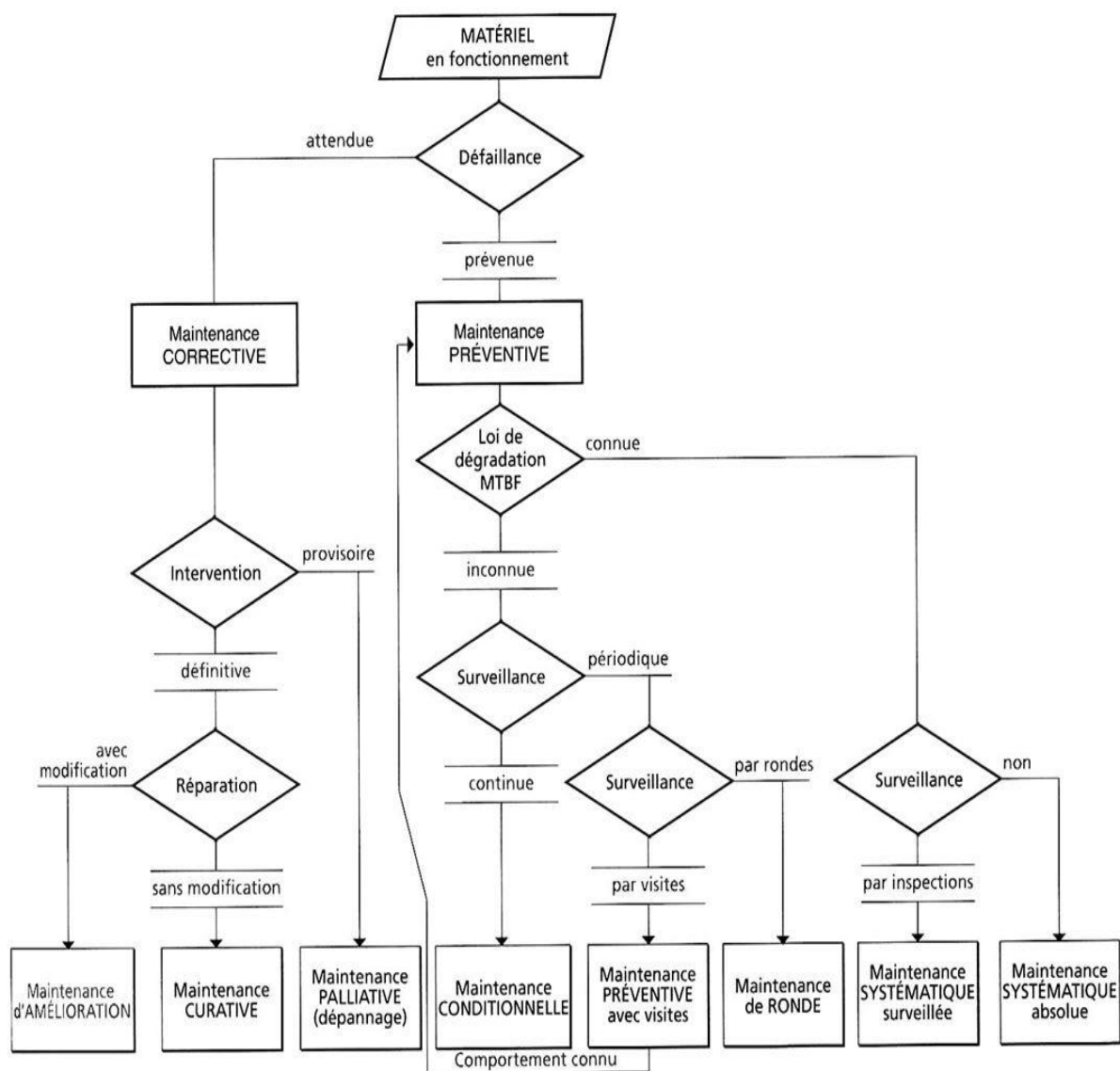


Figure I.8 : Exemple d'arbre de décision pour choisir la forme de maintenance adaptée à un sous-ensemble [12].

## I.2.9 L'environnement de la maintenance

La maintenance s'intègre dans le concept global de la sûreté de fonctionnement, qui lui-même s'intègre dans l'assurance Produit.

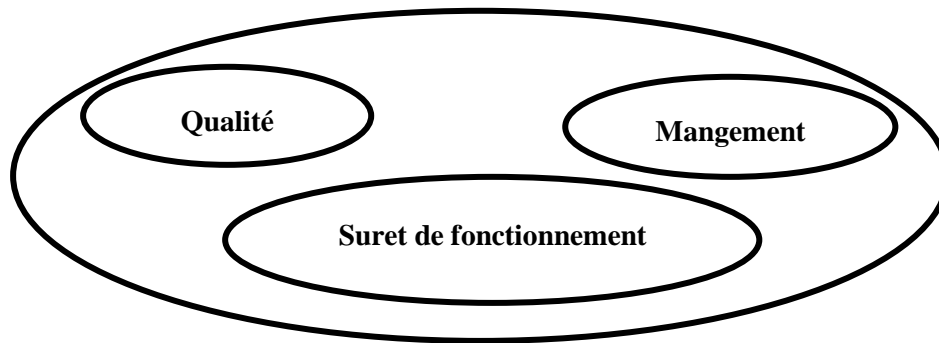


Figure I.9 : L'assurance produit [3].

## I.3 La Sûreté de fonctionnement

### I.3.1 Définition :

La sûreté de fonctionnement des systèmes industriels est définie au sens large comme étant « la science des défaillances ». Elle comprend différents paramètres tels que : la Fiabilité, la Maintenabilité, la Disponibilité, la Sécurité.

La sûreté de fonctionnement couvre toutes les étapes du cycle de vie d'un système : conception, fabrication, exploitation. [10]

On peut définir quatre grandeurs: [13]

1. **la fiabilité** « reliability » qui mesure la continuité de service ;
  2. **la maintenabilité** « maintainability » qui est l'aptitude aux réparations et aux évolutions ;
  3. **la disponibilité** « availability » qui est le fait d'être prêt à l'utilisation ;
  4. **la sécurité** « safety » qui est l'absence de conséquences catastrophiques pour l'environnement.
- [13]

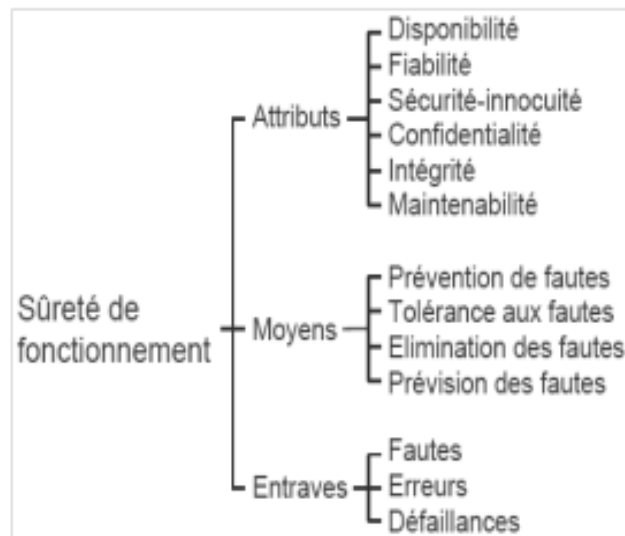


Figure I.10 : Arbre de la Sûreté de Fonctionnement[14].

## I.3.2 Fiabilité

- la fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminés.
- le terme « fiabilité » est utilisé comme une caractéristique indiquant une probabilité de succès [16].

### I.3.2.1 Différents types de fiabilité [15]

- **Fiabilité opérationnelle** : (observée) résulte de l'observation et de l'analyse du comportement d'entités identiques dans des conditions opérationnelles ;
- **Fiabilité extrapolée** : qui résulte d'une extension (par extrapolation définie ou par interpolation) de la fiabilité opérationnelle à des durées ou des conditions différentes ;
- **Fiabilité prévisionnelle** : (prédite) qui estime une fiabilité future à partir de considérations sur la conception des systèmes et la fiabilité de leurs composants ;
- **Fiabilité intrinsèque** : mesurée au cours d'essais spécifiques effectués dans le cadre d'un programme d'essais entièrement défini.

### I.3.2.2 Analyse de la fiabilité [3]

Cette loi “loi exponentielle“ a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C’est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance est constant. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales [39]. Les propriétés principales de la distribution exponentielle sont :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (I.1)$$

défiabilité à la date t (notée F(t): probabilité de défaillance avant t fig(I.10)

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (I.2)$$

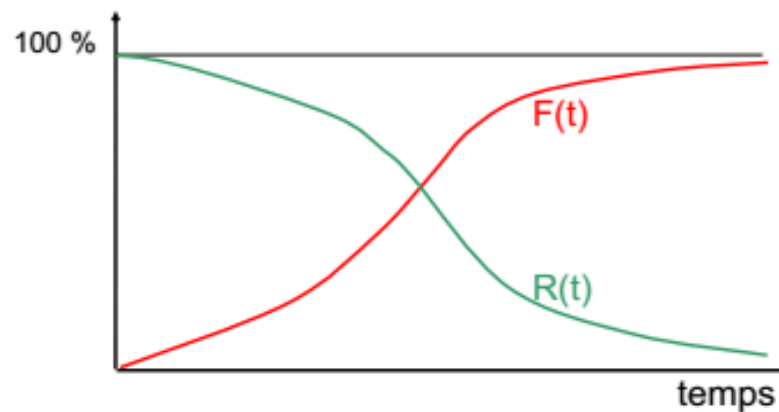


Figure I.11 : La fiabilité et défiabilité[10] .

### I.3.2.3 Fiabilité d’un système [10]

- **Système série:** la défaillance d’un seul composant entraîne la défaillance du système

$$R_{\text{syst}} = \prod (1 \wedge) R_i(t) \quad (I.3)$$

- **Système parallèle:** il faut que tous les composants soient défaillants pour que le C1 système soit défaillant (chacun des composants peut assurer seul la mission)

$$R_{\text{syst}} = 1 - \prod (1 \wedge) [1 - R_i(t)] \quad (I.4)$$

- **système mixte:** constitué de sous-ensembles série, en parallèle

### I.3.2.4 Etude de la fiabilité

Avant d'entamer l'étude et l'évaluation de la fiabilité, il est nécessaire de rappeler quelques définitions, tels que taux de défaillance, MTBF et MTTF...etc.[6].

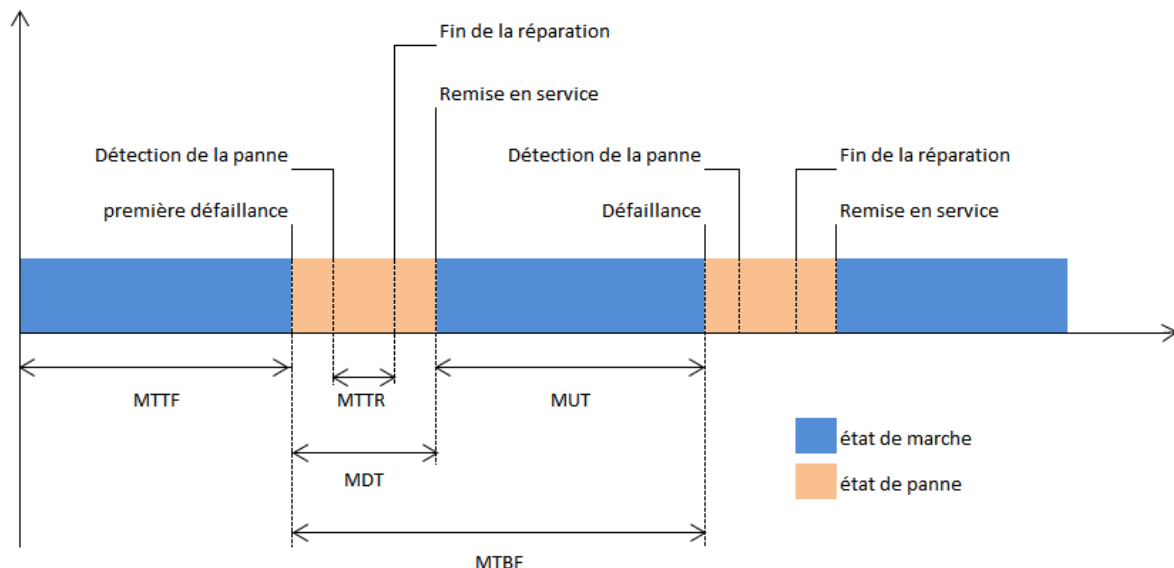


Figure I.12 : Représentation du MTTF, du MUT, du MDT et du MTBF.

## I.3.3 Définitions

Dans un premier temps, on va donner quelques définitions afin de comprendre comment calculer la fiabilité.

### I.3.3.1 Défaut

Un défaut est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications requises [2].

### I.3.3.2 Défaillance

D'après la norme AFNOR 60010X : une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques .



Figure I.13 : Relation faute-erreur-défaillance [11].

### I.3.3.3 Panne

Une panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation du dispositif à accomplir sa fonction, le dispositif sera déclaré en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance. Les pannes sont classifiées d'une façon similaire aux défaillances. Cependant il existe une classification particulière aux pannes : panne intermittente et panne fugitive [2].

### I.3.3.4 Taux de défaillance $\lambda(t)$

Le taux de défaillance d'un composant est une fonction du temps. Il donne une fréquence d'occurrence instantanée de défaillance pour un intervalle de temps très court.

Cette fréquence d'occurrence instantanée augmente généralement avec le temps .

La probabilité pour qu'un système défaille à un instant donné  $t$  peut être représentée par la loi exponentielle. Le taux de défaillance de chaque composant est représenté par une constante strictement positive  $\lambda(t) = \lambda$  pour tout  $t > 0$  :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (I.5)$$

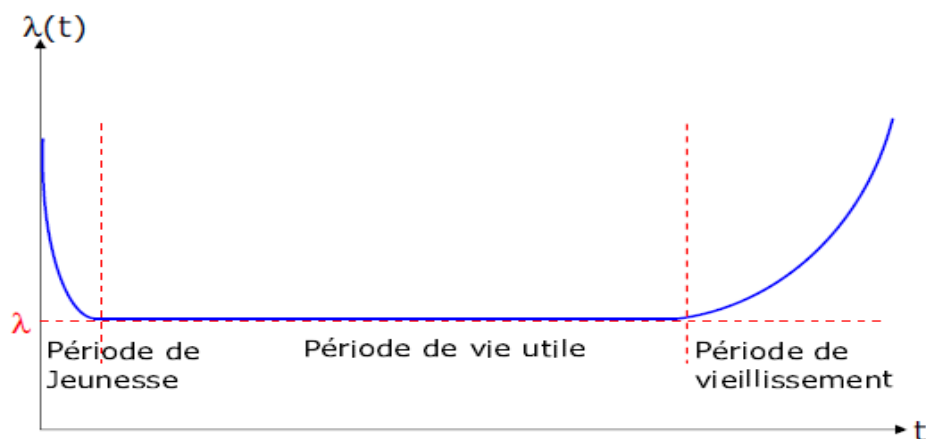


Figure I.14 : Taux de défaillance en fonction du temps.

### I.3.3.5 Taux de réparation $\mu(t)$

Le taux de réparation s'obtient par la relation suivante :

$$\mu(t) = \frac{1}{MTTR} \quad (\text{I.6})$$

Le taux de réparation indique l'aptitude d'un bien à être dépanné et/ou réparé. Dans le cas où il est constant la fonction de maintenabilité est :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (\text{I.7})$$

### I.3.3.6 MTBF (Mean Time between Failures)

Représente le temps moyen entre deux défaillances, il est calculé en inversant le taux de défaillance  $\lambda$  :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{I.8})$$

Il est aussi appelé « indicateur de fiabilité », puisque il donne l'image de la qualité du comportement des systèmes [B.Z].

### I.3.3.7 MTTF (Mean Time to Failure)

C'est le temps moyen de fonctionnement jusqu'à l'occurrence de la première défaillance :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{I.9})$$

- **MUT (mean up time)** : ou TMD temps moyen de disponibilité, espérance

mathématique de la durée de disponibilité. [15]

- **MDT (mean down time)** : ou TMI temps moyen d'indisponibilité, espérance mathématique de la durée d'indisponibilité. [15]

### I.3.4 Maintenabilité

(AFNOR X-06-010) [2] : «Aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il puisse accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions d'utilisation données avec des moyens et procédures prescrits». Suivant la norme AFNOR c'est : dans les conditions données d'utilisation, l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits. La maintenabilité est la mesure de l'aptitude d'un dispositif (« item ») à être maintenu ou remis dans des conditions spécifiques lorsque la maintenance de celui-ci est réalisée par des agents ayant les niveaux spécifiés de compétence, utilisant les procédures et les ressources prescrites, à tous les niveaux prescrits de maintenance et de réparation. La maintenabilité d'un équipement dépend essentiellement de la facilité de démontage de ces éléments consécutifs et de leurs interchangeabilité.

- Maintenabilité intrinsèque.
- Maintenabilité extrinsèque

C'est la probabilité pour qu'un dispositif soit réparé avant (t).

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (\text{I.10})$$

$M(t)$  : est constant alors  $\mu$  : taux de réparation

### I.3.5 La Disponibilité

Selon la norme (NF EN 13306) [4], la disponibilité est spécifiée comme étant 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.

Elle se caractérise par la probabilité  $A(t)$  ou  $D(t)$  qu'une entité E soit en état, à l'instant t, d'accomplir les fonctions requises. Elle est le résultat de la coalition de la fiabilité et de la maintenabilité ; c'est la proportion du temps passé en état de remplir les fonctions requises dans les conditions données.

$$A(t) = P [E \text{ non défaillante à l'instant } t] \quad (\text{I.11})$$

Pour les articles non réparables, la notion de la disponibilité reste identique à celle de la fiabilité, tant que pour les articles réparables, ce concept a plus de vigueur lorsque les pannes sont rares et courtes, c'est-à-dire lorsque l'article est fiable et maintenable.

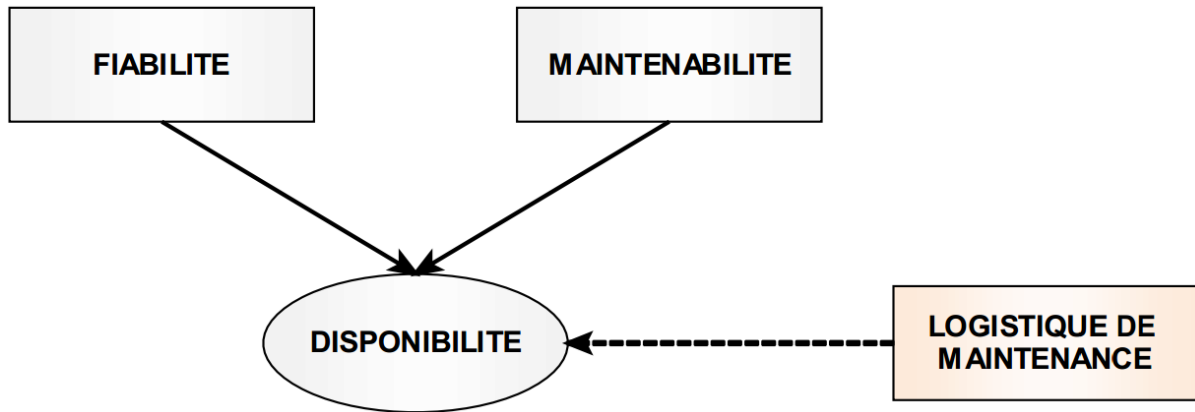


Figure I.15 : La disponibilité.

La disponibilité est souvent quantifiée par ces deux indicateurs : La durée moyenne sans panne (MTTF) et le temps moyen jusqu'à réparation (MTTR). Alors la disponibilité moyenne peut être évaluée par le rapport :

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (I.12)$$

C'est la probabilité pour qu'un dispositif puisse accomplir une fonction requise dans des conditions données et une instante donnée,[14].

$$D(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (I.13)$$

### I.3.6 Sécurité

aptitude d'un système à ne pas générer, des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques probabilité que le système évite de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

### **I.3.6.1 Sécurité d'une machine**

Aptitude d'une machine à accomplir sa fonction, à être transportée, installée, mise au point, entretenue et mise au rebut dans les conditions d'utilisation normale spécifiées dans la notice d'instructions, sans causer de lésion ou d'atteinte à la santé [16]

### **I.3.6.2 Risque**

le risque relatif au phénomène dangereux considéré est une fonction de la gravité du dommage possible pouvant résulter du phénomène dangereux considéré et de la probabilité d'occurrence du dommage. [16]

## **I.3.7 Méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement**

Une analyse prévisionnelle de sûreté de fonctionnement est un processus d'étude d'un système réel de façon à produire un modèle abstrait du système relatif à une caractéristique de sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité). Les éléments de ce modèle seront des événements susceptibles de se produire dans le système et son environnement, tels par exemple :

- des défaillances et des pannes des composants du système ;
- des événements liés à l'environnement ;
- des erreurs humaines en phase d'exploitation.

