

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA – Bejaia

Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



Projet de Fin d'études

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

Spécialité :

✚ Maintenance industrielle.

✚ Électromécanique.

Thème

***Optimisation de la maintenance des systèmes configurés
en série***

Préparé par :

- CHIBANE Nassim.
- AMIR Anaïs.

Devant le jury composé de :

- Président : Mr R. LAGGOUNE
- Encadrant : Mr E. AIT MOKHTAR
- Examineur : Mr N. ZOUGAB

Année universitaires : 2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : Chibane

Prénom : Nassim

Matricule : 1919 33.02 6708

Spécialité et/ou Option : Maintenance Industriel

Département : Génie électrique

Faculté : Sciences et technologies

Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : optimisation de la maintenance des systèmes

..... Configurés en série

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
02.07.2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : Amir

Prénom : Anaïs

Matricule : 2020.33.00.63.99

Spécialité et/ou Option : Électromécanique

Département : Génie électrique

Faculté : Sciences et technologies

Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Optimisation de la maintenance des systèmes

..... Configurés en série

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
02/02/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions **Allah le Tout-Puissant** de nous avoir guidé et accordé les Bénédiction et la force ainsi que le courage nécessaire pour accomplir ce travail.

Nous présentons notre plus profond respect et notre gratitude à notre superviseur **Mr AIT MOKHTAR Elhassene**, pour ses commentaires, son soutien et ses conseils continus tout au long du processus de rédaction de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à **Mr BELAID** pour son gentil aide en consacrant une partie de son temps à travailler sur l'aspect pratique de ce travail de recherche.

Nous présentons nos remerciements à tous les membres du jury **Mr Radouane Laggoune** et **Mr Zougab Nabil** qui ont bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Nous tenons également à adresser des remerciements particuliers à **nos familles** et nos amis (es) pour leur amour, leur confiance et leurs encouragements continus, ce travail acharné est le fruit de leur soutien inconditionnel.

Table des matières

Table des matières	i
Listes des figures.....	iii
Liste des tableaux	iv
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Présentation du complexe CEVITAL spa	2
I-1 Introduction	2
I.2 Présentation du Complexe CEVITAL spa. Bejaïa.....	2
I.2.1 Implantation	2
I.2.2 Activités de CEVITAL	2
I.3 Missions de CEVITAL	3
I.4 Quelques huiles produites par CEVITAL spa	3
I.5 La raffinerie d'huile.....	3
I.5.1 Définition du raffinage	4
I.5.2 Objectif du raffinage	4
I.5.3 Etapes du raffinage.....	4
I.5.4 Equipements constituant la ligne de production C appartenant à la raffinerie d'huile. 6	
I.5.5 présentation et fonctionnement des équipements de la ligne C dans la raffinerie d'huile	
.....	6
I.6 Conclusion	8
CHAPITRE II : Généralités sur les concepts de la maintenance et de la fiabilité	9
II.1 Introduction	9
II.2 Concepts de la fiabilité	9
II.2.1 Définition de la fiabilité.....	9
II.2.2 Objectif fondamentale de fiabilité.....	9
II.2.3 Principales fonctions statistiques utilisées en fiabilité.....	9
II.2.4 Différentes phases du cycle de vie d'un produit	10
II.2.5 Configuration de la fiabilité des systèmes	12
II.2.6 Lois de probabilités usuelles utilisées en fiabilité	13
II.2.6.2.1 Signification des paramètres de la loi de Weibull.....	14
II.2.7 Méthode de vraisemblance	15
II.2.7.3 Estimation des paramètres de la loi de Weibull à l'aide de logiciel MATLAB	16
II.2.8 Définition de la défaillance	17
II.3 L'enjeu de la maintenance.....	17

II.3.1 Définition de la maintenance	17
II.3.2 Objectifs la maintenance.....	17
II.3.3 Types de Maintenance	18
II.3.4 Critères affectant la maintenance	20
II.4 Conclusion.....	21
CHAPITRE III : Politiques de la maintenance	22
III.1 Introduction.....	22
III.2 Définition de politique de maintenance	22
III.3 Définitions de remplacement	22
III.4 politiques de maintenance des systèmes unitaires.....	23
III.4.2 Politique de maintenance en bloc	24
III.4.3 Politique de MP périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance	26
III.5 Politiques de maintenances des systèmes multi-composants.....	26
III.5.1 Concept des dépendances entre le même système.....	26
III.5.2 Différents types de politique de maintenance des systèmes multi composants	27
III.5.2.1 Politiques de regroupements.....	28
III.6 Conclusion	32
CHAPITRE IV : Optimisation de la maintenance du système de raffinage d'huile de complexe CEVITAL.....	33
IV.1 Introduction.....	33
IV.2 Description du système a étudié.....	33
IV.2.2 Estimation des paramètres Weibull	34
IV.3 Politique de maintenance proposé	34
IV.3.1 Structure de coût adoptée pour l'évaluation de la maintenance	35
IV.3.2 Règle de décision pour la maintenance opportuniste.....	36
IV.3.3 Algorithme de résolution	37
IV.3.4 Résultats de simulation de la politique opportuniste	41
VI.5 Conclusion	44
Conclusion générale	45