Le modèle permet ainsi de représenter toutes les défaillances et les pannes des composants du Système qui compromettent une des caractéristiques de SDF.

Au d'aider l'analyste, plusieurs méthodes d'analyse ont été mises au point. Les principales sont : [14]

### **I.3.7.1 L'analyse ABC :**

Cette loi est issue des travaux de WILFREDO PARETO, économiste italien (1848 – 1923), elle fait ressortir une concordance entre le faible pourcentage du nombre d'événements observés et le fort pourcentage de la variable induite étudiée et qui permet de faire apparaître les éléments représentatifs :

- a. D'une fabrication ;

- b. Du produit en stock ;
- c. Des clients, des fournisseurs ;
- d. Des pannes, des prélèvements.

Alors, c'est un moyen d'analyse qui permet de mettre en évidence, les individus d'une population les plus marqués par le critère qui aura un impact significatif sur l'ensemble du fonctionnement.

Cette façon de procéder permettra de maîtriser petit à petit les différents domaines d'intervention et aidera à mieux planifier les travaux de maintenance corrective ou préventive. [5]

- **Courbe théorique**

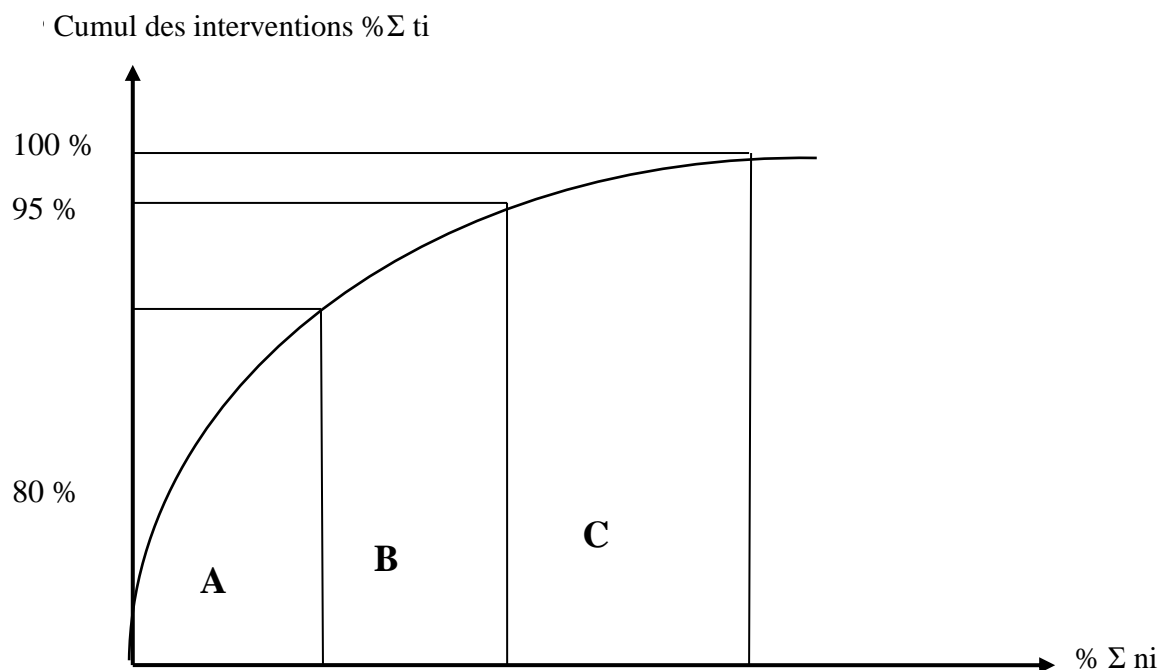


Figure I.16 : courbe théorique d'analyse ABC [5] .

20% 50% 100% Cumul des pannes

Zone A : (zone de priorité) dans cette zone 20% des pannes représentent 80% des temps d'arrêts.

Zone B : dans cette zone 30% des pannes représentent 15% des temps d'arrêts, c'est la zone la moins importante.

Zone C : dans cette zone 50% des pannes représentent 5% des heures d'arrêt, c'est la zone la moins importante.

Comment constituons-nous le diagramme ABC

- 1 - On classe les pannes par ordre croissant et devant chaque panne sa durée ;
- 2 - On calcule les cumuls des temps et des pannes ;

3 - On calcule les pourcentages cumulés des temps et des pannes ;

4 – On établit un graphique en abscisse les pourcentages cumulés des pannes et en ordonnées les pourcentages cumulés des temps. [5]

### I.3.7.2 Analyse Préliminaire de Risque (APR) :

L'Analyse Préliminaire de Risques est la première étape de la politique de gestion de risques, l'Analyse de la Valeur étant considérée comme une phase d'étude et non d'analyse de risques.

C'est une analyse déductive dont les objectifs sont : de forcer le projet à pratiquer une décomposition fonctionnelle de base, de tout le concept de l'instrument, y compris les softs, pendant la phase de design, L'identification des erreurs et des non-conformités de design en comparaison aux spécifications d'origine, l'identification très tôt dans le déroulement du projet, des modes de pannes possibles et en particulier des pannes à effet catastrophique sur le système, ces dernières sont traitées en priorité, l'apport de modifications pour réduire le nombre d'éléments critiques et, plus généralement, pour réduire les risques de pannes, [14].

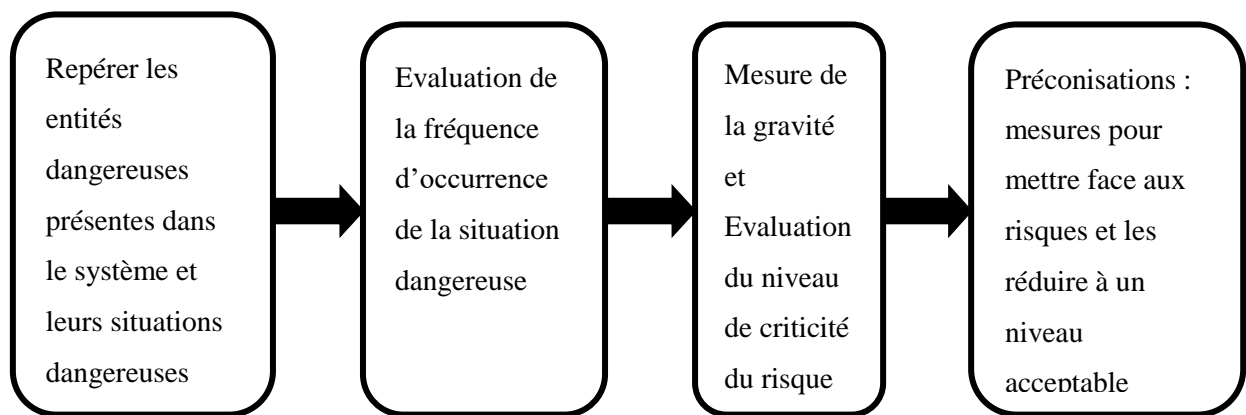


Figure I.17 : Démarche de l'analyse préliminaire des risques.

### I.3.7.3 La méthodologie AMDEC

- **Présentation générale**

L'AMDEC est la traduction de l'anglais FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, littérairement : "Analyse des modes, des effets et de la criticité (gravité) des défaillances"). C'est une méthode d'analyse préventive de la fiabilité d'un produit, d'un processus, ou d'un moyen de production ou d'un flux d'information. Elle permet d'hiérarchiser les défaillances redoutées pour définir des actions correctives pertinentes et efficaces. C'est un outil

d'optimisation qui peut être utilisé au cours des phases de conception et d'exploitation d'un SGMAO [17].

Les Buts de l'AMDEC : «Rendre apte un produit, un processus de fabrication ou une organisation à remplir sa fonction et à atteindre ses objectifs ». Cela se fait par : l'identification des problèmes potentiels, la déterminant les mesures qui permettront de se prémunir contre ces problèmes potentiels et ensuite incorporer ces mesures aux pratiques de travail.

L'AMDEC est une méthode qui permettra d'obtenir la qualité par une action préventive plutôt que curative. Elle s'applique soit en phase de conception (innovation), soit en phase de maîtrise.

L'AMDEC est utilisée tout au long du processus de conception dans plusieurs secteurs industriels : les automobiles, aéronautique et du ferroviaire ... etc. Une méthode dérivée de l'AMDEC est aussi utilisée dans les industries agro-alimentaires, chimiques et pharmaceutiques : le HACCP. Cette méthode s'intéresse plus particulièrement à la fabrication. Ainsi, l'AMDEC est un outil très intéressant pour la sûreté de fonctionnement ; mais, elle ne permet pas cependant d'avoir une vision croisée des pannes possibles et de leurs conséquences, si deux pannes surviennent en même temps sur deux sous-systèmes, l'AMDEC ne donnera pas la conséquence sur le système entier.

Par exemple, dans l'aéronautique, les accidents d'avions sont très rarement liés à une seule défaillance ; ils le sont en général à plusieurs qui se manifestent simultanément. De plus, l'outil AMDEC ne doit pas devenir une fin en soi, ou que des acteurs considèrent que les problèmes notés dans l'AMDEC sont des problèmes résolus.

- **Les concepts d'AMDEC**

Les concepts de l'AMDEC sont basés sur les notions comme [17] :

- La défaillance : cessation ou altération d'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise. (Fonction principale ou secondaire) ;
- La cause de défaillance (amont) : circonstances associées à la conception, à la fabrication ou à l'utilisation, qui ont entraîné une défaillance ;
- Effet d'une défaillance (aval) : symptôme par lequel est décelée l'altération ou la cessation d'une fonction requise, et qui en est la conséquence ;
- Mode de défaillance : manière dont le bien vient à ne plus remplir la fonction requise.

Une défaillance intervient avec la combinaison de 3 éléments indépendants qui sont : la

Probabilité de présence d'une cause de défaillance, l'absence de détection de la défaillance et la façon dont est atteint l'utilisateur par cette défaillance, c'est-à-dire sa gravité. L'originalité de la méthode AMDEC consiste à noter chaque mode de défaillance identifié selon 3 axes : la

fréquence d'apparition (F), la gravité de l'effet pour le client (G) et enfin la probabilité de détection (D). On définit alors un « niveau de priorité de risque » NPR ou criticité C :

$$\text{NPR} = \text{F} * \text{G} * \text{D}$$

En adoptant le tableau suivant de cotation d'un mode de défaillance, dès que le NPR dépasse, il faut déclencher une action corrective afin de le ramener en dessous de la limite. Chaque action doit préciser : quel type d'action envisagée, qui est responsable de l'action, la note espérée à l'issue de l'action, le délai.

Cotations	Fréquences	Gravité	Détection
1 à 3	Jamais ou presque	Sans conséquence	100% ou presque
4 à 6	Possible	Mécontentement	Non optimale
7 à 9	Souvent	Très mécontent/panne critique	Inexistante/incertaine
10	Toujours	Problème de sécurité	Impossible

Tableau I.1 – Cotation d'un mode de défaillance [17].

#### Différents types d'AMDEC

On peut distinguer trois types d'AMDEC [17] :

- **AMDEC moyens de production (moyen ou machine)** : analyse des défaillances à la conception et/ou à l'utilisation d'un outil de production par rapport à la sûreté de son fonctionnement et à la conformité du produit à fabriquer ;
- **AMDEC produit ou service** : analyse de la conception du produit ou du service afin de déterminer les défaillances potentielles à partir de l'analyse fonctionnelle de ce produit ou de ce service ;
- **AMDEC processus** : analyse des défauts qui peuvent affecter le produit (output) et qui sont imputable au processus.

### La démarche AMDEC

- **Initialisation de l'étude AMDEC** : son but est de préciser le sujet étudié ainsi que les objectifs et les causes limitent de l'étude, ensuite planifier les tâches à faire et distribuer les rôles du groupe de travail.
- **Préparation de l'analyse** : préparer un cahier de charges fonctionnelles détaillé pour la démarche.
- **Identification des causes de défaillance** : identifier les modes de défaillance potentiels de la machine, du produit ou du processus étudié. La méthode utilisée est le « déballage d'idées » ou brainstorming. On exprime pour chaque type d'AMDEC les défaillances possibles en les catégorisant ; comme par exemple : la fonction ne se réalise pas, cesse de se réaliser, réalise mais de manière dégradée ou bien la fonction se réalise de façon intempestive. Quel que soit le type d'AMDEC, chaque mode sera déclinée en : effet, causes, détection.. L'identification des causes de défaillance constitue l'ossature de l'AMDEC. La recherche de la cause consiste à mettre en évidence les causes, sous causes ... (la chaîne causale) qui entraînent le défaut jusqu'à la cause maîtrisable, il faut donc identifier l'arbre de défaillance.
  - **Évaluation et hiérarchisation des causes de défaillance** : il faut évaluer chaque mode de défaillance en termes de criticité et veiller à l'homogénéité de la notation.
  - **Recherche des actions correctives** : diminuer la probabilité d'apparition de la cause ou de mettre en place un contrôle pour diminuer le risque lié à la détection. Pour chaque action corrective, il faut préciser le triplet : une action, une personne, un délai.
  - **Mise en œuvre des solutions** : les décisions sont prises en tenant compte : de l'analyse AMDEC, des orientations stratégiques et économiques du produit, des coûts et délais des différentes solutions. Un calendrier des actions à réaliser doit être établi.
  - **Suivi des actions et bouclage si nécessaire** : Après la mise en œuvre des solutions, il est impératif de vérifier si les objectifs visés sont atteints. Dans le cas contraire, il faut reboucler sur l'étude AMDEC.

#### I.3.7.4 Réseaux de pétri (RDP)

Un réseau de Pétri est constitué de places, transitions et arcs, qui vont représenter successivement les propriétés du système à modéliser lors de ses changements d'état, à travers les relations place/transition. Couplés à la simulation de Monte Carlo, ils permettent d'évaluer la fiabilité disponibilité de systèmes divers et notamment dans le domaine de l'automatique et de la productique en considérant des transitions déterministes ou aléatoires.

Le pouvoir de modélisation de cette méthode est très riche, mais demande en contrepartie une grande maîtrise du processus de modélisation de la part de l'analyste qui doit en être expert. [11]

### **I.3.7.5 Arbre de Défaillance (AdD)**

Est une analyse déductive qui permet de représenter graphiquement les combinaisons d'événements élémentaires qui conduisent à la réalisation d'un événement redouté. L'arbre de fautes, dont la racine correspond à l'événement redouté pour lequel on cherche à évaluer la probabilité d'occurrence, est formé de niveaux successifs tels que chaque événement soit généré à partir des événements du niveau inférieur par l'intermédiaire d'opérateurs logiques (OU, ET). La décomposition s'arrête au niveau des événements élémentaires, caractérisés par le fait qu'ils sont indépendants entre eux ou que leurs probabilités peuvent être estimées ou qu'on ne désire pas les décomposer en éléments plus simples. L'analyse peut être uniquement qualitative, par recherche systématique des combinaisons minimales de défaillances entraînant l'apparition de l'événement redouté (coupes minimales) afin d'identifier les chemins les plus critiques, et donc d'identifier les points faibles du système, ou quantitative ; dans ce cas, on assigne à chaque événement de base une indisponibilité pour effectuer le calcul de la valeur d'indisponibilité de l'événement redouté. [14]

### **I.3.7.6 Graphes de Markov (GM)**

Les graphes de Markov sont une représentation des systèmes permettant de rendre compte de leur comportement en tenant compte des dépendances entre leurs éléments constitutifs. L'approche est basée sur l'identification des différents états du système (Méthode de l'Espace d'Etats ) et l'analyse de la dynamique d'évolution entre ces états Les sommets du graphe correspondant aux différents états du système ; les sommets sont reliés par des arcs values à l'aide de taux (ou de probabilités) de transition non nuls associés aux évènements correspondant aux conditions de passage (les transitions) qui font évoluer le système d'un état à un autre. Les graphes de Markov sont couramment utilisés pour étudier la fiabilité des systèmes réparables. Le modèle associe une représentation graphique et son écriture matricielle (matrice de transition). Les traitements relèvent de calcul matriciel à partir de l'équation de Chapman Kolmogorov : à chaque instant  $t$ , la probabilité d'occupation d'un état du système ne dépend que la distribution initiale (à  $t=0$ ) d'occupation des états et de la matrice de transition, Les résultats sont quantitatifs : probabilités d'occupation d'états, fréquence d'évènements,..., en régime transitoire ou permanent. Une structure de coût (bénéfices, pénalités,...) peut-être associée aux temps

d'occupation d'états ou aux événements déclencheurs de changement d'états permettant d'établir facilement différentes caractéristiques économiques. [10]

### **I.3.7.7 Simulation de Monte Carlo et convergences**

Pour certains auteurs, les techniques de Monte Carlo enveloppent toutes les méthodes qui utilisent des variables aléatoires ou pseudo-aléatoires pour modéliser les systèmes. Le système lui-même peut être déterministe ou stochastique [15].

La simulation de Monte Carlo est une méthode numérique basée sur le tirage de nombres aléatoires. La quantité que nous désirons estimer correspond à l'espérance mathématique d'une variable aléatoire. Le principe consiste à étudier l'évolution d'un système en simulant un modèle générique, représentant le comportement du système au cours de ce que nous appelons un scénario ou histoire [15].

La quantification de la quantité recherchée, par exemple la fiabilité ou la probabilité d'apparition d'un événement redouté, est alors basée sur l'étude d'un certain nombre de scénarios différents, permettant d'en extraire des résultats statistiques (estimateurs).

Pour effectuer une estimation de la probabilité d'apparition d'un événement redouté, nous pouvons associer un estimateur de type binaire à cette probabilité et incrémenter un compteur d'une unité pour chaque histoire dans laquelle l'événement se produit. L'estimation de la probabilité est alors obtenue en faisant le rapport entre le nombre d'histoires ayant connu un événement redouté et le nombre total d'histoires [15].

L'avantage de ce type d'approche est la quasi-insensibilité par rapport à la complexité et à la taille des systèmes modélisés. Cependant, dans le cadre de la sûreté de fonctionnement, le modèle est régi par des événements très rares (les défaillances) et des événements très fréquents (événements internes de la partie contrôle-commande et du processus physique), et ce simultanément. La simulation est alors cadencée par de nombreuses occurrences d'événements fréquents qui ne reflètent pas le comportement du système en présence de défaillances. C'est le problème de la simulation des événements rares. Un nombre important d'histoires est nécessaire pour voir apparaître un nombre suffisant d'occurrence de l'événement redouté, impliquant des temps de simulation importants, d'autant plus que l'on souhaite obtenir un intervalle de confiance acceptable [15].

Le principe de la simulation de Monte Carlo est donc le suivant [15] :

- animation du modèle par tirage de nombres au hasard pour réaliser des histoires possibles du système étudié ;
- récupération et exploitation des résultats statistiques intéressants. Du principe ci-dessus, il résulte plusieurs choses très importantes ;
- Le modèle doit être suffisamment détaillé pour représenter tous les modes de fonctionnement et de dysfonctionnement significatifs ;
- Le modèle doit être capable de représenter tous les changements d'état pour tenir compte des événements aléatoires mais aussi déterministes (liés à l'évolution continue) ;
- Un générateur de nombres aléatoires de bonne qualité est nécessaire pour animer le modèle ;
- Comme nous parlons de statistiques, cela sous-entend que de nombreuses histoires devront être réalisées afin de rassembler des échantillons statistiquement représentatifs et suffisants pour la précision recherchée.

Nous pensons avoir construit un outil de simulation de Monte Carlo pour l'évaluation des grandeurs de la sûreté de fonctionnement en contexte dynamique, répondant à ces critères.

## **I.4 Conclusion**

Le présent chapitre, nous a permis d'exprimer quelques notions de la maintenance industrielle telle que les types de maintenance, la politique de maintenance a pour objectif première de porter l'outil de production à son meilleur potentiel de disponibilité et ce, au coût minimal. La sûreté de fonctionnement rend compte de l'aptitude du système à remplir sa mission et à résister aux défaillances. Cette dernière est définie par ses quatre paramètres ; la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité. L'évaluation de fiabilité nécessite la connaissance de certains paramètres, tels que ; MTBF, taux de défaillance et le taux de réparation. Lors de l'évaluation de la fiabilité, on doit définir un modèle, par exemple un modèle de Markov et méthode monte Carlo sur lequel on applique une technique d'évaluation.

## **Chapitre II. Chaîne de Markov et Simulation de Monte Carlo**

# Chaîne de Markov et Simulation de Monte Carlo

## II.1 Introduction

Les méthodes de Monte-Carlo par chaînes de Markov permettent d'élargir grandement l'éventail des distributions pouvant être simulées numériquement. Elles sont relativement simples à implémenter et ne requièrent souvent que la connaissance de la fonction de densité cible à une constante près, ce qui les rend intéressantes dans de nombreuses situations.

Cependant, une implémentation naïve peut mener à des temps de calcul très longs, puisque la convergence de ces méthodes est relativement lente lorsqu'elles ne sont pas bien calibrées à une situation donnée.

Nous appellerons MCMC toute méthode permettant de simuler une distribution en utilisant une chaîne de Markov ergodique ayant celle-ci comme distribution stationnaire. Pour construire un tel algorithme, il faut donc déterminer un ensemble de probabilités de transition  $P$  approprié, c'est-à-dire irréductible, ergodique et ayant la bonne distribution stationnaire. [23]

## II.2 Chaîne de Markov

Une suite de variables aléatoires  $\{X_n\}_{n \geq 0}$  à valeurs dans l'espace dénombrable  $E$  est appelé processus stochastique (à temps discret) (à valeurs dans  $E$ ). L'ensemble  $E$  est l'espace d'état, dont les éléments seront notés  $i, j, k, \dots$ . Lorsque  $X_n = i$ , le processus est dit être dans, ou visiter, l'état  $i$  au temps  $n$ .

Les suites de variables aléatoires sont bien des processus stochastiques, mais du point de vue de la modélisation, elles ne sont pas satisfaisantes, ne prenant pas en compte la dynamique des systèmes en évolution, du fait de l'indépendance. Pour introduire cette dynamique, il faut tenir compte de l'influence du passé, ce que font les chaînes de Markov, à la façon des équations de récurrence dans les systèmes déterministes. En fait, les chaînes de Markov sont des processus stochastiques dont l'évolution est régie

par une équation de récurrence du type  $X_{n+1} = f(X_n, Z_{n+1})$ , où  $\{Z_n\}_{n \geq 1}$  est une suite indépendante de la valeur initiale  $X_0$ . Cette structure extrêmement simple suffit à générer une grande variété de comportements. C'est pour cela que les chaînes de Markov trouvent des applications dans beaucoup de domaines comme, par exemple, la biologie, la physique, la sociologie, la recherche opérationnelle et les sciences de l'ingénieur, ou elles donnent des réponses qualitatives aussi bien que quantitatives aux problèmes posés.

## II.2.1 Définitions et propriétés

### II.2.1.1 Définition 1 :(Chaîne de Markov)

Soit  $(X_n ; n \geq 0)$  une suite de variables aléatoires à valeurs dans l'ensemble des états  $E$  supposé égal à  $N$ . On dit que cette suite est une chaîne de Markov si, pour tout  $n \geq 0$  et toute suite  $(i_0, i_1, \dots, i_{n-1}, i, j)$ , on a :

$$\mathbb{P}(X_{n+1} = j | X_0 = i_0, \dots, X_n = i) = \mathbb{P}(X_{n+1} = j | X_n = i) \quad (\text{II.1})$$

#### Remarques

- L'état du processus à l'instant  $(n + 1)$  ne dépend que de celui à l'instant  $n$  précédent, mais non de ses états antérieurs.
- On dira qu'un tel processus est sans mémoire. [21]

### II.2.1.2 Définition 2 :(Chaîne de Markov homogène)

Une chaîne de Markov est dite homogène (dans le temps), si la probabilité précédente (II.1) ne dépend pas de  $n$ . IE, [21]

$$p_{ij}(n) = \mathbb{P}(X_{n+1} = j | X_n = i) = p_{ij} = \mathbb{P}(X_1 = j | X_0 = i), n \geq 0 \quad (\text{II.2})$$

### II.2.1.3 Définition 3 :(Probabilité de transition)

On définit la probabilité de transition de l'état  $i$  à l'état  $j$  entre les instants  $n$  et  $n + 1$  par la quantité [21] :

$$p_{ij} = \mathbb{P}(X_{n+1} = j | X_n = i), \forall i, j \in E \quad (\text{II.3})$$

Où,  $p_{ij}$  : P (pour que le système soit dans l'état  $j$  à l'instant  $n+1$  sachant à l'instant  $n$  il se trouvait à l'état  $i$ ).

#### II.2.1.4 Définition 4 : (Matrice de transition)

La matrice de transition est la matrice  $P$  dont le terme général  $p_{(i,j)}$  est la probabilité de transition de l'état  $i$  à l'état  $j$  en une étape [24],  $E$  est un ensemble fini ou dénombrable [21].  $P$  est une matrice :

- carrée,
- indépendante du temps

$$\text{La matrice } P = \begin{bmatrix} p(1,1) & \cdots & p(1,j) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p(i,1) & \cdots & p(i,j) \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$\sum_{j \in E} p_{ij} = 1$  (Matrice stochastique),

Cette matrice peut être de dimensions finies ou infinies selon qu'il existe un nombre fini ou infini d'états. [24]

#### II.2.2 Propriété de la matrice $P$

- $P$  admet 1 comme valeur propre ;
- Il existe un vecteur propre à gauche, associé à la valeur propre 1 qui définit une distribution de probabilité ;

#### Remarques

- Une chaîne de Markov homogène "saute" aléatoirement d'état en état, et la probabilité de chaque saut est donnée par la matrice de transition  $P$  ;
- La loi de  $X_0$  est appelée la loi initiale de la chaîne de Markov. [21]

On l'écrira

$$\pi_0 = (P(X_0 = 1); P(X_0 = 2), \dots, P(X_0 = N - 1); P(X_0 = N)) \quad (\text{II.5})$$

### II.2.3 Caractérisations d'une chaîne de Markov homogène

La suite  $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une chaîne de Markov homogène si et seulement si il existe une matrice  $P$  ayant la propriété suivante : pour tout  $n \in \mathbb{N}$  et pour tout  $i_0, \dots, i_n \in E$

$$P(X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_0 = i_0) p(i_0, i_1) \dots p(i_{n-1}, i_n) \quad (\text{II.6})$$

Dans ce cas,  $P$  est la matrice de transition de la chaîne de Markov homogène  $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ . [19]

### II.2.4 Les graphes d'états

Pour visualiser l'évolution d'une chaîne de Markov homogène, il est souvent utile de représenter la matrice de transition  $P$  de la chaîne de Markov par un graphe orienté : les nœuds du graphe sont les états possibles pour la chaîne de Markov, une flèche allant de l'état  $i$  à l'état  $j$  indique qu'il y a une probabilité strictement positive que le prochain état de la chaîne soit l'état  $j$  si elle est actuellement dans l'état  $i$ . On met le poids  $P(i, j)$  à la flèche allant de l'état  $i$  à l'état  $j$ . [25]

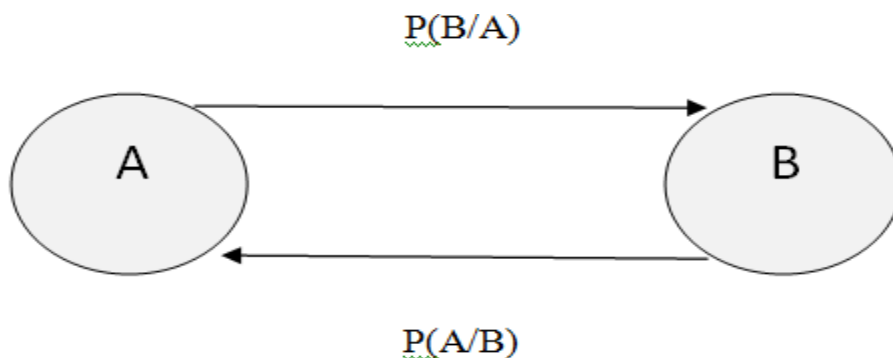


Figure II.1 : Graphe représenté l'état Markov

## II.2.5 Loi de probabilité de $X_n$

L'analyse du régime transitoire d'une chaîne de Markov consiste à déterminer le vecteur  $\pi^{(n)}$  des probabilités d'états qu'on note généralement  $\pi_i^{(n)} = P(X_n = i)$ , pour que la chaîne  $(X_n, n \in \mathbb{N})$  se trouve dans l'état  $i$  après  $n$  pas.

La distribution de  $X_n$  peut être décrite sous la forme de la vectrice ligne :

$\pi = (\pi_1^{(n)}, \pi_2^{(n)}, \dots)$ , dont la somme des termes vaut 1 :

Pour calculer le vecteur  $\pi^{(n)}$ , il faut connaître soit la valeur prise par  $X_0$ , c'est-à-dire l'état initial du processus, soit sa distribution initiale. [18]

$$\pi^{(0)} = (\pi_1^{(0)}, \pi_2^{(0)}, \dots, \pi_i^{(0)}, \dots) \quad (\text{II.7})$$

D'après le théorème des probabilités totales, on a

$$P(X_n = i) = \sum_{j \in E} P(X_0 = j) \cdot P(X_n = i | X_0 = j) \quad (\text{II.8})$$

$$\pi_i(n) = \sum_{j \in E} \pi_j(0) \cdot p_{ij}(n) \quad (\text{II.9})$$

Nous avons aussi la notation matricielle de la relation qui est donnée comme suit :

$$\pi^{(n)} = \pi^{(0)} P^{(n)} = \pi^{(0)} P^n \quad (\text{II.10})$$

De façon analogue, on obtient :

$$\pi^{(n)} = \pi^{(0)} P^{(n)} = \pi^{(0)} P^n \quad (\text{II.11})$$

### Propriété

Si la valeur propre 1 de la matrice stochastique  $P$  d'une chaîne de Markov homogène est simple et dominante (toute autre valeur propre est de module strictement inférieur à 1) alors la suite  $(P^n)_{n \in \mathbb{N}}$  converge vers une matrice strictement positive  $P^\infty$  de la forme :

$$P^\infty = \begin{pmatrix} p_1 & \cdots & p_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_1 & \cdots & p_N \end{pmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Où :

$$p_1 + p_2 + \dots + p_N = 1 \quad (\text{II.13})$$

Par ailleurs, toute suite  $(\pi_n)_{n \in \mathbb{N}}$  définie par

$$\pi_0 = (P(X_0 = 1) P(X_0 = 2) \dots P(X_0 = N)) \quad (\text{II.14})$$

et:  $\forall n \in \mathbb{N}, \pi_{n+1} = \pi_n \times P$

converge vers  $\pi_\infty = (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_N)$

qui est l'unique distribution de probabilités vérifiant [21]:

$$\pi \times P = \pi \quad (\text{II.15})$$

## II.2.6 Distributions stationnaires et limites pour les chaînes de Markov homogènes

On constate souvent que la distribution  $\pi^{(n)}$  converge vers une distribution limite lorsque  $n \Rightarrow \infty$ . Dans ce cas, on dit que cette dernière définit le régime permanent de la chaîne de Markov. En pratique on admet généralement que le régime permanent d'une chaîne de Markov est atteint en un nombre fini de transitions. [21]

### II.2.6.1 Définition 1 (Distribution limite) :

On dit qu'une chaîne de Markov converge vers  $\pi$  ou possède une distribution limite  $\pi$  si

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \pi^n = \pi \quad (\text{II.16})$$

et cela indépendamment de la distribution initiale  $\pi^{(0)}$ . [21]

### II.2.6.2 Définition 2 (Chaîne de Markov Stationnaire)

Une chaîne de Markov est dite stationnaire si la distribution  $\pi^{(n)}$  est indépendante du temps  $n$ :

En d'autres termes si la distribution initiale  $\pi^{(0)}$  est une distribution stationnaire de la chaîne de Markov en question. [21]

## II.2.7 Classification des états

### II.2.7.1 Classes irréductibles [22]

**Définition :** Soient  $i$  et  $j$  deux états de  $E$ . On dit que l'état  $j$  est *accessible* depuis l'état  $i$  si  $\exists n \in \mathbb{N}$ ,

$$P_{ij}^n = P(X_n = j | X_0 = i) > 0 \quad (\text{II.17})$$

On dit que les états  $i$  et  $j$  communiquent si chacun est accessible depuis l'autre. On note alors  $i \leftrightarrow j$ .

**PROPOSITION :** La relation  $i \leftrightarrow j$  est une relation d'équivalence sur  $E$

- L'espace  $E$  peut donc être partitionné en classes d'équivalence pour la relation  $\leftrightarrow$ , appelées classes irréductibles. Nous insisterons dans les paragraphes suivants sur le fait que les états d'une même classe irréductible ont des propriétés équivalentes vis à vis de la chaîne (récurrence, transience et périodicité).

Lorsque l'espace  $E$  est réduit à une seule classe (i.e. tous les états communiquent), on dit que la chaîne est irréductible. En général,  $E$  se partitionne en états isolés dans lesquels on ne revient jamais une fois qu'on les a quittés, et en classes irréductibles disjointes.

Pour déterminer les classes irréductibles d'une chaîne de Markov, il est commode de travailler sur le graphe de transition plutôt que sur la matrice de transition  $P$

**EXEMPLE :** Considérons une chaîne de Markov à valeurs dans  $E = \{a, b, c, d, e\}$  et dont la matrice et le graphe de transition sont données par :

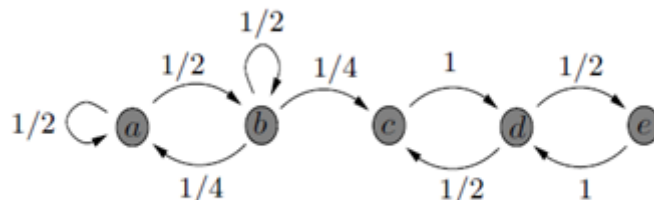


Figure II.2 : Graphe transition entre 5 états.

$$P = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.18})$$

La chaîne comporte deux classes irréductibles :  $\{a, b\}$  et  $\{c, d, e\}$ .

### II.2.7.2 Récurrence et transience [22]

**DEFINITION 1** Soit  $i \in E$ . La v.a.  $T_i$  définie par :  $T_i = \inf\{n \geq 1, X_n = i\}$ . Est appelée temps d'atteinte de  $i$  ou encore temps de retour à  $i$  lorsque la chaîne  $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$  part de  $i$ .

Par convention, lorsque pour tout  $n \geq 1, X_n \neq i$ , on pose  $T_i = +\infty$ .

**PROPOSITION** : Les conditions suivantes sont équivalentes :

1. l'état  $i$  est récurrent :

$$\mathbb{P}(T_i < +\infty | X_0 = i) = 1 \quad (\text{II.19})$$

2. conditionnellement à  $X_0 = i$ , la chaîne de Markov  $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$  revient presque sûrement une infinité de fois en  $i$  :

$$\mathbb{P}(N_i = +\infty | X_0 = i) = 1 \quad (\text{II.20})$$

3. la série  $\sum P_{ij}(n)$  diverge ;

4. l'état  $i$  est transient :

$$\mathbb{P}(T_i < +\infty | X_0 = i) < 1 \quad (\text{II.21})$$

### II.2.7.3 Périodicité

**Définition** : La période d'un état  $i$  est l'entier  $d(i)$  défini par

$$d(i) = \text{PGCD}\{n \geq 1, P_{ii}(n) > 0\} \quad (\text{II.22})$$

Lorsque  $d(i) = 1$ , l'état  $i$  est qualifié de apériodique.

Un état en lequel on peut rester avec probabilité non nulle, i.e.  $p_{ii} > 0$ , est automatiquement apériodique. [22]

## II.3 Simulation Monte Carlo

### II.3.1 Définition

Il existe plusieurs définitions, nous allons citer trois :

#### II.3.1.1 Définition 1 :

La méthode de simulation de Monte Carlo est une technique numérique pour solutionner des problèmes mathématiques en simulant des variables aléatoires. Il n'y a pas un consensus absolu sur une définition précise de ce qu'est une technique de type Monte Carlo, mais la description la plus habituelle consiste à dire que les méthodes de ce type se caractérisent par l'utilisation du hasard pour résoudre des problèmes centrés sur un calcul. Elles sont en général applicables à des problèmes de type numérique, ou bien à des problèmes de nature elle même probabiliste [18].

#### II.3.1.2 Définition 2 :

Les méthodes de Monte Carlo sont très souvent les seules approches utilisables pour l'étude des systèmes non linéaires de grande dimension pour lesquels aucune approche analytique n'est applicable. Elles sont utilisées dans un contexte industriel, pour caractériser la réponse à une excitation aléatoire ou pour mener une étude de propagation d'incertitudes. Elles sont en général applicables à des problèmes de type numérique, ou bien à des problèmes de nature elle même probabiliste [19].

#### II.3.1.3 Définition 3 :

L'utilisation de la méthode de simulation de Monte Carlo nous permet de tenir compte de la diversité des situations possibles sans recourir aux estimations ponctuelles.

Parmi les applications les plus répandues de la méthode de Monte Carlo nous retrouvons les simulations [19].

### II.3.2 Les modèles de simulation.

Pour un système donné, il est possible de construire plusieurs types de modèles de simulation, selon les objectifs poursuivis ou les contraintes à satisfaire. On peut considérer qu'il existe trois catégories de modèles, dont deux sont les plus utilisés : les modèles « *Analogiques* », encore appelés modèles physiques et les modèles « *Abstrait* » [19]. Une représentation possible des différents types de modèles est indiquée sur la figure II.3.

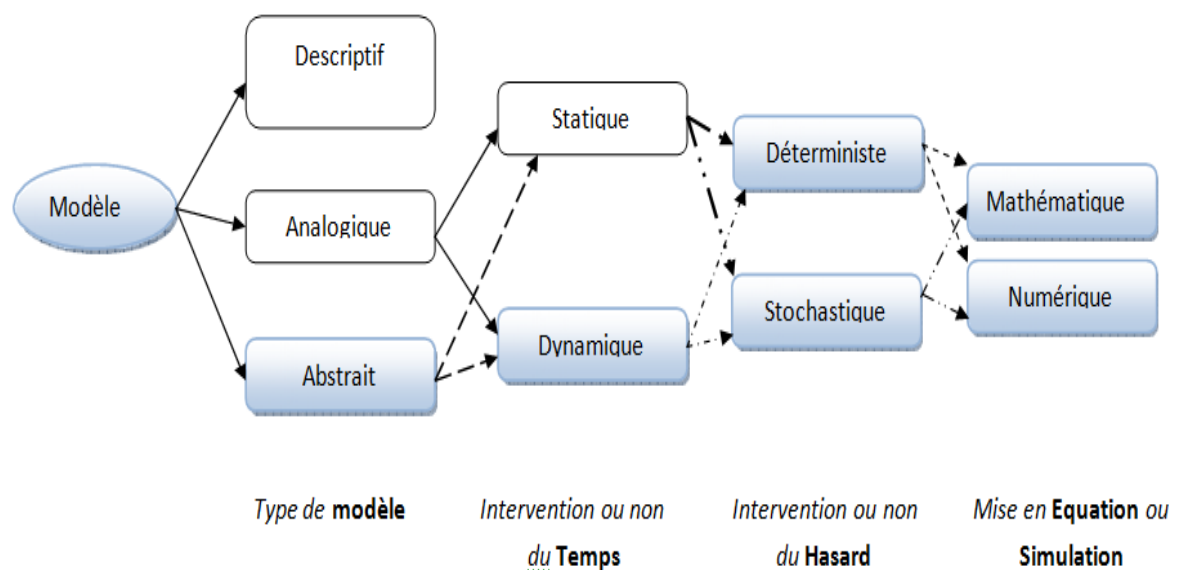
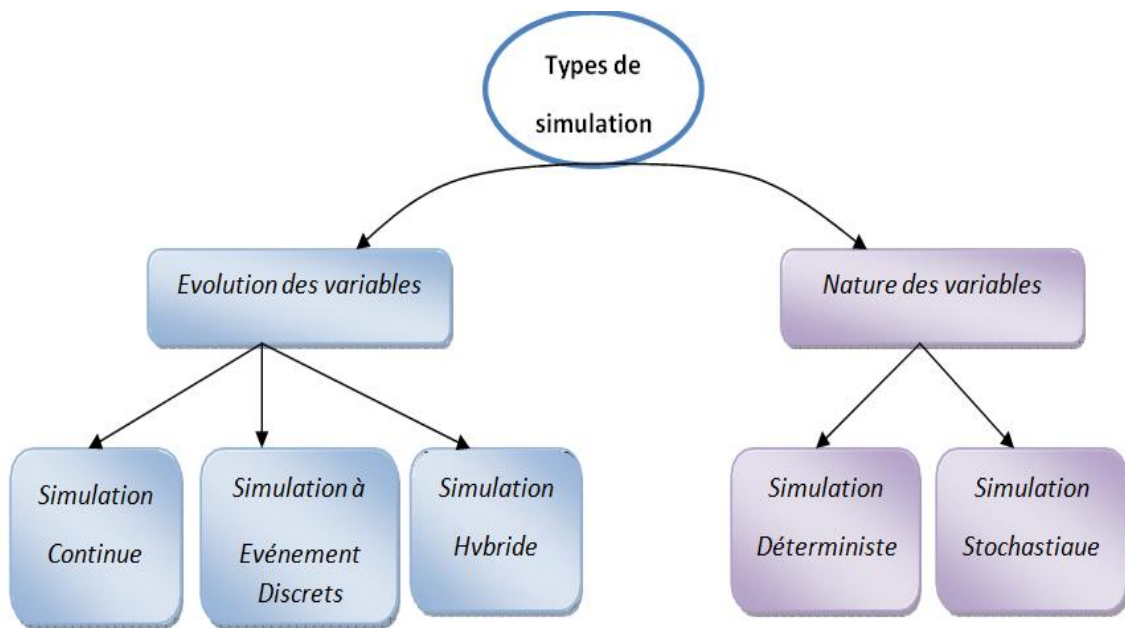


Figure II.3 : Classification des différents types de modèles [19].