Listes des figures

Figure I-1 : Séparateur où s'effectue le Dégommage	5
Figure I-2 : Neutralisation à la soude.....	5
Figure I-3 : Colonne de désodorisation	5
Figure I-4 : Présentation des principaux équipements constituant la ligne de production C.....	6
Figure I-5 : Présentation des équipements a étudié sur la ligne (C).....	8
Figure II-1 : Courbe baignoire (les différents cycles de vie d'un produit).....	11
Figure II-2 : Courbe de taux de défaillance pour les composants mécaniques.....	11
Figure II-3 : Diagramme de fiabilité d'un système en série.....	12
Figure II-4 : Diagramme de fiabilité d'un système en parallèle.....	12
Figure II-5 : Courbe de défaillance selon β	14
Figure II-6 : Relation dégradation/performance	17
Figure II-7 : Classifications des types de maintenance selon la norme « AFNOR ».....	18
Figure III-1 : Schéma représente le principe de la politique de maintenance selon l'âge.....	24
Figure III-2 : Le principe la politique de maintenance en bloc.....	24
Figure III-3 : schéma représente les trois model de base de la politique de maintenance en bloc (politique MP périodique).....	25
Figure III-4 : les principaux types de politiques de maintenance pour les systèmes multi-composants.....	28
Figure VI-1 : Présentation d'une logique décisionnelle.....	37
Figure IV-2 : Organigramme représente les étapes principales de simulation.....	40
Figure IV-3 : Exemple de simulation de la maintenance corrective/préventive/opportun des trois premiers cycles.....	43

Liste des tableaux

Tableau VI-1 : Résultats d'estimation des paramètres de weibull.....	34
Tableau VI-2- Présentation des couts unitaires des composants du système proposé.....	36

Introduction générale

Dans le secteur industriel, une gestion efficace de la maintenance des équipements de production est un outil stratégique essentiel pour garantir la disponibilité, la fiabilité des équipements et maîtriser les coûts. Parmi les différentes configurations possibles, les systèmes en série sont particulièrement sensibles aux défaillances, où le dysfonctionnement d'un seul composant peut entraîner l'arrêt de toute la chaîne de production. Cela rend la gestion optimisée de la maintenance d'autant plus importante pour minimiser les arrêts non planifiés, prolonger la durée de vie des équipements, et aussi réduire les coûts opérationnels [1].

La problématique de ce projet est portée sur l'optimisation de la maintenance des systèmes en série. L'objectif est d'identifier et mettre en œuvre une politique de maintenance adapter pour ces systèmes, qui permettent de réduire les couts, de minimiser les temps d'arrêt et améliorer les performances globales des équipements.

Notre étude s'appuie sur l'analyse d'un système réel de la ligne C de la raffinerie d'huile de CEVITAL. Elle inclut :

- La modélisation du système en série.
- L'estimation des paramètres de fiabilité à partir de données de retour d'expérience.
- La simulation d'une politique de maintenance.
- Analyse des résultats pour en déduire l'efficacité de la politique.

La structure de ce travail est organisée comme suit :

- Le chapitre 1 présente le complexe CEVITAL spa et plus particulièrement le fonctionnement de la raffinerie d'huile.
- Le chapitre 2 revient sur les concepts fondamentaux de la maintenance et de la fiabilité
- Le chapitre 3 introduit les différentes politiques de maintenance, en distinguant celles appliquées aux systèmes unitaires de celles destinées aux systèmes multi-composants.
- Enfin, le chapitre 4 présente une application d'une politique de maintenance opportuniste sur une ligne de production d'huile, avec simulation des performances.

CHAPITRE I : Présentation du complexe CEVITAL spa

I-1 Introduction

Les statistiques montrent que l'Algérie est un gros consommateur d'huile alimentaire, avec une consommation par habitant estimée entre 13 et 14 kg par an.

En raison de l'augmentation de cette consommation, le marché algérien constitue une opportunité importante à saisir pour la production d'huiles. Par conséquent, l'entreprise doit améliorer la gestion de ses capacités de production d'après ces entreprises en trouve le grand complexe de la production des huiles en Algérie CEVITAL.

I.2 Présentation du Complexe CEVITAL spa. Bejaïa

I.2.1 Implantation

Le complexe agroalimentaire CEVITAL est le plus grand complexe privé en Algérie, et la première société privée dans l'industrie du raffinage des huiles.

Elle est une société par action, d'un montant de 970 000 00 DA. Elle a été créée en 1998 et implantée dans l'enceinte portuaire de Bejaïa qui s'étend sur une superficie de 45 000m², constituée de différentes directions et service.