Le plus intéressant dans une étude de simulation est : *Comment choisir un modèle de simulation rependant aux objectifs attendus, et avec les données existantes du système à étudier ?* La réponse à cette question fondamentale se fait au travers d'une classification des modèles de simulation (Abstrait ou analogique/ Statique ou Dynamique). Plusieurs types de classification existent. La figure II.4, on représente une répartition selon deux critères : Evolution des variables et nature des variables.



**Figure II.4 : Classification des types de simulation [19].**

A travers cet organigramme on peut classifier les différents types d'une approche simulatrice selon deux caractéristiques de variables (utilisées dans l'étude de simulation) :

### **II.3.2.1 Evolution des variables : Se compose de trois types**

- Simulation continue : Dans ce genre de simulation, est impossible d'isoler une partie du système et la simuler séparément ;
- Simulation à événement discrets : les flux essentiels que l'on examine, dans ce cas, sont composés d'éléments isolables que l'on peut dénombrer et identifier individuellement ;
- Simulation hybride : Une simulation hybride, concerne des systèmes dont lesquels interviennent explicitement et simultanément des processus de type continu et d'autre à événement discrets [20].

### **II.3.2.2 Nature des variables : Se compose de deux types :**

- Les modèles de simulation déterministes : On désigne par modèle de simulation déterministe un modèle ne faisant pas intervenir le hasard. C'est un type de simulation qui s'applique dans un système où tous les événements sont connus : soit directement, soit par des principes de causalités [19] ;

- b. Les modèles de simulation stochastiques : La simulation stochastique s'applique au processus dites : '*Stochastique*' ou processus '*Aléatoire*', qui représentent une évolution, généralement dans le temps, d'une (des) variable(s) aléatoire(s). Au contraire, un modèle de simulation stochastique nécessitera la connaissance de lois de probabilité pour représenter le système et une simulation du hasard pour décrire son fonctionnement. La plupart des systèmes sont stochastiques et l'on approche souvent leur comportement en faisant intervenir des lois de probabilité [19].

**Remarque :**

D'après les besoins de notre étude et d'après la classification (citée dans : Figure II.3, Figure II.4), on va utiliser une approche de simulation basée sur un modèle Abstrait, Dynamique Stochastique ou Déterministe, Mathématique et Numérique.

### **II.3.2.3 Domaines d'application**

La question qu'on peut se poser, pour identifier les domaines d'application de la simulation Monte Carlo est : Quand est ce qu'on doit utiliser une simulation de Monte Carlo ? La réponse est bien simple, on a recours à ce type de simulation lorsque le problème :

- Est trop complexe pour qu'une résolution par voie purement mathématique soit envisageable ;
- Est trop volumineux (en particulier, contient un trop grand nombre de variables) pour que les techniques d'approximation numérique puissent conduire à un résultat précis dans un temps acceptable ;
- Dans le cas où la variable (les paramètres d'étude d'un système) ne peut pas être estimée, ou l'information n'est pas disponible.

Ainsi, ces méthodes sont aujourd'hui indispensables dans des domaines aussi variés et différents que :

- La finance ;
- La gestion de projet ;
- La gestion de la production ;
- La recherche et le développement ;
- Les assurances ;

- Le transport et l'environnement ;
- ...etc.

#### II.3.2.4 La simulation Monte Carlo présente plusieurs avantages

- Résultats probabilistes : Les résultats indiquent non seulement ce qui pourrait arriver, mais dans quelle mesure ;
- Résultats graphiques : Les données produites par la simulation Monte Carlo facilitent la représentation graphique des différentes issues et de leur chance de se produire. La présentation des conclusions de l'analyse en est d'autant plus simple ;
- Analyse de sensibilité : Dans la simulation Monte Carlo, les entrées qui produisent le plus d'effet sur les résultats se distinguent clairement ;
- Analyse de scénario : Avec la simulation Monte Carlo, l'analyste voit clairement les combinaisons de valeurs en entrée associées aux issues et dispose ainsi d'une information extrêmement utile à la poursuite de l'analyse ;
- Corrélation des entrées : Dans la simulation Monte Carlo, il est possible de modéliser des rapports interdépendants entre les variables en entrée. Il est en effet important de représenter, pour la précision du modèle, la manière dont la hausse de certains facteurs s'accompagne dans la réalité de celle d'autres facteurs ou, au contraire, de leur baisse. [19]

### II.3.3 Les atouts de la méthode Monte Carlo

La simulation de Monte-Carlo constitue une méthode très intéressante car elle donne accès à de nombreux paramètres inaccessibles par les autres méthodes et conduit à des analyses extrêmement détaillées des systèmes étudiés :

- Elle n'est pas limitée par le nombre d'états du système étudié car, même s'il y en a des centaines de milliers, seuls les états prépondérants se manifestent au cours de la simulation ;
- Elle permet la prise en compte de n'importe quelle loi de probabilité ;
- Elle permet l'association dans le même modèle de phénomènes déterministes et de

phénomènes aléatoires ;

- Elle peut insérer et simuler toutes les caractéristiques et processus du système qui peuvent être reconnus ;
- Elle peut fournir une large gamme de paramètres de sortie ;
- Son implémentation informatique est aisée.

Trois conditions sont nécessaires à son utilisation :

- Un modèle de comportement du système étudié capable de reproduire de manière correcte son fonctionnement et son évolution au cours du temps lorsqu'il est soumis à différents aléas (défaillance, réparations, événements extérieurs...). On peut trouver à ce stade, pour bien faire la modélisation du système : Le *processus de Markov* (consiste à représenter le comportement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement) ou les *réseaux de Pétri* (Un parcours séquentiellement les différents états du système modélisé) peuvent constituer des supports intéressants ;
- Une description des données sous forme probabiliste ;
- Un logiciel de simulation de Monte-Carlo pour effectuer des tirages aléatoires des variables d'entrée (état du système), pour réaliser des histoires du système à partir de son modèle de comportement et pour analyser statistiquement les variables de sortie.[19]

### II.3.4 Les étapes de la simulation Monte Carlo

La Simulation de Monte Carlo est une méthode habituellement utilisée pour l'évaluation d'un modèle déterministe utilisant un ensemble de nombres aléatoires comme intrants. Cette méthode est souvent utilisée lorsque le modèle est complexe, non linéaire, ou implique quelques paramètres incertains. Elle peut généralement faire intervenir plus de 10000 évaluations du modèle, tâche qui dans le passé : était possible qu'en utilisant un super ordinateur

Les étapes de cette approche sont explicitées sur la **figure II.5** :

**Etape 1** : Ecriture d'un modèle paramétrique ;

**Etape 2** : Génération des données aléatoires ;

**Etape 3** : Evaluation du modèle à un nombre d'itérations ;

**Étape 4 :** Calcul des valeurs statistiques et à travers des graphes ;

**Étape 5 :** Analyse des résultats obtenus.

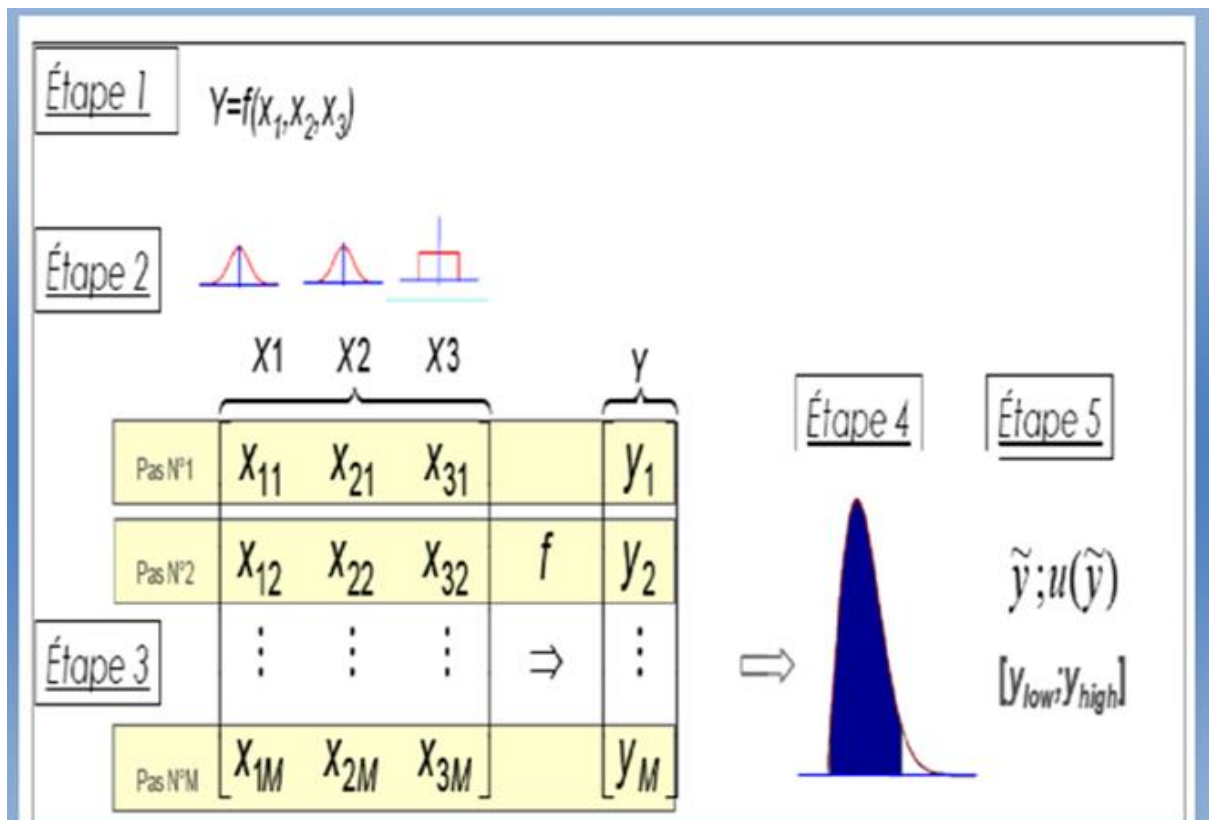


Figure II.5 : Schéma explicatif des étapes de la simulation Monte[19].

### II.3.5 Explication des étapes de la simulation Monte Carlo :

1- Créer et écrire un modèle paramétrique  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_q)$  :

Le but de cette première étape consiste à définir un modèle algébrique qui permet de montrer les relations entre les paramètres d'entrée du système ( $X_1, X_2 \dots X_n$ ) et les résultats obtenus ( $Y_1, Y_2 \dots Y_m$ ) à travers la fonction mathématique  $F$

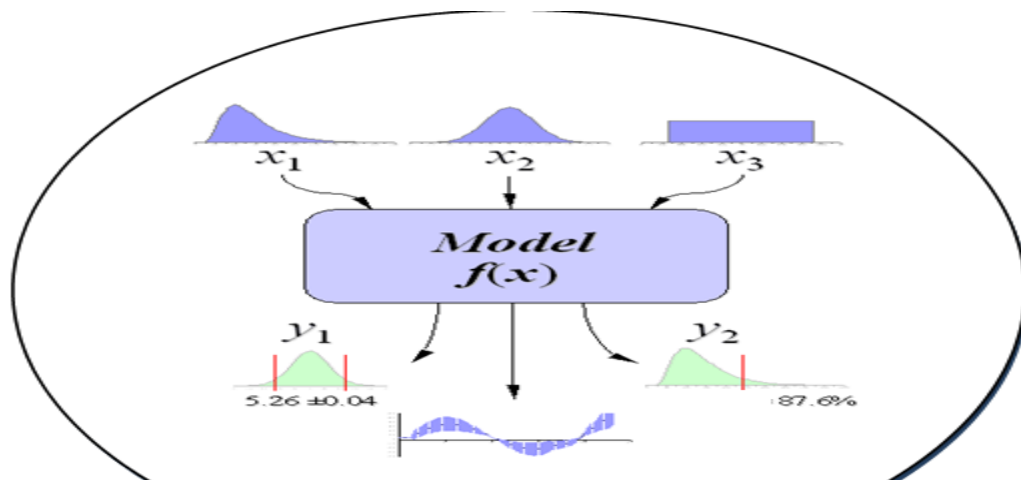


Figure II.6: Modélisation du système à étudier par la simulation Monte Carlo[19].

2- Générer un ensemble de données aléatoires  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iq}$  :

La clé de la simulation de Monte Carlo est qu'elle génère l'ensemble des données aléatoires. Donc il faut associer à chaque entrée des nombres aléatoires selon des distributions adéquates (Uniforme, Normale, ....etc.). Il faut disposer, dans ce cas, d'un générateur de nombres aléatoires pour réaliser cette étape.

3- Évaluer le modèle  $y$  :

Faire une exécution pour les données stochastiques définis dans l'étape précédente, pour calculer le résultat ( $Y_i$ ).

Répéter l'expérience  $n$  fois :

Répéter l'évaluation du modèle (refaire l'étape 3) avec des nouvelles valeurs aléatoires des variables ( $X_i$ ) du modèle jusqu'à atteindre d'un seuil défini au début (un nombre d'itération, une précision, ....etc.).

4- Calculer et analyser les résultats à l'aide des représentations graphiques :

Représenter les résultats obtenus, par l'application des étapes précédentes, sous forme d'histogramme (une représentation graphique) pour bien visualiser les résultats ( $Y_i$ ) et les commenter. Afin de fournir un résumé des commentaires, il est nécessaire de calculer des variables statistiques tel que : la moyenne, l'écart type, la médian, standard, ....etc. pour décrire la distribution qui en résulte.[19]

### II.3.6 Application de la simulation Monte Carlo dans un système de production.

L'organigramme (Figure II.7) résume le principe de la méthode Monte Carlo dans le cas d'un système de production [18].

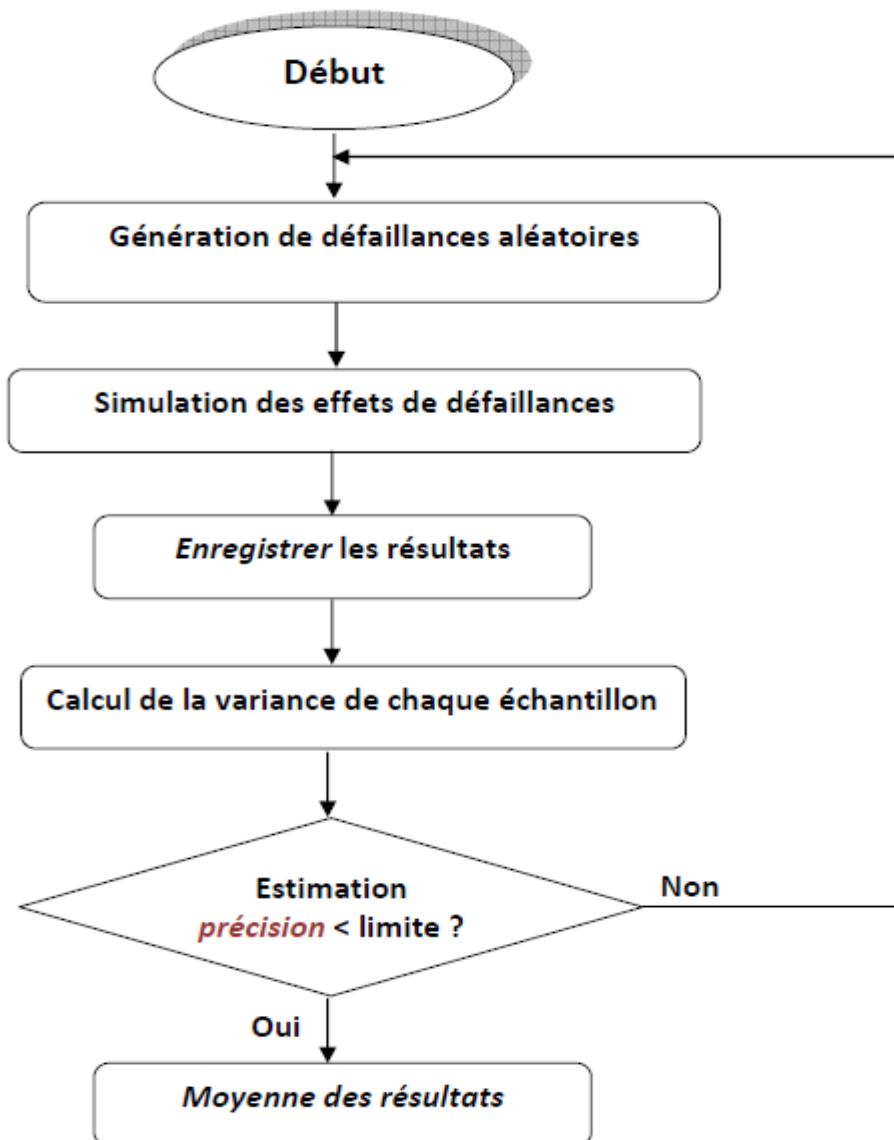


Figure II.7 : Algorithme général d'une simulation Monte Carlo [19].

La simulation Monte Carlo est élaborée en 5 étapes :

**a- Première étape :** Est une étape de modélisation pour la génération de défaillances aléatoires. Différentes techniques de modélisation sont disponibles. Elles dépendent de l'architecture du système étudié, des événements indésirables concernés, des critères à évaluer et des hypothèses

prises en compte dans les modèles. Parmi toutes ces techniques, nous mentionnons : les équivalents analytiques, les arbres de défaillance, les graphes de Markov, les réseaux de Pétri, ...etc. A la fin de cette étape on est en mesure de définir :

- ✓ Les fonctions de densité de probabilité (Loi de distribution, les variables aléatoires);
- ✓ Un générateur de nombres aléatoires.

Cette étape nous permet également de :

- Faire une liste des pannes ;
- Définir l'événement prêt à simuler ;
- D'avoir un nouveau vecteur d'état des composantes pour connaître la nouvelle architecture temporaire du système à étudier.

**b- Deuxième étape :** Dans cette étape, on doit déterminer une règle d'échantillonnage pour décrire la manière dont les échantillons doivent être prélevés afin de simuler le premier événement (ou l'événement suivant selon que l'on est dans la première itération ou dans les suivantes). A chaque événement, le système peut avoir une nouvelle topologie, de nouveaux paramètres de fonctionnement, etc. Ce nouvel état est analysé (selon des paramètres choisis), les problèmes sont identifiés, et après, si possible, des actions correctives sont accomplies (modification des consignes de productions, délestage de charge,... etc.).

**c- Troisième étape :** A ce stade de la méthode, il est possible d'enregistrer, ou faire l'addition selon le but de l'étude pour accumuler, les résultats de la simulation pour chaque itération ;

**d- Quatrième étape :** Elle consiste à estimer l'erreur calculée à chaque itération pour décider des suites à prendre, c.à.d. continué ou d'arrêter la simulation.

**e- Cinquième étape :** la réduction de la variance (facultative) – une méthode pour réduire la variance du résultat estime pour arriver à réduire le temps de calcul nécessaire pour une précision donnée.

### **II.3.7 Les types de la simulation Monte Carlo.**

Il existe deux types de simulation Monte Carlo : Monte Carlo non séquentielle et Monte Carlo séquentielle (chronologique)

### **II.3.7.1 Simulation Monte Carlo séquentielle ou chronologique [18].**

L'approche séquentielle simule les états du système dans l'ordre chronologique, c.à.d au fur et à mesure des changements d'états de ses composants. La modélisation chronologique est liée à l'évaluation de séries (ou séquences) d'états du système dans le processus stochastique du déroulement de son fonctionnement (simulation de la «vie » du système) sur une période de service donnée (par exemple un mois).

### **II.3.7.2 Simulation Monte Carlo non séquentielle (ou aléatoire) [18].**

La différence entre la simulation Monte Carlo non séquentielle et la simulation Monte Carlo séquentielle se trouve dans la façon dont les états du système sont choisis pour être simulés (c'est le choix de la règle d'échantillonnage définie plus haut).

L'approche aléatoire simule les états du système sur la durée de sa vie en les choisissant au hasard et la notion de temps n'apparaît pas. Les états du système dépendent de la combinaison des états de ses composants. Chaque état du composant est déterminé en fonction de la probabilité que le composant apparaisse dans cet état.

## **II.4 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons introduit les modèles mathématiques nécessaires pour l'étude le chaîne de Markov et notions théoriques importants dans le processus de simulation Monte Carlo. Il est possible d'étudier ce formalisme de plusieurs manières, en le considérant soit comme une discipline abstraite de mathématiques appliquées, soit comme un outil mathématique utile pour analyser ou évaluer le comportement d'un système .

# **Chapitre III. Présentation & Analyse Du Système De Production Par La Simulation De Monte Carlo**

# Présentation & Analyse du système de production par la simulation de monte Carlo

## III.1 Introduction

A cause de la grande influence du temps de réparation sur la disponibilité du concasseur, dans ce chapitre, on mettra l'accent sur la fiabilité et les pannes qui les affectent, et nous montrerons comment utiliser la théorie des chaînes de Markov et la simulation de monte Carlo pour nous aider dans l'analyse. Enfin nous présentons des propositions afin d'améliorer la disponibilité des installations du concasseur au niveau de la société Lafarge de M'sila.

## III.2 Système de production (concasseur)

### III.2.1 Définition de concasseur :

Le concasseur est un appareil permettant de réduire des matières en tout petits morceaux.

### III.2.2 Principes de concassage.

Il y a quatre principes de fragmentation de la matière :

- PERCUSSION : est illustrée par un **Marteau** ;
- FROTTEMENT : est illustrée par la **Lime** ;
- CISAILLEMENT : est illustrée par un **Ciseaux** ;
- COMPRESSION : est illustrée par un **étau**.

Les concasseurs fonctionnent selon un ou plusieurs de ces principes. La grosseur maximum de la matière à concasser peut être influencée par la procédure d'abattage par explosifs dans la carrière.

### III.2.3 Types d'installation de concasseur

Le concasseur est le principal équipement dans l'atelier de concassage. La configuration du département de concassage peut être plus ou moins complexe en fonction du type et de la

conception du concasseur, des conditions de la matière à traiter et des exigences du produit.

Parmi les éventuels équipements du département de concassage, on peut citer:

- La trémie d'alimentation ;
- Le marteau de concassage (pour séparer les blocs importants dans la trémie) ;
- Le bras excavateur (pour supprimer la matière collante de la trémie) ;
- Le bras preneur (pour enlever les blocs importants de la trémie) ;
- Les alimentateurs ;
- Les pré-tamiseurs ;
- Les concasseurs ;
- Les cribles de vibration ;
- Les silos intermédiaires ;
- Les bandes transporteuses ;
- Les installations de dépoussiérage ;
- Les équipements de nettoyage ;
- Les équipements pour l'entretien ;
- Les équipements pour le contrôle et la surveillance.

FLS a fait de son mieux pour concevoir les concasseurs les plus simples possibles afin de répondre aux besoins les plus courants dans la production du ciment. Ainsi, on utilise le plus souvent le concasseur à marteaux avec grille de sortie, le concasseur à barres d'impact et le concasseur à rouleaux, mais on utilise également d'autres types de concasseurs lorsque cela est nécessaire.

### **III.2.3.1 Concasseur à marteaux FLS, type EV**

Afin d'éviter un concassage compliqué en plusieurs étapes, FLS a mis au point un concasseur à marteaux : le concasseur EV qui n'exige pas de concassage primaire préalable. Il réduit les morceaux de pierre de 2 m à 25 mm. Le concasseur EV utilise un rotor simple à marteaux fonctionnant à la vitesse périphérique d'environ 40 mètres par seconde.

La grille d'entrée n'est pas nécessaire puisque le concasseur EV est conçu avec des cylindres destinés à absorber le choc des gros morceaux. Le concasseur EV peut également traiter des matières contenant une certaine proportion d'éléments collants.

Lorsqu'un concasseur standard EV est équipé de grilles de sortie convenables, sa production peut directement être alimentée au broyeur à boulets. Si l'on désire un produit plus gros, on augmentera l'espace entre les barres de sortie, le débit du concasseur en sera d'autant plus accru.

Les morceaux de pierre sont amenés au concasseur par un alimentateur séparé (**tapis métallique**) qui répartit la matière sur toute la largeur de l'entrée du concasseur.

En entrant dans le concasseur, les morceaux tombent sur deux cylindres d'amortissement des chocs : l'un ayant une surface lisse alors que l'autre est pourvu de saillies. Ils fonctionnent à différentes vitesses afin d'empêcher les morceaux de se coincer.

Certaines matières fines s'introduisent dans l'espace situé entre les cylindres et se séparent à ce niveau.

Les cylindres alimentent les morceaux aux marteaux qui les brisent et les projettent contre le plateau de concassage & les tôles de revêtement situées dans la partie supérieure du concasseur pour finir de les fragmenter. Le lourd rideau de chaînes verticales à l'entrée du concasseur empêche la matière de rebondir vers l'alimentateur.

Au stade de concassage suivant, les morceaux cognent contre le plateau de concassage réglable et contre les barres de la grille de sortie. Enfin, le produit concassé passe à travers les ouvertures de la grille et est évacué par une bande transporteuse.

La matière première concassée est le mélange Calcaire et argile .avec une Humidité de 8%, densité volumique de 1400 kg/m<sup>3</sup>, Capacité de production du concasseur 1450 t/h.

Puissance du moteur du rotor presque 2000kW, vitesse de rotation de environ 40m/s.

L'objectif est d'interdire trois millions de tonnes par an.

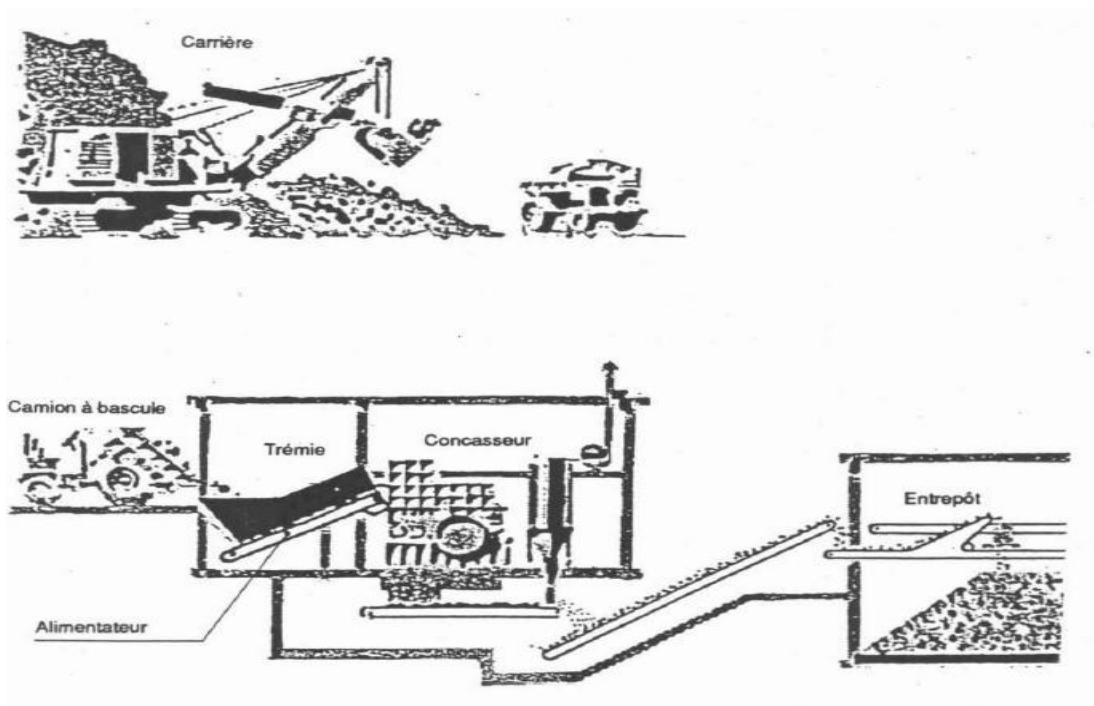
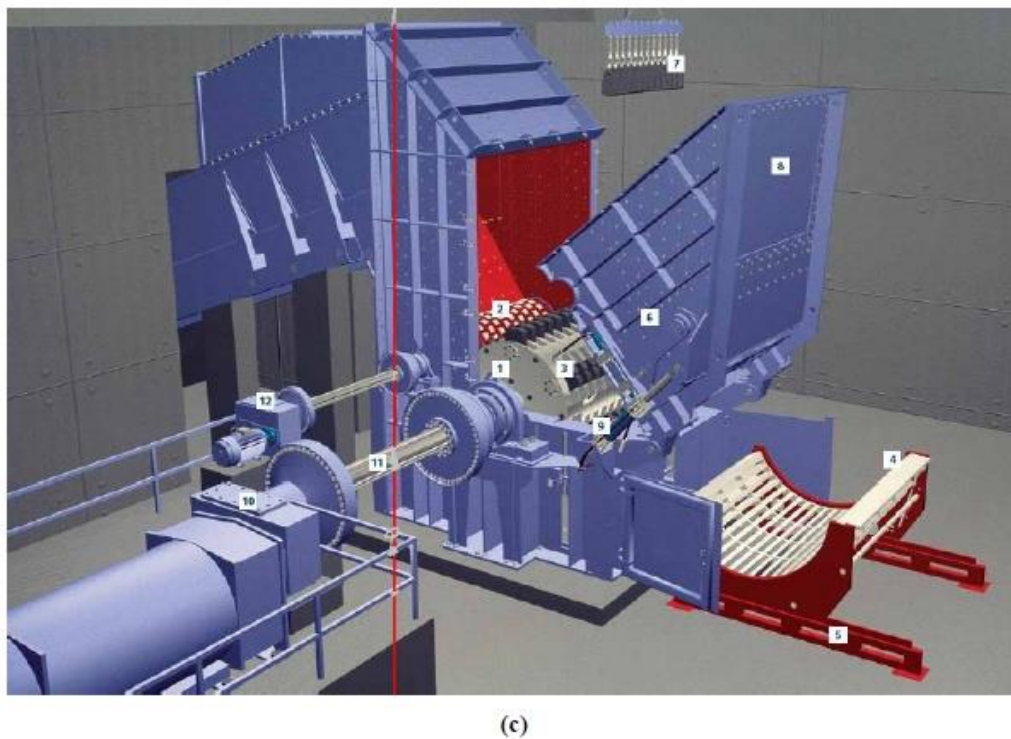
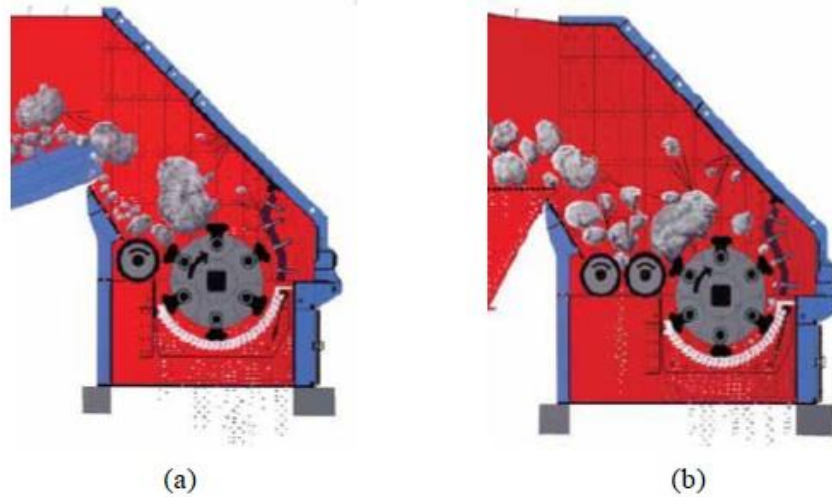


Figure.III.1 : Concassage à un étage en une passe avec concasseur à marteaux rotatifs et grille de sortie ou avec concasseur à barre d'impact.

### III.2.3.2 Composition Concasseur à marteaux FLS, type EV

La figure III.2 montre les compositions de concasseur :



1. Rotor à Marteaux ( Hammer rotor) 2. Cylindre d'avancement (Inlet roller)
3. Marteaux (Hammers) 4. Grille de sortie (Outlet grate)
- 5 Rails (Rails for sliding grate in and out). 6. Enclume (Breaker plate adjustment)
7. Marteaux de rechange (Spare hammers) 8. Partie supérieure (Top part)
9. Verins (Hydraulic cylinders for opening top part) 10. Réducteur (Main drive station)
11. Accouplement à membrane (Membrane coupling) 12. Réducteur (Drive station, inlet roller)

**Figure III.2 : (a) : Concasseur à marteaux à un cylindre d'avancement ;(b) Concasreur à marteaux a deux cylindres d'avancement (c) Concasreur à marteaux éclaté.**

### III.3 Notions de base des systèmes industrielles

Dans l'ensemble des systèmes industriels, on identifie deux catégories:

- Systèmes non réparables ;
- Systèmes réparables.

#### III.3.1 Systèmes non réparables

On désigne par système non réparable, tout système pour lequel les tâches de réparation sont techniquement impossibles au cours de sa mission. Les défaillances des avions en plein vol en sont un parfait exemple. Dans certaines conditions, la réparation est techniquement réalisable, mais, économiquement parlant, elle est difficilement justifiable: on cite l'exemple des cartes électroniques, En effet, pour certaines cartes, le coût de remplacement est nettement inférieur à celui de la réparation. La fiabilité est souvent la grandeur la plus utilisée pour mesurer la performance de ce genre de système par rapport à leurs âges.

Pour cette famille de systèmes, on s'intéresse aux grandeurs suivantes :

- Durée de vie ;
- Fiabilité ;
- Défaillance ;
- Taux de défaillance ;
- Temps moyen de bon fonctionnement : MTBF.

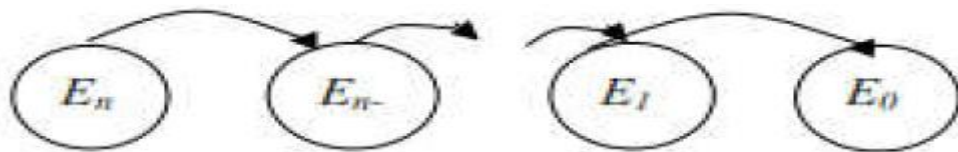


Figure III. 3 Graphe d'état pour système non réparable

#### III.3.2 Systèmes réparables

Pour ce genre de systèmes, l'occurrence d'un bris est généralement suivie d'une série d'activités d'entretien. A titre d'exemples, on cite : le diagnostic, l'affectation des ressources pour effectuer les réparations, la commande des pièces de rechange, les tâches de-réparation, les tests fonctionnels et la remise en service. Cette liste n'est pas exhaustive. Dans certaines conditions,

d'autres activités peuvent se rajouter comme les délais administratifs. Non seulement les défaillances qui nécessitent des efforts d'entretien, mais aussi les activités de maintenance préventive et les réfections. Pour les systèmes réparables, on convient d'utiliser la disponibilité comme indicateur de performance par rapport au temps. Dans certaines configurations ou les machines opèrent selon des structures parallèles, l'utilisation de la fiabilité pour mesurer la performance du système est Aussi indiquée

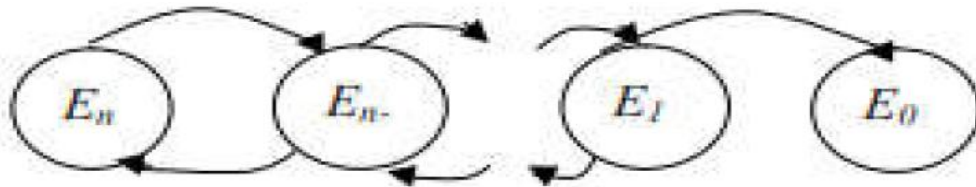


Figure III. 4 Graphe d'état pour système réparable

### III.4 Les lois de probabilité utilisées en fiabilité

On distingue deux types

- Lois discrètes ;
- Lois continues.

Dans cette étude, nous ferons référence à une étude sur une loi d'exponentielle

#### III.4.1 Loi exponentielle

La loi exponentielle est la loi de suivie par la variable aléatoire T lorsque le taux d'avarie est constant.

Pour tout  $t \geq 0$  on a  $\lambda(t) = \lambda$  constante strictement positive.

Pour tout  $t \geq 0$  :

Fonction de fiabilité:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{III.1}$$

Fonction cumulée de défaillance:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{III.2}$$

Densité de probabilité:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{III.3})$$

Ecart type :

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{III.4})$$

Les défaillances émergent sous l'action de causes diverses et indépendantes.

➤ Si  $\lambda = \text{cte}$ , alors

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{III.5})$$

en fiabilité

➤ Si  $\mu = \text{cte}$  (taux de réparation), alors

$$\text{MTTR} = \frac{1}{\mu} \quad (\text{III.6})$$

en maintenabilité

### III.5 L'étude de la fiabilité par chaîne de Markov :

Cette méthode consiste à représenter le fonctionnement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement et de panne. Un support graphique (le graphe des états) permet de visualiser les différents états d'un système qui sont représentés par des cercles et reliés entre eux par des arcs orientés qui correspondent aux transitions (pannes et réparation) entre états. Pour un système à  $n$  composants, si chaque composant a deux états (fonctionnement et panne).

Pour réaliser cette analyse, il faut tout d'abord recenser tous les états du système, le modèle classer en états de fonctionnement ou en états de panne. Ensuite, il est nécessaire de chercher comment passer d'un état à un autre lors d'un dysfonctionnement ou d'une réparation. A chaque transition de l'état  $E_i$  vers l'état  $E_j$ , un taux de transition  $L_{ij}$  est associé qui est défini de telle façon que  $L_{ij} \cdot dt$  est égal à la probabilité de passer de  $E_i$  vers  $E_j$  entre deux instants très proches  $t$  et  $t + dt$  sachant que l'on est à l'instant  $t$  en  $E_i$ .

Enfin, la dernière étape consiste à calculer la probabilité de se trouver dans les différents états au cours d'une période de vie du système ainsi que de calculer les caractéristiques de Sécurité de fonctionnement (MTTF, MTBF, MTTR, etc.).

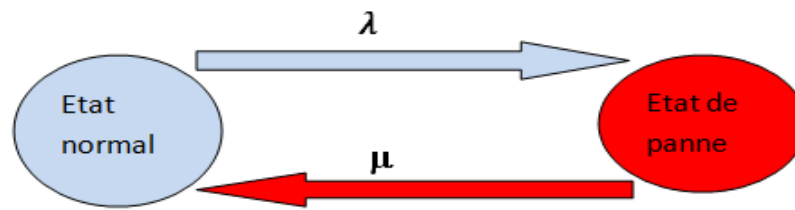


Figure III. 5 Un modèle Markovien.