I.2.2 Activités de CEVITAL

CEVITAL se concentre principalement sur la production et la vente des huiles végétales, de margarine et de sucre, ainsi que sur la production d'énergie électrique. Ses activités incluent notamment :

- Le raffinage des huiles avec une capacité de 1800 tonnes par jour,
- Le conditionnement d'huile à 1400 tonnes par heure,
- La production de margarine à 600 tonnes par jour,
- La fabrication d'emballages en PET à 9600 unités par heure,
- Le raffinage du sucre à 1600 tonnes par jour et à 3000 tonnes par jour,
- Le conditionnement de sucre
- Le stockage de céréales à 120000 tonnes.
- La cogénération avec une capacité de production d'énergie électrique de 64 MW et de vapeur.

I.3 Missions de CEVITAL

L'entreprise a pour mission principale d'accroître la production tout en garantissant la qualité et l'emballage des huiles, des margarines et du sucre à des tarifs beaucoup plus compétitifs, dans le but d'assurer la satisfaction et la fidélisation de la clientèle.

Les ambitions de CEVITAL peuvent se résumer ainsi :

- Étendre la gamme de ses produits sur l'ensemble du territoire national.
- Importer des graines oléagineuses afin d'extraire directement les huiles brutes.
- Améliorer ses possibilités d'emploi sur le marché du travail.
- Soutenir les agriculteurs avec des aides financières pour favoriser la culture locale des graines oléagineuses.
- Moderniser ses équipements en matière de machines et de techniques pour augmenter sa capacité de production.
- Situations de ses produits sur les marchés internationaux grâce à leurs exportations.

I.4 Quelques huiles produites par CEVITAL spa

Les huiles essentielles produites pas le complexe CEVITAL sont : Fleurial, Canda, Oléol, Élio1, Élio2, Fridor, etc... [2].

I.5 La raffinerie d'huile

La raffinerie d'huile du complexe CEVITAL constitue une installation entièrement automatisée, classée parmi les plus modernes au monde. Elle joue un rôle stratégique dans le secteur agroalimentaire algérien, en assurant la couverture des besoins nationaux en huiles végétales raffinées, et a permis à l'Algérie de passer du statut d'importateur à celui d'exportateur.

La raffinerie est configurée selon une architecture dite « soft colonne », et se compose de trois lignes de production : les lignes A, B et C.

- Les lignes A et B présentent une capacité de production de plus de 400 tonnes par jour chacune.
- La ligne C, de dernière génération, affiche une capacité journalière de 1000 tonnes et est équipée par le constructeur belge DE SMET.

I.5.1 Définition du raffinage

Il s'agit de valoriser l'huile. Les huiles sont utilisées à la fois pour l'alimentation ou les applications industrielles. Un traitement spécifique est nécessaire pour garantir leur qualité et améliorer leur conservation. Les huiles pour la consommation nécessitent un raffinage plus complet, que nous étudierons principalement.

I.5.2 Objectif du raffinage

Le raffinage vise à améliorer les caractéristiques d'un produit :

- a. Réduire la couleur et éliminer l'odeur.
- b. Eliminer les substances indésirables afin d'obtenir un produit pur et stable tels que :
- c. Et d'éliminer les produits indésirables pour avoir un produit d'un bon niveau de pureté et de stabilité tels que
- d. Réduire les produits d'oxydation,
- e. Modifier les triglycérides, de préserver les vitamines,
- f. Minimiser les pertes en triglycérides et de protéger contre la dégradation.

I.5.3 Etapes du raffinage

- La démucilagination ou dégomme :

Le processus de dégomme vise à enlever les phospholipides susceptibles de causer des pertes importantes d'huile raffinage. Pour cela, on hydrate les phosphatides avec une solution d'acide phosphorique (H_3PO_4) mélangé avec de l'eau.

- La neutralisation :

La neutralisation est réalisée par la soude caustique (NaOH) qui permet d'éliminer pratiquement tous les acides gras libres en les transformant en savon insoluble dans l'huile selon la réaction chimique, Cette étape doit être réalisée avec une bonne concentration de soude. Trop de NaOH peut causer une saponification parasite et réduire le rendement.

- Le lavage :

Cette étape consiste à nettoyer l'huile en éliminant les résidus de savon, les métaux et autres impuretés, l'opération se fait en deux phases utilisant de l'acide citrique.

- **Le séchage :**

Cette phase a pour but de retirer toute l'humidité de l'huile lavée en utilisant un sécheur sous vide.

- **La décoloration :**

L'objectif principal de la décoloration est de se débarrasser des pigments colorés dans les huiles brutes. Cette technique repose sur l'adsorption de ces pigments par de la terre active.

- **La filtration :**

La filtration permet de séparer l'huile décolorée de la terre usée. Les murs du filtre, comme ceux en sable, en papier ou en métal, doivent avoir des pores qui retiennent les solides tout en laissant passer le liquide.

- **La désodorisation :**

La désodorisation est la dernière étape du traitement des huiles et graisses pour la consommation. Cela se fait en injectant de la vapeur sèche dans l'huile sous vide (0,5 à 10 mbar) pour enlever les composants qui causent des goûts et des odeurs.

Nous avons illustré quelques images des processus contenu dans les étapes de raffinage dans les figures (I-1, I-2, I-3).



Figure I-1 : Séparateur où s'effectue le Dégommage.