## III.6 Etudes de concasseur

### III.6.1 Types et nombre d'heures d'arrêts du concasseur :

Mois	Type d'arrêt					
	Production	électrique	mécanique	Command	Programmé	Circonstancié
<b>Janvier</b>	7,53	1,38	4,98	0	19,09	514,6699
<b>Février</b>	27,6333103	3,966664	1,716666	8,033332	16,333332	402,099976
<b>Mars</b>	0	6,849993	0	8,399997	238,016666	363,6
<b>Avril</b>	0	13,649994	0	19,7999943	22,433331	458,333248
<b>Mai</b>	26,133268	16,233313	5,983332	0,666666	21,833331	404,166646
<b>Juin</b>	6,299982	14,13331	19,949996	2,516663	50,783331	372,249936
<b>Juillet</b>	0	7,649989	0,766666	0,866666	39,466665	459,766565
<b>Août</b>	0,083333	4,283328	13,916666	1,73333	29,533332	459,383222
<b>Septembre</b>	0,116666	3,483328	1,6	0,933333	42,149998	493,233244
<b>Octobre</b>	0	8,666659	2,699998	2,149997	26,649998	517,383258
<b>Novembre</b>	0	6,283324	24,4999993	2,066664	138,483331	346,549926
<b>Décembre</b>	0,416666	4,416662	7,016666	0,499999	196,333331	410,799961
<b>Total</b>	68,2132253	90,996564	83,1299893	47,6666413	841,106646	5202,23588
<b>Taux d'arrêt(%)</b>	1	1.43	1.31	0.75	13.3	82.2

Tableau III.1 : Types et nombre d'heures d'arrêts

La représentation graphique suivante nous aide à analyser l'état d'arrêt du concasseur pendant de l'année 2019 :

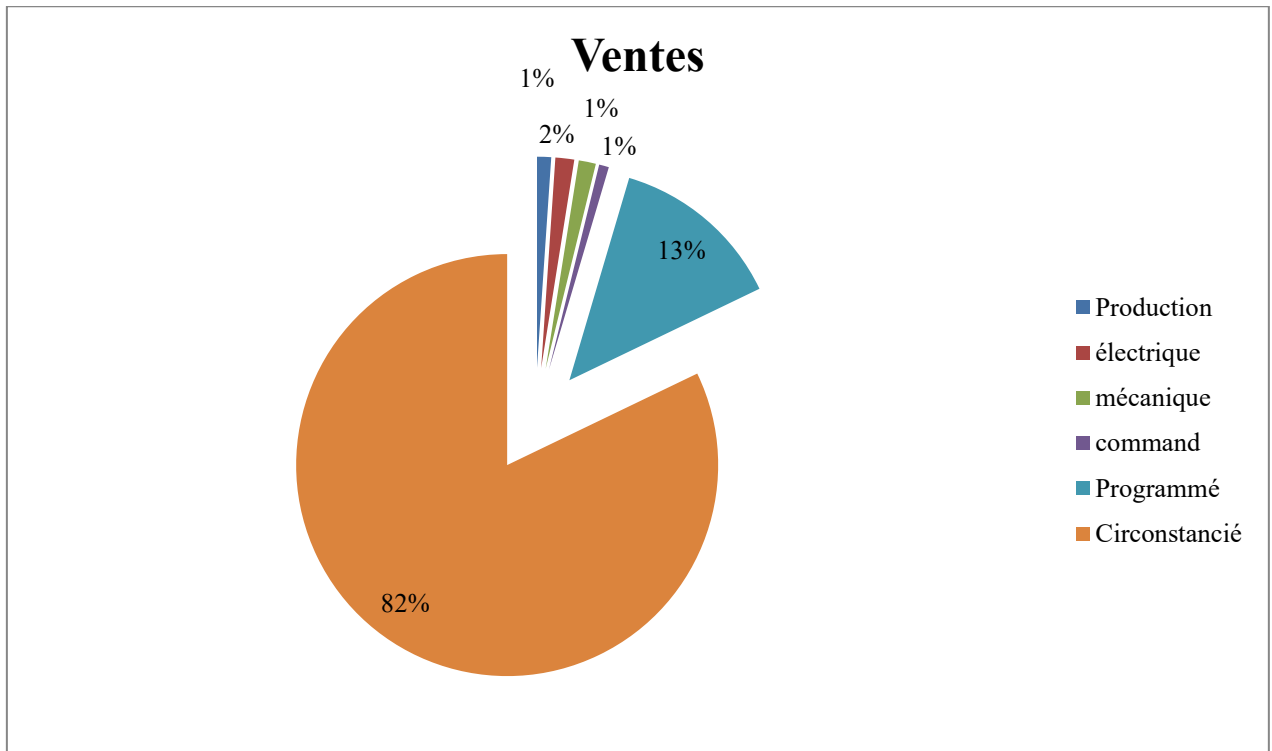


Figure III.6 : Bilan des arrêts du concasseur pour l'année 2019

- **Commentaire :**

A partir de cette étude (bilan des arrêts), il apparaît que :

- Les arrêts Circonstancié est l'origine du maximum d'heures d'arrêt de travail (5202,23 heures)
- Les arrêts programmés représentent un taux de 13% ;
- Le problème électrique est également non négligeable avec 90.99 heures ;
- Les pannes mécaniques est d'arrêts partiels avec 83,12 heures ;
- Les pannes production et de commande sont les derniers.

### III.6.2 L'analyse ABC :

Type des pannes	Temps des pannes	Nombre des pannes
<b>Production</b>	68,2132253	307
<b>Electrique</b>	90,996564	301
<b>mécanique</b>	83,1299893	45
<b>commande</b>	47,6666413	69

Tableau III.2 : les donnés des pannes

On résume les calculs des valeurs les cumuls des temps des pannes et les pourcentages cumulés des temps et des pannes dans le tableau III 13

Types des pannes	$C_i$	$\sum C_i$	$\% \sum C_i$	$C_{nbr \text{ des } p}$	$\% C_{nbr \text{ des } pa}$	$\% \sum C_{nbr \text{ d } pa}$
<b>Electrique</b>	90,996564	90,996564	31,3774309	301	301	41,68
<b>Mécanique</b>	83,1299893	174,126553	60,0423099	45	346	47,92
<b>Production</b>	68,2132253	242,339779	83,563591	307	653	90,44
<b>Commande</b>	47,6666413	290,00642	100	69	722	100

Tableau III.3 : Paramètres de l'analyse ABC

Les présentations graphiques de l'analyse ABC par les figures suivantes (Figure7)

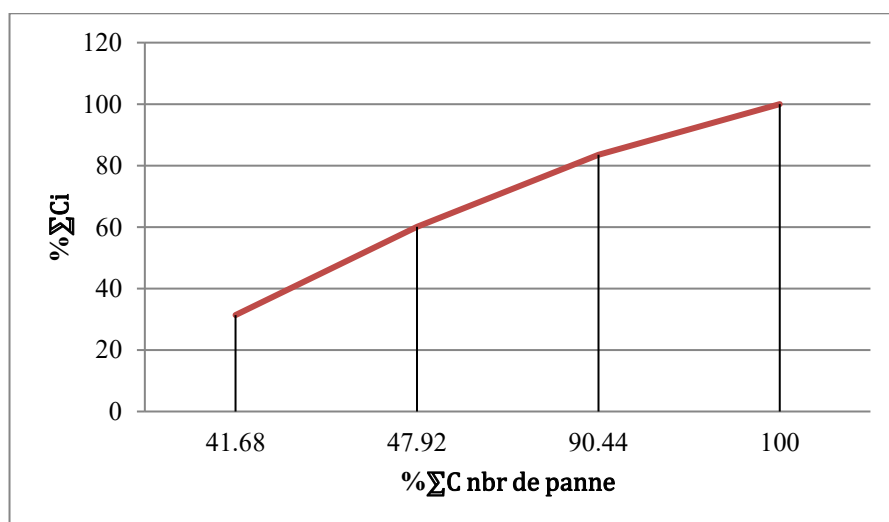


Figure III.7 : courbe de ABC

On donc évide qu'une amélioration de la fiabilité sur les éléments des types de pannes de la zone A (électrique et mécanique), il fout Appliquer la maintenance préventive systématique pour les éléments

### III.6.3 Diagrammes de Pareto en $N$ , $N_t$ et $\bar{t}$ :

Type de panne	N	$N_t$	$\bar{t}$
<b>Production</b>	307	68,2132253	0,22219292
<b>électrique</b>	301	90,996564	0,30231417
<b>mécanique</b>	45	83,1299893	1,8473331
<b>command</b>	69	47,6666413	0,69082089

Tableau III.4 :  $N$ ,  $N_t$  et  $\bar{t}$

Type de panne	N	Cumul N	%N	%C <sub>N</sub>
<b>Production</b>	307	307	42,5207	42,5207
<b>électrique</b>	301	608	41,6897	84,2105
<b>command</b>	69	677	9,5567	93,7673
<b>mécanique</b>	45	722	6,2326	100

Tableau III.5 : l'indice de fiabilité N

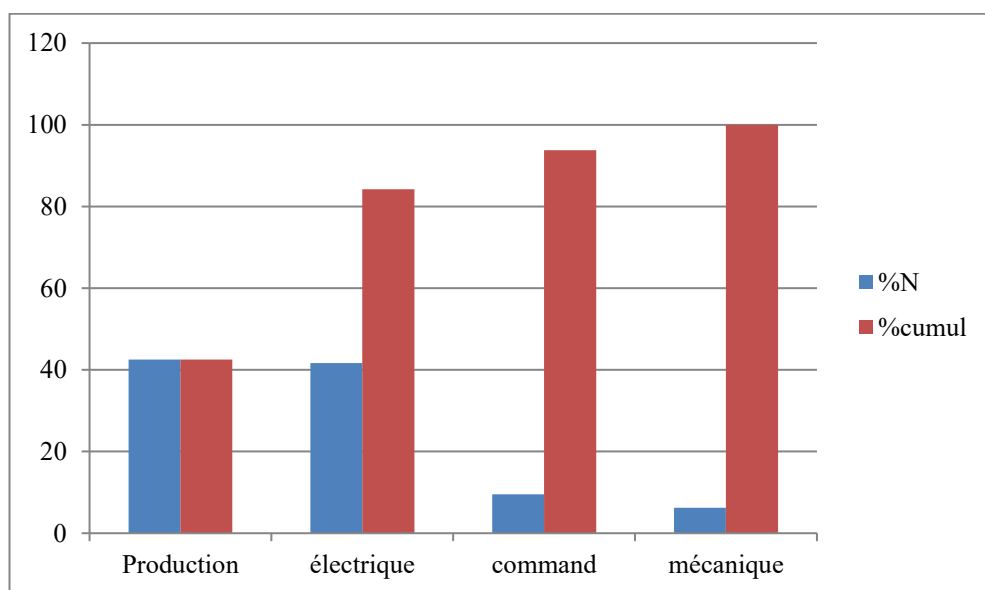


Figure III.8 : Mise en évidence des éléments les moins fiables

Le graphe en N (Figure III.8) oriente vers l'amélioration de la fiabilité : ici on constate que les sous élément type production est ceux sur lequel il faudra agir prioritairement. Actions préventives systématiques dans un premier temps, conditionnelle ensuite et surveillance accrue

Type de panne	$N_t$	Cumul $N_t$	% $N_t$	% $C_{N_t}$
Electrique	90,996564	90,996564	31,3758	31,3774309
Mécanique	83,1299893	174,126553	28,6655	60,0423099
Production	68,2132253	242,339779	23,5206	83,563591
command	47,6666413	290,00642	16,4344	100

Tableau III.6 : l'indice de l'indisponibilité  $N_t$

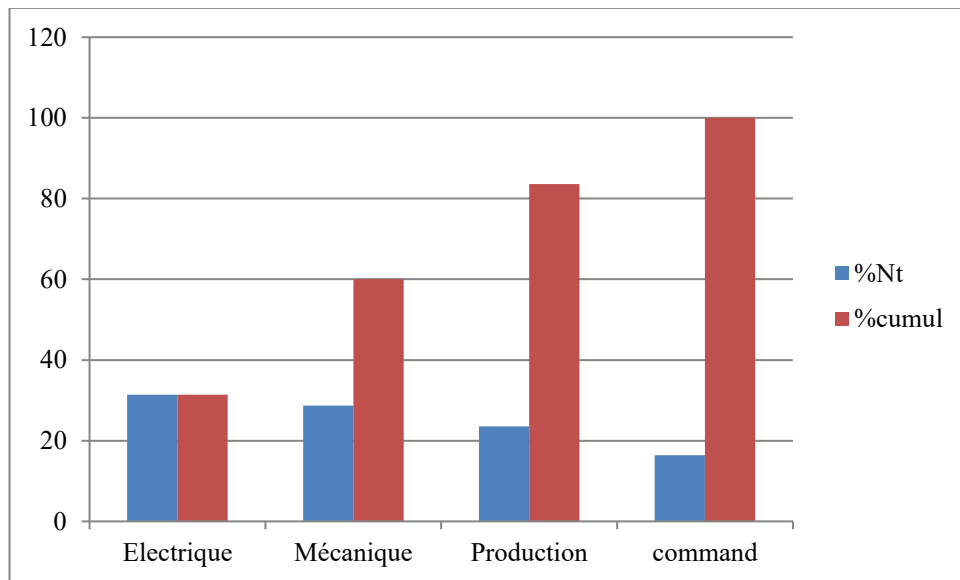


Figure III.9 : Mise en évidence des éléments les moins disponibles

Le graphe en  $N_t$  (Figure III.9) est un indicateur de disponibilité, car  $N_t$  estime la perte de disponibilité de chaque sous-ensemble. Il permet donc de sélectionner l'ordre de prise en charge des types de défaillance en fonction de leur criticité (ici les sous-éléments de types électriques et mécaniques).

Type de panne	$\bar{t}$	Cumul $\bar{t}$	% $\bar{t}$	% cumul $\bar{t}$
Mécanique	1,8473331	1,8473331	60,3179082	60,3179082
command	0,69082089	2,53815399	22,5562304	82,8741387
Electrique	0,30231417	2,84046816	9,87096391	92,7451026
Production	0,22219292	3,06266108	7,25489743	100

Tableau III.7 : l'indice de maintenabilité  $\bar{t}$

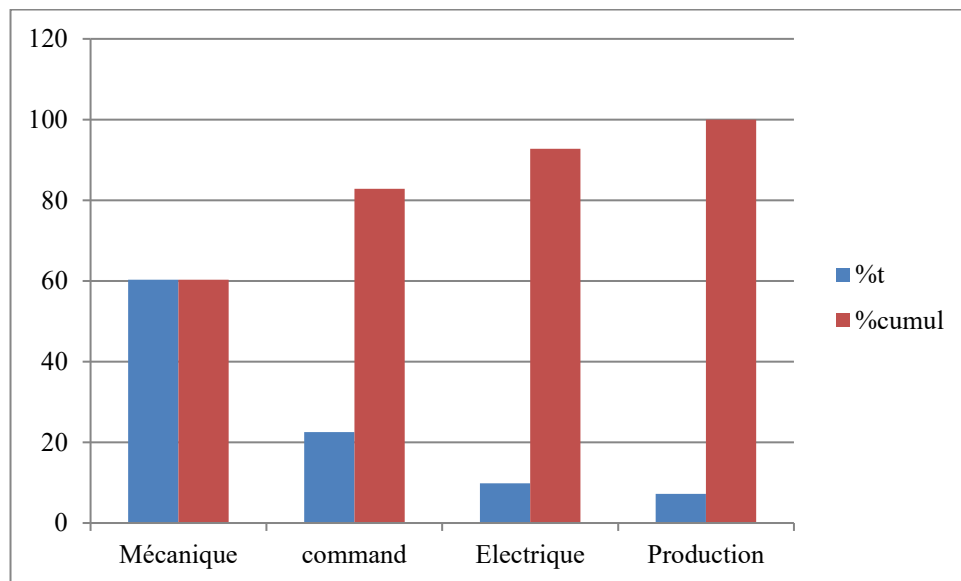


Figure III.10 : Mise en évidence des éléments les moins maintenables

Le graphe en t (**Figure III.10**) oriente vers la maintenabilité, c'est à dire l'amélioration de l'aptitude de la maintenance. Ici, le sous-élément de type mécanique qui présente des difficultés de réparation.

### III.7 Etudes statistiques sur le concasseur

Le système fonctionne par un Taux de production 1309,28 T/h et le Tableaux montre des heures de fonctionnement entre les pannes :

Mois	TBF	TR
Janvier	196,35	13,89
Février	212,22	41,3499723
Mars	127,1333	15,24999
Avril	205,78	33,4499883
Mai	268,9834	49,016579
Juin	254,06	42,899951
Juillet	235,48344	9,283321
Août	235,0667	20,016657
Septembre	178,48	6,133327
Octobre	186,45	13,516654
Novembre	202,2	32,8499873
Décembre	124,5167147	12,349993
<b>TOTAL</b>	<b>2426,72393</b>	<b>290,00642</b>

Tableau III.8 : Heures d'exploitation du concasseur (2019)

### III.7.1 Paramètres de fiabilité du concasseur

Le traitement des données recueillies sur Usine Che Lafarge Ciment M'sila à permis de calculer les indices suivants de fiabilité du concasseur installées :

- **Taux de défaillance  $\lambda$  :**

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{N} = 202,227 \text{ h} \quad (\text{III.7})$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = 0,0049 \text{ h}^{-1} \quad (\text{III.8})$$

- **Taux de réparation  $\mu$  :**

$$MTTR = \frac{\sum TR}{N} = 24,1672 \text{ h} \quad (\text{III.9})$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = 0,04138 \text{ h}^{-1} \quad (\text{III.10})$$

## III.8 Application de simulation monte Carlo par chaîne de Markov dans concasseur pour la modélisation de la fiabilité et disponibilité :

Les chaînes de Markov sont le moyen le plus simple de générer des probabilités aléatoires et de modéliser les états d'un système de production et des transitions possibles dans les simulations de monte Carlo.

Le système production comporte des machines en série, C'est un réseau de postes de service ou machines séparées par des espaces tampons ou de stockage.

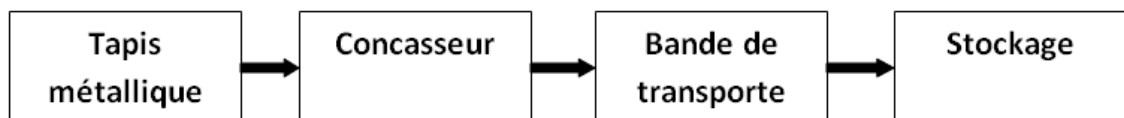


Figure III. 11 : Chaîne de production de système

Les pierres circulent de la tapis métallique au concasseur, puis passent à la bonde de transport, puis à la stacker jusqu'à ce qu'il soit stocké.

Les machines (stacker, tapis métallique, bonde de transport et concasseur) peuvent tomber en panne de façon irrégulière, ce qui perturbe la chaîne de production de système, il en résulte l'arrêt total du système.

La performance du système est mesurée par le taux de production et le niveau de stock en phase de production.

Le système ou les machines identiques de taux de défaillance  $\lambda$ , et de taux de réparation  $\mu$ .

### III.9 Représentation graphique des chaînes de Markov :

Le graphe de transition d'une chaîne de Markov homogène est le graphe orienté tel que :

- Ses sommets sont les états de  $E = \{1, 2, 3, \dots, N - 1, N\}$  et  $N$  c'est nombre d'états ;
- il y a un arc du sommet  $i$  vers le sommet  $j$  si  $p_{i,j} > 0$  ;
- l'évaluation de l'arc  $i j$  est la probabilité de transition  $p_{i,j}$ .

Une chaîne de Markov peut alors être vue comme une marche aléatoire sur le Graphe  $G$  : on tire aléatoirement  $x$  réalisation de  $X$  selon la loi, on puis de  $x$  tire  $x$  (réalisation de  $X$ ) selon les probabilités de transition des arcs issus de  $x$ , etc.

Nous pouvons facilement identifier trois états pour ce système :

- défailtante un seul machine ;
- Marche tout les machines ;
- Défaillant tout les machines.

Afin d'obtenir un modèle Graphe de Markov en temps discret, nous considérons uniquement le cas des processus stochastique à temps discret et à espace d'états  $E$  discret.