Figure I-2 : Neutralisation à la soude.



Figure I-3 : Colonne de désodorisation.

I.5.4 Equipements constituant la ligne de production C appartenant à la raffinerie d'huile

La raffinerie d'huile a trois lignes de raffinage (A, B, C), et nous intéressons sur la ligne 'C' qui se divise en trois sections successives : la neutralisation, la décolorisation et la désodorisation. Chaque section contient plusieurs équipements et qui sont présentés dans la figure I-4.

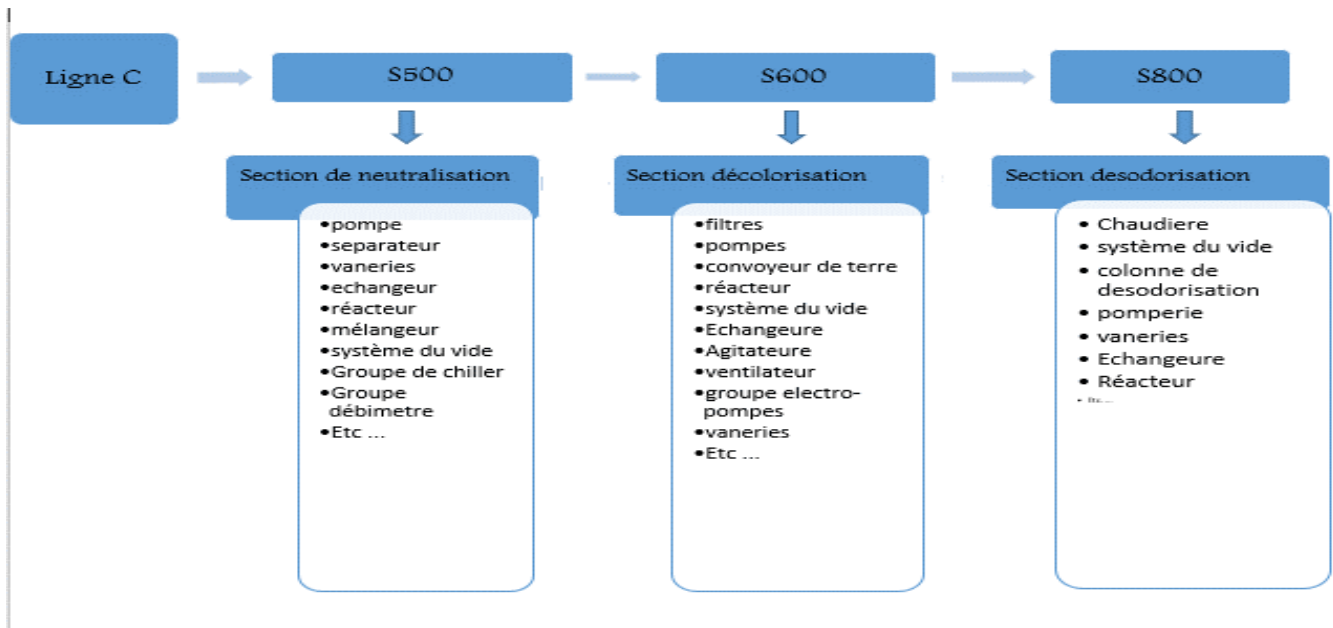


Figure I-4 : présentation des principaux équipements constituant la ligne de production C.

I.5.5 présentation et fonctionnement des équipements de la ligne C dans la raffinerie d'huile

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à la ligne C appartenant à une raffinerie d'huile. Elle est organisée en trois sections successives : la neutralisation, la décolorisation et la désodorisation. Ces sections fonctionnent de manière sérielle, c'est-à-dire que chaque équipement de la ligne dépend du bon fonctionnement de ceux qui le précèdent. La défaillance d'un seul composant entraîne ainsi l'arrêt complet de la ligne de production.

En raison de la disponibilité limitée des données, notre étude portera sur une sélection d'équipements représentatifs au sein de chaque section.

➤ Section de neutralisation

C'est la première section de la ligne qui comporte plusieurs équipements essentiels. Parmi eux, cinq ont été retenus pour l'étude :

- Armoire de commande et de puissance : Elle permet de contrôler et d'alimenter électriquement les différents équipements de la section. Son bon fonctionnement est indispensable pour le démarrage et la régulation de l'ensemble du système.
- Échangeur à plaques : Il est utilisé pour réaliser des transferts thermiques efficaces entre fluides, nécessaires à la régulation de la température durant le processus de neutralisation.
- Groupe chiller (TRANE) : Il s'agit d'un groupe de production d'eau glacée de nouvelle génération, utilisé pour refroidir certains fluides à des températures précises dans le processus.
- Mélangeur : Cet équipement assure l'homogénéisation des fluides à traiter, une étape cruciale pour garantir l'efficacité du traitement chimique de neutralisation.
- Séparateur de lavage et de neutralisation : Il permet de séparer les impuretés et les agents chimiques introduits lors du traitement, assurant ainsi une huile partiellement purifiée à la sortie de cette section.