L'espace des états est noté :  $E = \{0, 1, 2\}$

Le graphe d'état et de transition est décrit sur la Figure III. 12 et Figure III.13

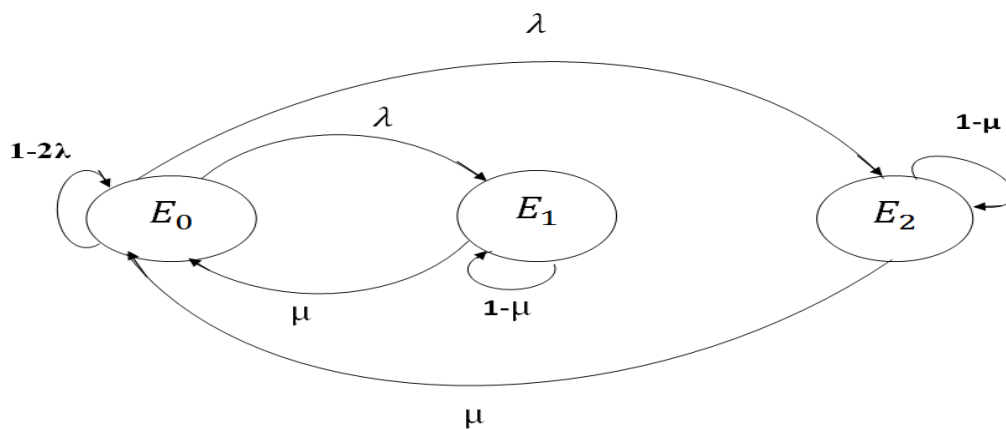


Figure III. 12 : Graphe des états de la disponibilité.

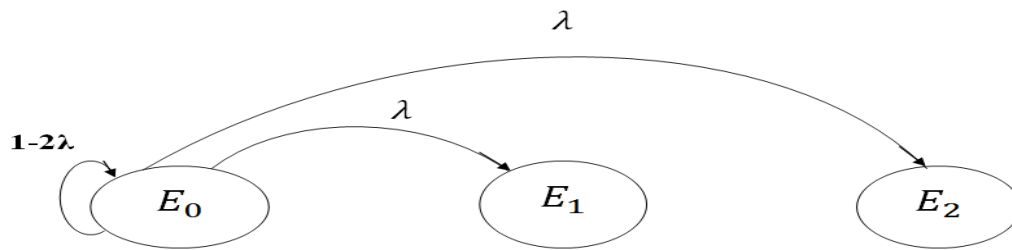


Figure III. 13 : Graphe des états de la fiabilité.

- Le premier état (E0) représente une absence de panne ;
- L'état (E1) représente au moins un seul machine en panne ;
- Le dernier état (E2) représente tout les composant en panne (une défaillance totale de système).

### III.9.1 La disponibilité

**Etape 1 :** Ecriture d'un modèle paramétrique :

- **Tableaux les paramètres chaîne de Markov**

La disponibilité	
$P(X_{n+1}=0 X_n=0) = p_{0,0} = (1-2\lambda)$	$P(X_{n+1}=2 X_n=1) = p_{1,2} = 0$
$P(X_{n+1}=1 X_n=0) = p_{0,1} = \lambda$	$P(X_{n+1}=0 X_n=2) = p_{2,0} = \mu$
$P(X_{n+1}=2 X_n=0) = p_{0,2} = \lambda$	$P(X_{n+1}=1 X_n=2) = p_{2,1} = 0$
$P(X_{n+1}=0 X_n=1) = p_{1,0} = \mu$	$P(X_{n+1}=2 X_n=2) = p_{2,2} = (1-\mu)$
$P(X_{n+1}=1 X_n=1) = p_{1,1} = (1-\mu)$	-

Tableau III.9 : les données de chaîne de Markov de la disponibilité

- **La matrice de transition de système**

Selon notre chapitre 2 : La matrice de transition

$$P = \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & P_{0,N} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & \dots & P_{1,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,0} & P_{N,1} & \dots & P_{N,N} \end{pmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Alor : La matrice transition de la disponibilité :

$$P_D = \begin{pmatrix} 1 - 2\lambda & \lambda & \lambda \\ \mu & 1 - \mu & \mathbf{0} \\ \mu & \mathbf{0} & 1 - \mu \end{pmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Nous considérons (1) comme de état de marche, la disponibilité du système D (n), probabilité que le système fonctionne à l'instant n, s'exprime par :

$$D(n) = \pi_0 \quad (\text{III.13})$$

**Etape 2 :** Génération d'un premier nombre aléatoire,

$$P = \begin{pmatrix} 1 - 2\lambda & \lambda & \lambda \\ \mu & 1 - \mu & 0 \\ \mu & 0 & 1 - \mu \end{pmatrix} = P = \begin{pmatrix} 0.9902 & 0.0049 & 0.0049 \\ 0.04138 & 0.95862 & 0 \\ 0.04138 & 0 & 0.95862 \end{pmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Conditions initiales :

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^0 = (1, 0, 0) \quad (\text{III.15})$$

- **Probabilité des pannes Après 1 année**

$$\pi_1 = \pi_0 \times P \quad (\text{III.16})$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^1 = (1, 0, 0) \begin{pmatrix} 0.9902 & 0.0049 & 0.0049 \\ 0.04138 & 0.95862 & 0 \\ 0.04138 & 0 & 0.95862 \end{pmatrix} \quad (\text{III.17})$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^1 = (0.9902, 0.0049, 0.0049) \quad (\text{III.18})$$

**Etape 3 :** Evaluation du modèle à un nombre d'itérations,

- **L'état probabiliste du système l'année n :**

Appliqué la loi de  $X_n$  de Markov :

Nous notons alors  $\pi_n$  la matrice ligne

$$\pi_n = (P(X_n = 1) P(X_n = 2) \dots P(X_n = N)) \quad (\text{III.19})$$

On a:  $\forall n \in \mathbb{N}$ ,

$$\pi_n = (P(X_n = 1) P(X_n = 2) \dots P(X_n = N))$$

$$\pi_{n+1} = \pi_n \times P \text{ et } \pi_n = \pi_0 \times P^n$$

$$(\pi_0(n+1), \pi_1(n+1), \dots, \pi_N(n+1)) = (\pi_0(n), \pi_1(n), \dots, \pi_n(n)) \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & P_{0,N} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & \dots & P_{1,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,0} & P_{N,1} & \dots & P_{N,N} \end{pmatrix}$$

$$\pi_{n+1} = \pi_n \times P \text{ et } \pi_n = \pi_0 \times P^n$$

$$(\pi_0(n+1), \pi_1(n+1), \dots, \pi_N(n+1)) = (\pi_0(n), \pi_1(n), \dots, \pi_n(n)) \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & P_{0,N} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & \dots & P_{1,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,0} & P_{N,1} & \dots & P_{N,N} \end{pmatrix} \quad (\text{III.20})$$

- **Probabilité des pannes Après 2 années**

$$\pi_2 = \pi_1 \times P \quad (\text{III.21})$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^2 = (0.9902 \ 0.0049 \ 0.0049) \begin{pmatrix} 0.9902 & 0.0049 & 0.0049 \\ 0.04138 & 0.95862 & 0 \\ 0.04138 & 0 & 0.95862 \end{pmatrix}$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^2 = (0.9809, 0.0095, 0.0095)$$

- **Probabilité des pannes Après 3 années**

$$\pi_3 = \pi_0 \times P^3 \quad (\text{III.22})$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^3 = (1 \ 0 \ 0) \begin{pmatrix} 0.9902 & 0.0049 & 0.0049 \\ 0.04138 & 0.95862 & 0 \\ 0.04138 & 0 & 0.95862 \end{pmatrix}^3$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^3 = (0.9720, 0.0139, 0.0139)$$

- **Probabilité des pannes Après  $n = \{4, 5, \dots, 248\}$**

$$\pi_4 = \pi_0 P^4 \quad (\text{III.23})$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^4 = (0.9636, 0.01810, 0.01810)$$

⋮

$$\pi_{64} = \pi_0 \mathbf{P}^{64}$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^{64} = (0.8151, 0.0924, 0.0924)$$

⋮

$$\pi_{124} = \pi_0 \mathbf{P}^{124}$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^{124} = (0.8085, 0.0957, 0.0957)$$

⋮

$$\pi_{248} = \pi_0 \mathbf{P}^{248} \tag{III.24}$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^{248} = (0.8085, 0.0957, 0.0957)$$

<b>n</b>	$\pi_0$	$\pi_1$	$\pi_3$	<b>n</b>	$\pi_0$	$\pi_1$	$\pi_3$
<b>1</b>	0.9902	0.0049	0.0049	<b>26</b>	0.8572	0.0712	0.0712
<b>2</b>	0.9802	0.0095	0.0095	<b>27</b>	0.8547	0.0725	0.0725
<b>3</b>	0.9720	0.0139	0.0139	<b>28</b>	0.8523	0.0737	0.0737
<b>4</b>	0.9636	0.0181	0.0181	<b>29</b>	0.8501	0.0748	0.0748
<b>5</b>	0.9556	0.0220	0.0220	<b>30</b>	0.8470	0.0759	0.0759
<b>6</b>	0.9482	0.0258	0.0258	<b>31</b>	0.8459	0.0769	0.0769
<b>7</b>	0.9409	0.0294	0.0294	<b>32</b>	0.8440	0.0778	0.0778
<b>8</b>	0.9341	0.0328	0.0328	<b>33</b>	0.8421	0.0788	0.0788
<b>9</b>	0.9277	0.0360	0.0360	<b>34</b>	0.8404	0.0796	0.0796
<b>10</b>	0.9217	0.0391	0.0391	<b>35</b>	0.8388	0.0804	0.0804
<b>11</b>	0.9159	0.0419	0.0419	<b>36</b>	0.8372	0.0812	0.0812
<b>12</b>	0.9104	0.0447	0.0447	<b>37</b>	0.8357	0.0820	0.0820
<b>13</b>	0.9051	0.0473	0.0473	<b>38</b>	0.8343	0.0827	0.0827
<b>14</b>	0.9002	0.0498	0.0498	<b>39</b>	0.8330	0.0833	0.0833
<b>15</b>	0.8955	0.0521	0.0521	<b>40</b>	0.8317	0.084	0.084
<b>16</b>	0.8910	0.0544	0.0544	<b>41</b>	0.8305	0.0846	0.0846
<b>17</b>	0.8867	0.0565	0.0565	<b>42</b>	0.8294	0.0851	0.0851
<b>18</b>	0.8827	0.0585	0.0585	<b>43</b>	0.8283	0.0857	0.0857
<b>19</b>	0.8789	0.0604	0.0604	<b>44</b>	0.8273	0.0862	0.0862
<b>20</b>	0.8753	0.0622	0.0622	<b>45</b>	0.8263	0.0867	0.0867
<b>21</b>	0.8719	0.0639	0.0639	<b>46</b>	0.8254	0.0871	0.0871
<b>22</b>	0.8668	0.0655	0.0655	<b>47</b>	0.8245	0.0876	0.0876
<b>23</b>	0.8655	0.0671	0.0671	<b>64</b>	0.8151	0.0924	0.0924
<b>24</b>	0.8626	0.0685	0.0685	<b>124</b>	0.8085	0.0957	0.0957
<b>25</b>	0.8598	0.0699	0.0699	<b>248</b>	0.8085	0.0957	0.0957

Tableau III .10 : Probabilité de la disponibilité Après n année

**Etape 4 :** Calcul des valeurs statiques et à travers des graphes,

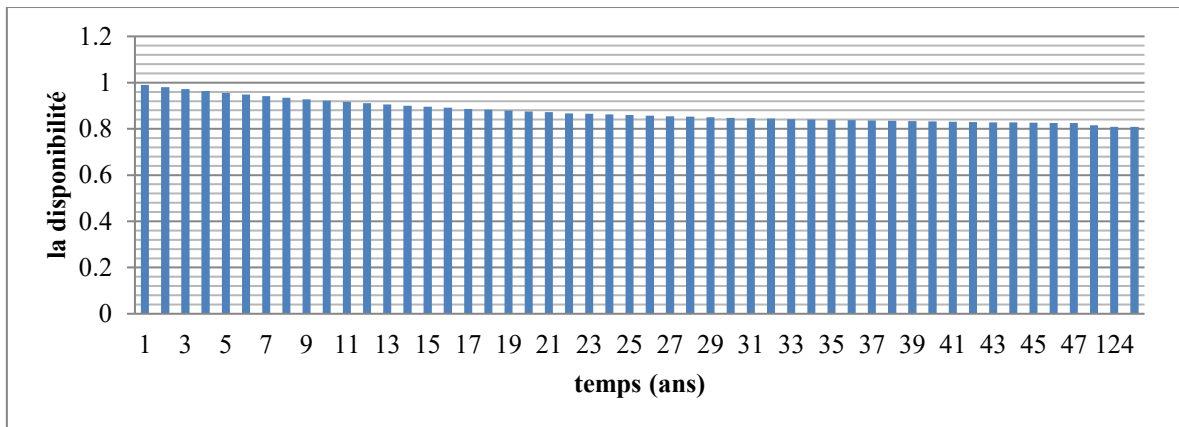


Figure III .14 : graphe probabilité la disponibilité par années

**Etape 5 :** Analyse des résultats obtenus

La figure au dessus montre l'évolution de la disponibilité au bout du Temps.

On remarque que la disponibilité de l'ouvrage diminue lentement

Au bout de 47 ans la disponibilité deviennent moins de 81%, donc notre ouvrage devient moins d'assurer

### III.9.2 La fiabilité

**Etape 1 :** Ecriture d'un modèle paramétrique :

- Tableaux les paramètres chaîne de Markov

La fiabilité	
$P(X_{n+1}=0 X_n=0) = p_{0,0} = (1-2\lambda)$	$P(X_{n+1}=2 X_n=1) = p_{1,2} = 0$
$P(X_{n+1}=1 X_n=0) = p_{0,1} = \lambda$	$P(X_{n+1}=0 X_n=2) = p_{2,0} = 0$
$P(X_{n+1}=2 X_n=0) = p_{0,2} = \lambda$	$P(X_{n+1}=1 X_n=2) = p_{2,1} = 0$
$P(X_{n+1}=0 X_n=1) = p_{1,0} = 0$	$P(X_{n+1}=2 X_n=2) = p_{2,2} = 0$
$P(X_{n+1}=1 X_n=1) = p_{1,1} = 0$	/

Tableau III.11 : les données de chaîne de Markov de la fiabilité

- La matrice de transition de système

Selon notre chapitre 2 :

La matrice de transition

$$P = \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & P_{0,N} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & \dots & P_{1,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,0} & P_{N,1} & \dots & P_{N,N} \end{pmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Alors La matrice transition de la fiabilité :

$$P_R = \begin{pmatrix} 1 - 2\lambda & \lambda & \lambda \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (\text{III.26})$$

Pour calculer la fiabilité d'un système, Nous considérons (1) comme de état de marche, la disponibilité du système D (n), probabilité que le système fonctionne à l'instant n, s'exprime par :

$$R(n) = \pi_0 \quad (\text{III.27})$$

**Etape 2 :** Génération d'un premier nombre aléatoire,

$$P_R = \begin{pmatrix} 1 - 2\lambda & \lambda & \lambda \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.9902 & 0.0049 & 0.9902 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.28})$$

Conditions initiales :

- **Probabilité des pannes Après 1 année**

$$\pi_1 = \pi_0 \times P \quad (\text{III.29})$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^1 = (1, 0, 0) \begin{pmatrix} 0.9902 & 0.0049 & 0.0049 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^1 = (0.9902, 0.0049, 0.0049)$$

**Etape 3 :** Evaluation du modèle à un nombre d'itérations,

- **L'état probabiliste du système l'année n :**

Appliqué la loi de  $X_n$  de Markov :

Nous notons alors  $\pi_n$  la matrice ligne

$$\pi_n = (P(X_n = 1) P(X_n = 2) \dots P(X_n = N)) \quad (\text{III.30})$$

On a:  $\forall n \in \mathbb{N}, \pi_{n+1} = \pi_n \times P$  et  $\pi_n = \pi_0 \times P^n$

$$(\pi_0(n+1), \pi_1(n+1), \dots, \pi_N(n+1)) = (\pi_0(n), \pi_1(n), \dots, \pi_N(n)) \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & P_{0,N} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & \dots & P_{1,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,0} & P_{N,1} & \dots & P_{N,N} \end{pmatrix} \quad (\text{III.31})$$

- **Probabilité des pannes Après 2 année**

$$(\pi_0(n+1), \pi_1(n+1), \dots, \pi_N(n+1)) = (\pi_0(n), \pi_1(n), \dots, \pi_N(n)) \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & P_{0,N} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & \dots & P_{1,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,0} & P_{N,1} & \dots & P_{N,N} \end{pmatrix} \quad (\text{III.31})$$

$$\pi_2 = \pi_1 \times P$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^2 = (0.9902, 0.0049, 0.0049) \begin{pmatrix} 0.9902 & 0.0049 & 0.0049 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^2 = (0.9804, 0.0048, 0.0048)$$

**Après 3 ans**

$$\pi_3 = \pi_2 \times P$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^3 = (0.9809, 0.0095, 0.0095) \begin{pmatrix} 0.9902 & 0.0049 & 0.0049 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^3 = (0.9707, 0.0048, 0.0048)$$

- **Probabilité des pannes Après  $n = \{4,5,\dots,248\}$**

$$\pi_4 = \pi_0 P^4$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^4 = (0.9612, 0.0047, 0.0047)$$

⋮

$$\pi_{64} = \pi_0 P^{64}$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^{64} = (0.5324, 0.0026, 0.0026)$$

⋮

$$\pi_{124} = \pi_0 \mathbf{P}^{124}$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^{124} = (0.2834, 0.0014, 0.0014)$$

⋮

$$\pi_{248} = \pi_0 \mathbf{P}^{248}$$

$$(\pi_0, \pi_1, \pi_2)^{248} = (0.0064, 0.00003, 0.00003)$$

N	$\pi_0$	$\pi_1$	$\pi_3$	N	$\pi_0$	$\pi_1$	$\pi_3$
1	0,9902	0,0049	0,0049	26	0,7740	0,0038	0,0038
2	0,9804	0,0048	0,0048	27	0,7665	0,0037	0,0037
3	0,9708	0,0048	0,0048	28	0,7590	0,0037	0,0037
4	0,9613	0,0047	0,0047	29	0,7515	0,0037	0,0037
5	0,9519	0,0047	0,0047	30	0,7441	0,0036	0,0036
6	0,9426	0,0046	0,0046	31	0,7369	0,0036	0,0036
7	0,9333	0,0046	0,0046	32	0,7296	0,0036	0,0036
8	0,9242	0,0045	0,0045	33	0,7225	0,0035	0,0035
9	0,9151	0,0045	0,0045	34	0,7154	0,0035	0,0035
10	0,9062	0,0044	0,0044	35	0,7084	0,0035	0,0035
11	0,8973	0,0044	0,0044	36	0,7014	0,0034	0,0034
12	0,8885	0,0043	0,0043	37	0,6946	0,0034	0,0034
13	0,8798	0,0043	0,0043	38	0,6878	0,0034	0,0034
14	0,8712	0,0043	0,0043	39	0,6810	0,0033	0,0033
15	0,8626	0,0042	0,0042	40	0,6743	0,0033	0,0033
16	0,8542	0,0042	0,0042	41	0,6677	0,0033	0,0033
17	0,8458	0,0041	0,0041	42	0,6612	0,0032	0,0032
18	0,8375	0,0041	0,0041	43	0,6547	0,0032	0,0032
19	0,8293	0,0041	0,0041	44	0,6483	0,0032	0,0032
20	0,8212	0,0040	0,0040	45	0,6419	0,0031	0,0031
21	0,8131	0,0040	0,0040	46	0,6357	0,0031	0,0031
22	0,8052	0,0039	0,0039	47	0,6294	0,0031	0,0031
23	0,7973	0,0039	0,0039	64	0,5324	0,0026	0,0026
24	0,7894	0,0039	0,0039	124	0,2834	0,0014	0,0014
25	0,7817	0,0038	0,0038	248	0,0064	0,00003	0,00003

Tableau III .12 : Probabilité de la fiabilité Après n année

**Etape 4 :** Calcul des valeurs statiques à travers les graphes,

- **Les tableaux des valeurs aléatoires dans le système**

<b>N</b>	<b>R(n)</b>	<b>F(n)</b>	<b>N</b>	<b>R(n)</b>	<b>F(n)</b>	<b>N</b>	<b>R(n)</b>	<b>F(n)</b>
<b>1</b>	0,9902	0,0098	<b>18</b>	0,8375	0,1625	<b>35</b>	0,7084	0,2916
<b>2</b>	0,9804	0,0196	<b>19</b>	0,8293	0,1707	<b>36</b>	0,7014	0,2986
<b>3</b>	0,9708	0,0292	<b>20</b>	0,8212	0,1788	<b>37</b>	0,6946	0,3054
<b>4</b>	0,9613	0,0387	<b>21</b>	0,8131	0,1869	<b>38</b>	0,6878	0,3122
<b>5</b>	0,9519	0,0481	<b>22</b>	0,8052	0,1948	<b>39</b>	0,681	0,319
<b>6</b>	0,9426	0,0574	<b>23</b>	0,7973	0,2027	<b>40</b>	0,6743	0,3257
<b>7</b>	0,9333	0,0667	<b>24</b>	0,7894	0,2106	<b>41</b>	0,6677	0,3323
<b>8</b>	0,9242	0,0758	<b>25</b>	0,7817	0,2183	<b>42</b>	0,6612	0,3388
<b>9</b>	0,9151	0,0849	<b>26</b>	0,774	0,226	<b>43</b>	0,6547	0,3453
<b>10</b>	0,9062	0,0938	<b>27</b>	0,7665	0,2335	<b>44</b>	0,6483	0,3517
<b>11</b>	0,8973	0,1027	<b>28</b>	0,759	0,241	<b>45</b>	0,6419	0,3581
<b>12</b>	0,8885	0,1115	<b>29</b>	0,7515	0,2485	<b>46</b>	0,6357	0,3643
<b>13</b>	0,8798	0,1202	<b>30</b>	0,7441	0,2559	<b>47</b>	0,6294	0,3706
<b>14</b>	0,8712	0,1288	<b>31</b>	0,7369	0,2631	<b>64</b>	0,5324	0,4676
<b>15</b>	0,8626	0,1374	<b>32</b>	0,7296	0,2704	<b>124</b>	0,2834	0,7166
<b>16</b>	0,8542	0,1458	<b>33</b>	0,7225	0,2775	<b>248</b>	0,0064	0,9936
<b>17</b>	0,8458	0,1542	<b>34</b>	0,7154	0,2846	/	/	/

**Tableau III .13: Tableaux les valeurs de fiabilité et défaillance**

<b>n</b>	<b>f(n)</b>	<b>n</b>	<b>f(n)</b>	<b>n</b>	<b>f(n)</b>
<b>1</b>	0,00485198	<b>18</b>	0,00410375	<b>35</b>	0,00347116
<b>2</b>	0,00480396	<b>19</b>	0,00406357	<b>36</b>	0,00343686
<b>3</b>	0,00475692	<b>20</b>	0,00402388	<b>37</b>	0,00340354
<b>4</b>	0,00471037	<b>21</b>	0,00398419	<b>38</b>	0,00337022
<b>5</b>	0,00466431	<b>22</b>	0,00394548	<b>39</b>	0,0033369
<b>6</b>	0,00461874	<b>23</b>	0,00390677	<b>40</b>	0,00330407
<b>7</b>	0,00457317	<b>24</b>	0,00386806	<b>41</b>	0,00327173
<b>8</b>	0,00452858	<b>25</b>	0,00383033	<b>42</b>	0,00323988
<b>9</b>	0,00448399	<b>26</b>	0,0037926	<b>43</b>	0,00320803
<b>10</b>	0,00444038	<b>27</b>	0,00375585	<b>44</b>	0,00317667
<b>11</b>	0,00439677	<b>28</b>	0,0037191	<b>45</b>	0,00314531
<b>12</b>	0,00435365	<b>29</b>	0,00368235	<b>46</b>	0,00311493
<b>13</b>	0,00431102	<b>30</b>	0,00364609	<b>47</b>	0,00308406
<b>14</b>	0,00426888	<b>31</b>	0,00361081	<b>64</b>	0,00260876
<b>15</b>	0,00422674	<b>32</b>	0,00357504	<b>124</b>	0,00138866
<b>16</b>	0,00418558	<b>33</b>	0,00354025	<b>248</b>	0,00003136
<b>17</b>	0,00414442	<b>34</b>	0,00350546	/	/

Tableau III .14 : Tableaux les valeurs de densité

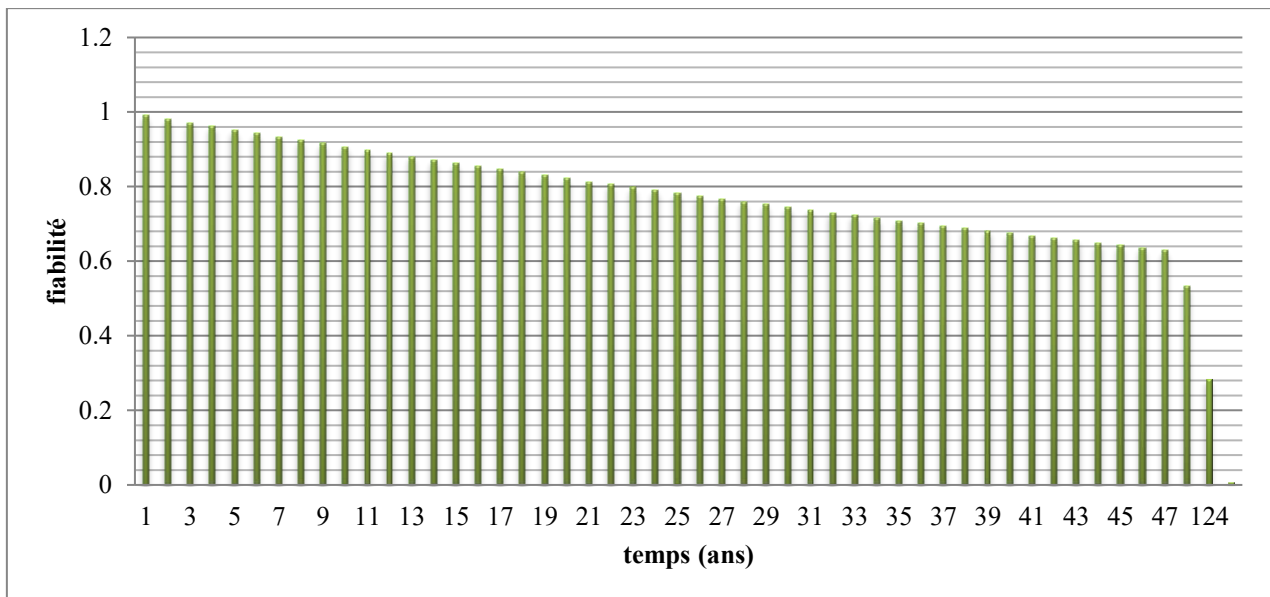


Figure III.15 : Graphe probabilité de fiabilité par années

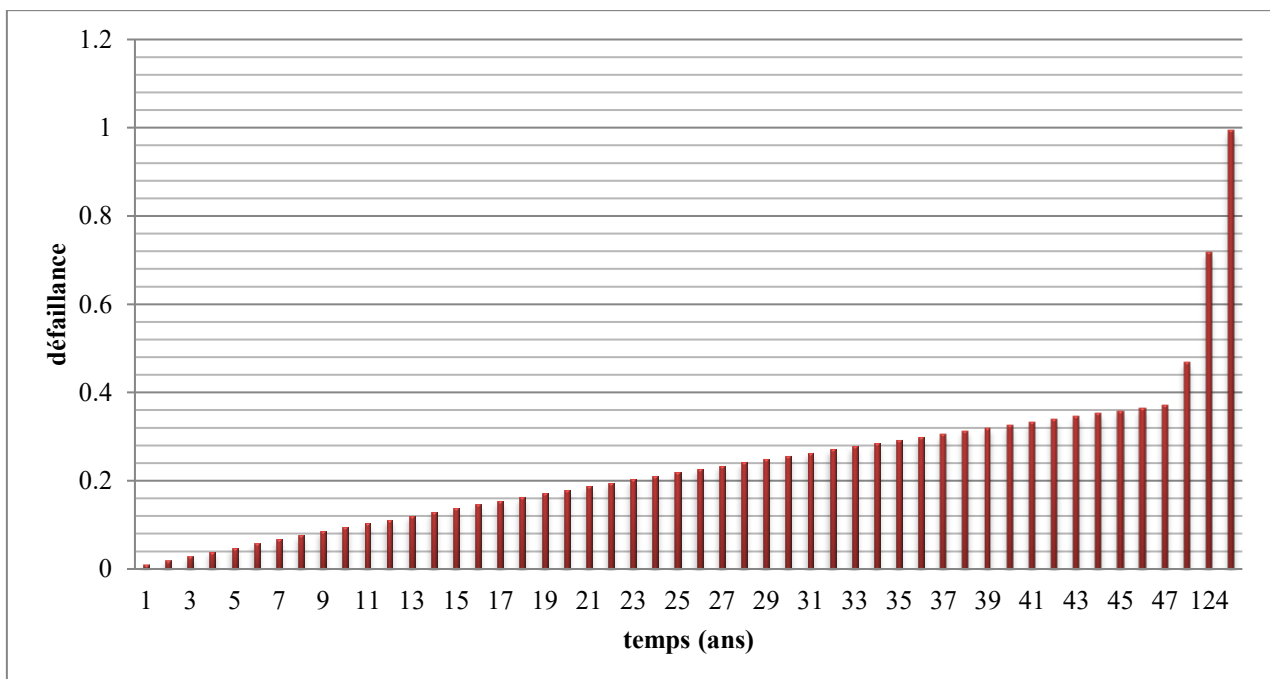


Figure III .16 : Graphe de défaillance par années

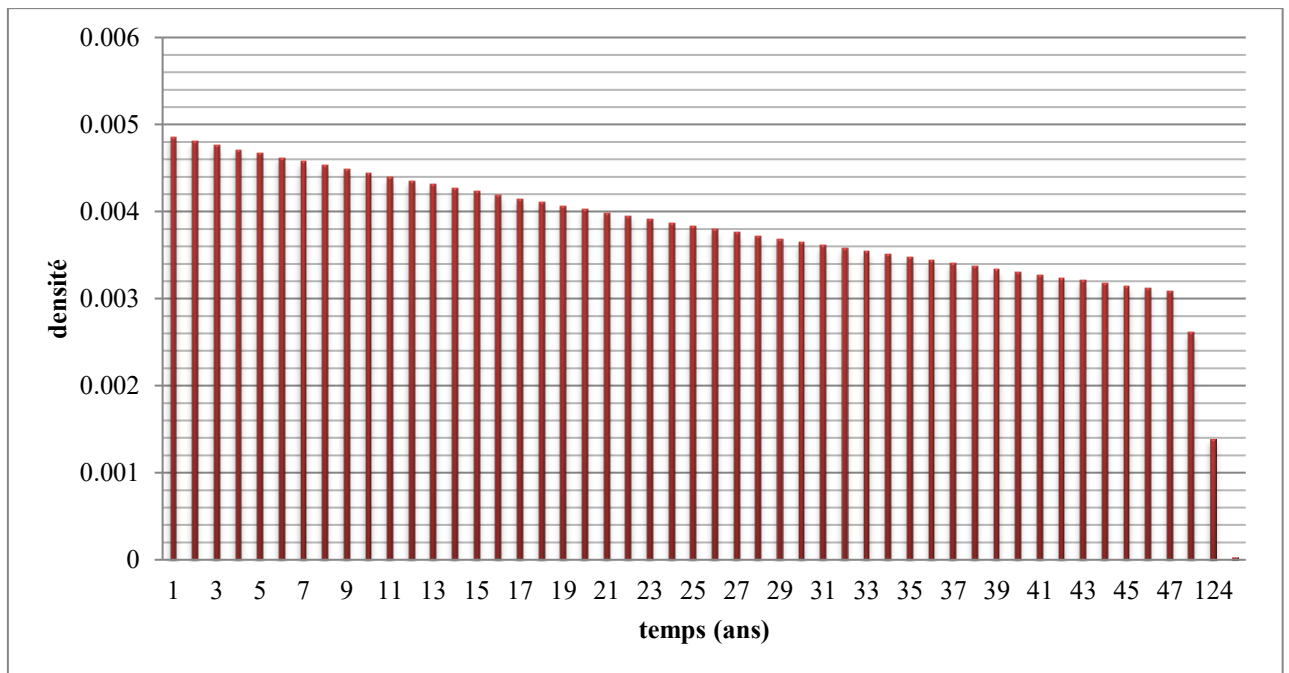


Figure III.17 : Graphe de la densité par année

#### **Etape 5 : Analyse des résultats obtenus**

On remarque que La courbe de colonne de  $R(n)$  est une courbe descendante et après 124 ans, il est proche de 0, il en résulte que le système n'est pas garanti pendant le temps bon fonctionnement requise, par conséquent, le système doit être bien surveillé par l'application de la maintenance préventive

Une fiabilité réduite correspond à une augmentation de fonction  $F(n)$  être proche de 1 ce qui signifie une augmentation de réparation

La courbe de  $f(n)$  représente la probabilité instantanée de défaillance, dans ce cas l'augmentation du Temps d'arrêt provoque une diminution de sa fiabilité et augmente la probabilité de présence d'un défaut ou de défaillance.

### **III.10 Propositions pour améliorer la disponibilité et la fiabilité**

Pour une bonne fiabilité et disponibilité du système de concassage, nous pouvons faire les recommandations suivant :

- Contrôle de travail au niveau de tapis métallique lors du déchargement des camions à bascule pour les calcaires et argile, afin de réduire le nombre de panne production.
- Les inspections journalières doivent être respectées afin de déceler très tôt les pannes pour déclencher le processus de réparation au plus tôt.
- Une franche collaboration devra exister entre la maintenance et service d'opérations
- Selon l'historique des pannes de chaque composant et Elaborer un programme de maintenance préventive correspondant aux besoins de la ligne.
- En fin le programme de maintenance établie doit être respecté

### **III.11 Conclusion**

Ce chapitre avait pour but d'appliquer la simulation monte Carlo par l'utilisation des chaînes Markov pour évaluer la disponibilité et la fiabilité du système concassage, et nous avons donnés les caractéristiques principales pour évaluer la fiabilité et la disponibilité de concasseur de la société LAFARGE par l'articulation sur l'historique des pannes.

Ensuit, nous avons fait des suggestions pour augmenter la disponibilité et la fiabilité dans les années à venir.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Aujourd'hui, la sûreté de fonctionnement est un champ d'actions privilégié de la recherche d'améliorations des performances des équipements dans l'entreprise. Cependant les méthodes et les techniques de maintenance ne possèdent pas un caractère unique et universel en fonction du type des processus industriels à maintenir et la nature des systèmes et des sous-systèmes ou équipements, il faudra mettre en œuvre des méthodes spécifiques tenant compte des technologies déployées selon les cas...

Bien que les méthodes d'évaluation des performances de la maintenance soient divers, la simulation monte Carlo nous apportent un avantage qui est Les résultats indiquent non seulement ce qui pourrait arriver, mais dans quelle mesure, ce qui permet une optimisation chiffrée de la fiabilité et de la disponibilité.

Dans ce mémoire, les indices de la fiabilité, disponibilité et de maintenabilité sont déterminées pour l'utilisées comme outil d'aide à la décision afin améliorer les performances de maintenance. L'information recueillie par chaîne de Markov est utilisée pour vérifier l'état du système et voir les probabilités des pannes, en se basent sur l'historique de panne du concasseur de la cimenterie.

Les chaînes de Markov et la méthode monte Carlo sont couramment employées en sûreté de fonctionnement pour les attentes futurs en matière de fiabilité et de disponibilité des systèmes, a pour but de minimiser les défaillances et les anomalies qui perturbent le fonctionnement du système de production.

## **References bibliographiques**

## References bibliographiques

- [1] **Djamel HALIMI**, « Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures », Thèse de Doctorat, université m'Hamed Bougara-Boumerdes, 2013/2014.
- [2] **Claire Pagetti** « Module de sûreté de fonctionnement» 3eme TR - option SE 10 décembre 2012 Paris 3èmeEdition AFNOR 1988 X60-010 Maintenance Vocabulaire et gestion des biens durables
- [3] **MEBARKIA Djalal** , « Recherche d'une solution optimale d'exploitation et de maintenance des gazoducs algériens tenant compte de la fiabilité des équipements des différentes lignes », Mémoire de Magister, université m'hamed Bougara de Boumerdes, 2012/2013.
- [4] **EN 13306**, Terminologie de la maintenance, EN 13306 X60-319, juin, 2001.
- [5] **BELOUADAH Abdenaceur**, « Amélioration de la fiabilité d'un système électromécanique par l'utilisation des opérations de la maintenance préventive », Diplôme de master ,université Mohamed Boudiaf de m'sila, 2015/2016.
- [6] **BEN DJAAFER Ahmed**, « Réalisation d'un plan de maintenance préventive systématique pour l'amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un système électromécanique », Diplôme de master , université Mohamed Boudiaf de m'sila, 2012/2013.
- [7] **Pascal VRIGNAT**, « Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne», Thèse de Doctorat, université d'Orléans, 2010.
- [8] **Ivana Rasovska**, « Contribution à une méthodologie de capitalisation des connaissances basée sur le raisonnement à partir de cas : Application au diagnostic dans une plateforme d'e-maintenance », Thèse doctorale. L'UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté (2006).
- [9] **GUEMAR oussama**, « importance de routeur d'expérience dans l'organisation de la maintenance», Thèse de Master, université Badji Mokhtar- Annaba, 2017
- [10] **CHEIKHI Omar et DJOUDI Ismail**, « Amélioration des performances opérationnelles des systèmes de production en utilisant la théorie des chaînes de Markov», Diplôme de master , université Mohamed Boudiaf de m'sila, 2017 / 2018.
- [11] **BOUBAKRI MOHAMED LAMINE et DJAIDJA OMAR ANAS**, « Une approche d'amélioration du service maintenance basée sur les réseaux des files d'attente», Diplôme de master , université Mohammed Boudiaf de m'sila, 2016 /2017.
- [12] **François Monchy**, « Maintenance, méthodes et organisation ». Éditeur Dunod, 2ème édition, Paris, 2003.
- [13] **KAHAL HOUSSEYN**, Réseaux Bayésiens Dynamiques: Application aux réseaux électriques», magistère en électrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran,

- [14] **DEFDAF Mabrouk**, « utilisation des réseaux de files d'attentes pour l'évaluation des performances de la maintenance », Thèse de Doctorat, université Badji Mokhtar-Annaba, 12/04/2018.
- [15] **GABRIEL Antonio Perez Castaneda**, « Evaluation par simulation de la sûreté de fonctionnement de systèmes en contexte dynamique hybride», Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2009. Français.
- [16] Les Rencontres du CIMI Sûreté de Fonctionnement des installations industrielles 18 octobre 2011
- [17] **Mahfoudi K**, « Support technique : Gestion et organisation de la maintenance Projet de mise à niveau de la formation professionnelle en Algérie, financé par l'union européenne », 2008.
- [18] **A. B OCNASU**, «Evaluation de la sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution par la simulation Monte Carlo : application à des stratégies de maintenance optimales» Thèse dirigée préparée à L'Institut Polytechnique de Grenoble, octobre 2008
- [19] **LYNDA Bouhidel**, «la méthode monte Carlo pour l'analyse d'un système de production (aspect dysfonctionnel) », thèse de magister, université El-Hadj Lakhdar-Batna, juin 2012
- [20] N. CHEIKH ROUHOU, «simulation des systèmes de production », laboratoire de gestion et procédés de production, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
- [21] **TOUCHE Nassim**, « cours Chaînes de Markov à temps discrète» Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Année Universitaire 2017 / 2018
- [22] **DAVID COUPIER**, «Cours processus stochastiques» , POLYTECH'LILLE , 20 juillet 2009
- [23] **Nicolas Grenon-G**, « Méthodes MCMC : amélioration d'un algorithme d'adaptation régionale et applications à la climatologie», Rapport de Stage, Université de Montréal, 7 novembre 2015
- [24] **E.Pommiès, S. Robin**, «Cours Introduction aux chaînes de Markov homogènes», Département OMIP, 16 juin 2004
- [25] **S. Lemaire**, «cours Introduction aux chaînés de Markov», Université Paris-Sud, 2012-2013

---