➤ **Section de Décolorisation**

Dans cette section, l'objectif est de retirer les pigments colorés présents dans l'huile. Les équipements sélectionnés sont :

- Pompe nue : Elle permet de transférer les fluides entre les différentes étapes du processus.
- Groupe électropompes : Équipement motorisé assurant la circulation sous pression de l'huile au sein des installations.
- Agitateur : Son rôle est d'assurer un brassage efficace pour optimiser l'adsorption des pigments par les agents décolorants.
- Filtre Niagara : Ce système permet de retenir les particules solides et les agents de décoloration après traitement, garantissant une huile claire à la sortie de la section.

➤ **Section de Désodorisation**

La dernière étape du processus vise à éliminer les composés volatils responsables des odeurs désagréables. Deux équipements sont retenus :

- Chaudière haute pression : Elle produit la vapeur nécessaire pour le traitement thermique de l'huile dans le processus de désodorisation.
- Système de vide : Indispensable pour maintenir les conditions de pression réduite requises lors de la distillation des composés volatils, assurant une désodorisation efficace.

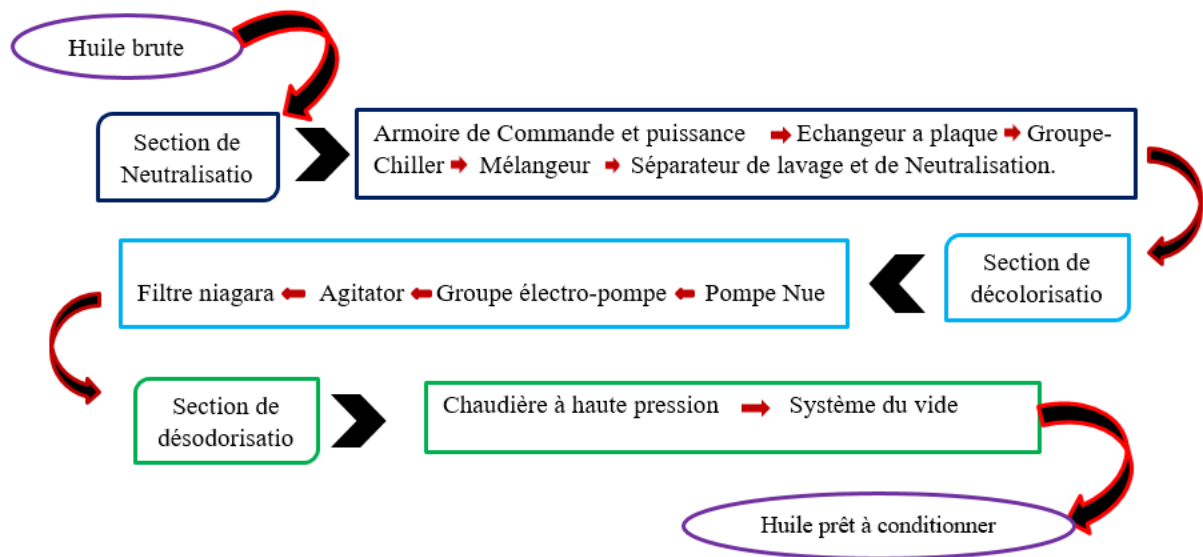


Figure I-5 : présentation des équipements a étudié sur la ligne de production (C).

I.6 Conclusion

Le groupe CEVITAL occupe une place importante en Algérie, notamment grâce à sa raffinerie d'huile. La ligne C de cette raffinerie peut traiter jusqu'à 1000 tonnes par jour en utilisant des techniques avancées pour produire une huile alimentaire de haute qualité. Le processus de raffinage comprend plusieurs étapes telles que la dégommassions, la neutralisation, le blanchiment et la désodorisation afin d'éliminer les impuretés et d'améliorer le goût de l'huile. CEVITAL joue un rôle crucial dans l'économie du pays en réduisant les importations et en créant de la valeur ajoutée. L'entreprise ambitionne de se développer sur les marchés africains et internationaux tout en répondant à la demande croissante d'huiles de qualité. Pour assurer la continuité et la performance de ses opérations, une gestion efficace de la maintenance est essentielle, garantissant ainsi la fiabilité des équipements et la qualité constante des produits.

CHAPITRE II : Généralités sur les concepts de la maintenance et de la fiabilité

II.1 Introduction

La maintenance cherche aujourd'hui à prévenir et réduire les pannes tout en minimisant les coûts des systèmes. Les gestionnaires de la maintenance explorent des stratégies concrètes pour optimiser leurs décisions opérationnelles. Ils doivent respecter les critères de performance tout en tenant compte des limites budgétaires et techniques. Ce chapitre se concentre sur les concepts de maintenance, les types de maintenance et leur contexte d'utilisation et aussi les notions de défaillance. Il aborde également l'importance de la fiabilité ainsi que les méthodes utilisées pour l'analyser et l'évaluer.

II.2 Concepts de la fiabilité

II.2.1 Définition de la fiabilité

D'après la norme AFNOR la fiabilité est définie comme étant ‘’ une aptitude d'un dispositif (composant, système ou équipement) à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps déterminé [3].

II.2.2 Objectif fondamentale de fiabilité

Assurer que les systèmes, composants ou équipements remplissent leur fonction attendue pendant une période donnée, sans panne, dans des conditions d'utilisation données [4].

II.2.3 Principales fonctions statistiques utilisées en fiabilité

En fiabilité, plusieurs fonctions statistiques sont utilisées pour analyser et prédire les performances des systèmes et des composants. Voici quelques-unes des principales fonctions [5].

II.2.3.1 Fonction de fiabilité

La fiabilité à un moment donné est la probabilité que le système fonctionne sans erreur pendant sa durée de vie T . Elle représente la chance de fonctionner en cas de défaillance. La fonction de fiabilité est désignée par $R(t)$.

$$R(t) = P(T > t). \quad (II.1)$$

II.2.3.2 Fonction de défaillance (répartition)

La probabilité qu'un système ou un composant tombe en panne avant un certain temps t est appelée fonction de survie et est le complément de la fonction de fiabilité. Est définie comme étant :

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T \leq t). \quad (\text{II.2})$$

II.2.3.3 Densité de probabilité

On la désigne par $f(t)$, c'est la dérivée de la fonction $F(t)$,

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}. \quad (\text{II.3})$$

Elle indique la probabilité qu'un élément tombe en panne à un moment précis t .

II.2.3.4 Taux de défaillance

Le taux de défaillance instantané $\lambda(t)$ indique la probabilité qu'une défaillance se produise à un moment donné. Etant donné qu'il est opérationnel dans l'intervalle $[t, t + dt]$, en tenant de compte qu'il a fonctionné de $(0 \text{ à } t)$.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (\text{II.4})$$

II.2.3.5 Espérances mathématique

Il représente la moyenne des temps de bon fonctionnement (Mean up time MUT).

$$\text{MUT} = E(T) = \int_0^t x f(t) dx. \quad (\text{II.5})$$

II.2.4 Différentes phases du cycle de vie d'un produit

En général, le secteur industriel comprend plusieurs éléments, à la fois des pièces électroniques et mécaniques. Ainsi, on peut identifier deux types de taux de défaillance qui sont [6] :

II.2.4.1 Taux de défaillance pour des composants électroniques

L'expérience montre que les composants électroniques ont un taux de défaillance qui suit une courbe en forme de baignoire (figure II-1), en trois phases. La première, la période de jeunesse, connaît une forte baisse des défaillances. Ensuite, pendant la phase de vie utile, le taux reste constant. Enfin, pendant la phase de vieillissement, le taux de défaillance augmente. Des essais de vieillissement accéléré peuvent être réalisés pour étudier les modes de défaillance.

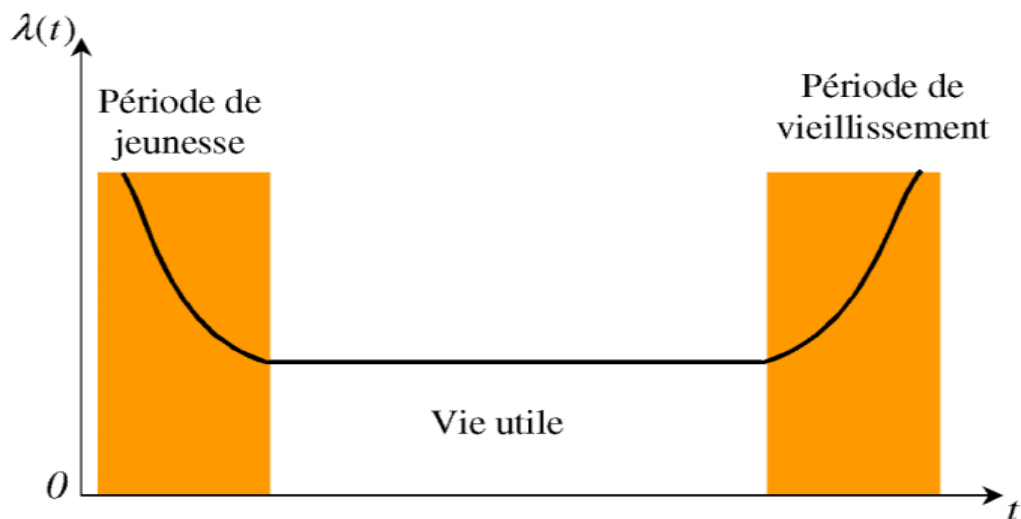


Figure II-1 : Courbe baignoire (les différents cycles de vie d'un produit).

II.2.4.2 Taux de défaillance pour des composants mécaniques

Les éléments mécaniques se dégradent dès la première utilisation. Si on trace le taux de panne en fonction du temps, on voit qu'il n'y a pas une durée constante à un usage optimal (figure II-2). Le taux de panne change de manière non linéaire au cours de la vie du système.

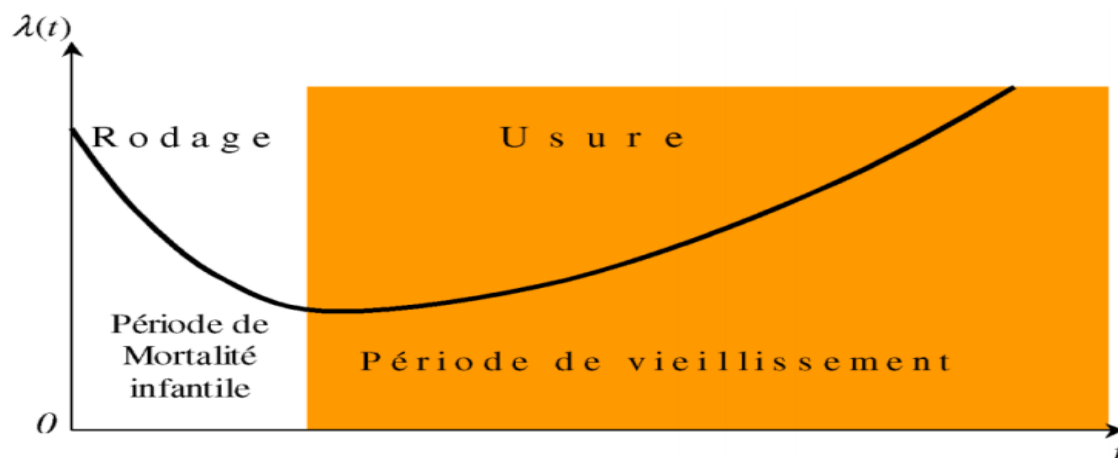


Figure II-2 : Courbe de taux de défaillance pour les composants mécaniques [6].

- La phase 1 concerne la période de mortalité des jeunes machines, avec des échecs diminuant lentement grâce aux caractéristiques internes améliorées et au pré-conditionnement des pièces.
- La phase 2 concerne le vieillissement de l'appareil, où les défaillances augmentent en raison de processus comme la corrosion et l'usure, réduisant la résilience. Les calculs de fiabilité sont principalement effectués pendant cette phase en utilisant des lois de probabilité.

II.2.5 Configuration de la fiabilité des systèmes

La fiabilité d'un équipement est liée aux conséquences d'une (ou plusieurs) panne(s) des éléments concernant son fonctionnement optimal. La relation entre la panne d'un élément et celle d'un matériel est généralement caractérisée par deux catégories suivantes [7].

II.2.5.1 Configuration en série

Un système est dit en série lorsque la panne de l'un de ses composants provoque la panne totale du système. Le taux de fiabilité $R(t)$ d'un équipement peut être exprimé comme suit :

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (\text{II.6})$$

Cette configuration peut être illustrée par le diagramme de fiabilité présenté dans la figure II-3 ou les composants sont indépendants.

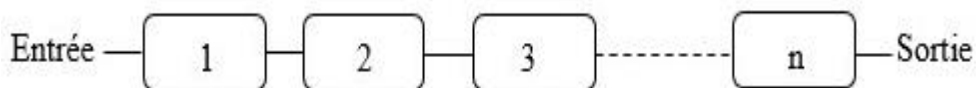


Figure II-3 : Diagramme de fiabilité d'un système en série.

La loi de fiabilité d'un matériel à configuration en série est le produit des lois de fiabilité de ses composants.

II.2.5.2 Configuration en parallèle

Un système est en parallèle s'il ne tombe en panne que si tous ses composants échouent. La fiabilité d'un équipement avec des composants non réparables et indépendants est exprimée par

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)). \quad (\text{II.7})$$

Cette structure peut être illustrée par le diagramme de fiabilité présenté dans la figure II-4.

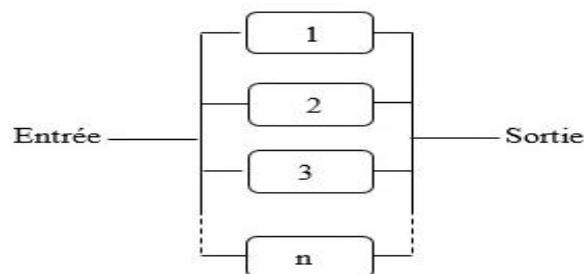


Figure II-4 : Diagramme de fiabilité d'un système en parallèle.

La redondance améliore la fiabilité des systèmes en ajoutant des éléments similaires. Il existe trois types de redondance : active, passive et majoritaire.

II.2.6 Lois de probabilités usuelles utilisées en fiabilité

La fiabilité d'un système qui peut être réparé se définit par la probabilité de la période où il fonctionne correctement.

Les probabilités les plus couramment employées en fiabilité sont celles de Weibull et exponentielle [5].

II.2.6.1 Loi exponentielle

La loi exponentielle trouve son utilité dans de nombreux secteurs. Elle sert fréquemment à illustrer la durée de vie des équipements qui éprouvent des pannes soudaines, ce qui explique sa notoriété en matière de fiabilité électronique. Cette loi repose sur un unique paramètre, le taux de défaillance, noté λ , avec : $t > 0, \lambda > 0$.

Elle est donnée comme suit :

- La fiabilité : $R(t) = \exp(-\lambda t)$. (II.8)
- La probabilité de défaillance : $F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$. (II.9)
- La densité de probabilité : $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$. (II.10)
- Le taux de défaillance : $\lambda(t) = \lambda$. (II.11)
- La durée de vie moyenne : $MUT = \frac{1}{\lambda}$. (II.12)

II.2.6.2 Loi de Weibull

La distribution de Weibull est la plus utilisée en fiabilité. Elle est flexible et inclut d'autres distributions comme la distribution exponentielle et la distribution de Rayleigh. Elle est décrite par deux paramètres : β et η . Parfois, un troisième paramètre, γ , est aussi utilisé pour ajuster le début de la courbe par rapport à l'origine.

Elle est donnée comme suit avec : $t > 0$:

- La fiabilité : $R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right)$. (II.13)
- La probabilité de défaillance : $F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right)$. (II.14)
- La densité de probabilité : $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right)$. (II.15)
- Le taux de défaillance : $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$. (II.16)
- La durée de vie moyenne : $MUT = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$. (II.17)

Où Γ est la fonction de gamma d'Euler, définie par :

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt. \quad (\text{II.18})$$

II.2.6.2.1 Signification des paramètres de la loi de Weibull

- Paramètre de forme β

Il est évident que le taux de défaillance selon la loi de Weibull est un modèle de puissance lié au temps, ce qui aide à représenter différentes situations [5].

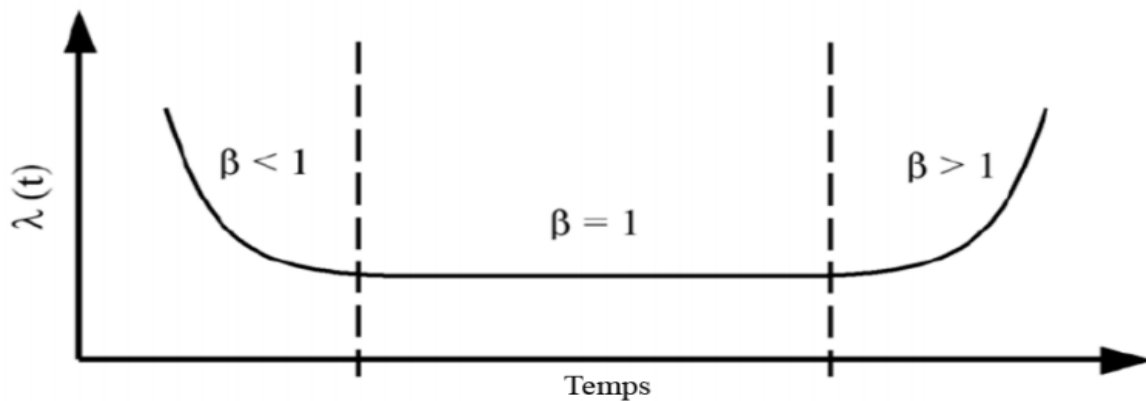


Figure II-5 : Courbe de défaillance selon β [5].

La Figure II-5 montre la courbe en baignoire, qui illustre trois étapes d'un système. Cette courbe est créée en variant le paramètre β dans la loi de Weibull

Si $\beta < 1$: $\lambda(t)$ diminue, ce qui indique que la condition du système s'améliore. On dit alors que le système est en phase de jeunesse.

Si $\beta = 1$: $\lambda(t)$ reste constant, alors la loi exponentielle apparaît comme un cas spécifique de la loi de Weibull. Le système, de son côté, est en phase de vie utile.

Si $\beta > 1$: $\lambda(t)$ augmente, ce qui indique que la condition du système se détériore. Ainsi, le système se trouve dans sa période de vieillesse.

- Paramètre d'échelle η

Il s'agit de déterminer la durée pendant laquelle un système reste en bon état de fonctionnement (cette période est la même que celle entre les intervalles d'échantillonnage jusqu'à l'arrêt). Elle est également connue sous le nom de durée de vie. Lorsque t est égal à $\gamma + \eta$, cela signifie que la fonction de répartition $F(t)$ atteint 63 %.

- Paramètre de localisation γ

La dégradation du système est définie en fonction du temps. En général, la localisation de dégradation est nulle, $\gamma = 0$ et la loi de Weibull a ses deux paramètres. Parmi les deux cas suivants :

- Si $\gamma < 0$, alors le système était déjà endommagé avant d'être mis en service.
- Si $\gamma > 0$, alors la dégradation commence à la date $t = \gamma$.

En général, cela signifie que la dégradation et le processus de détérioration commencent.

II.2.7 Méthode de vraisemblance

La méthode de vraisemblance est une méthode statistique utilisée pour trouver la valeur la plus probable des paramètres d'un modèle en maximisant une fonction appelée fonction de vraisemblance [8].

La fonction de vraisemblance est un concept fondamental dans l'estimation de la vraisemblance. Elle est définie comme la probabilité des données observées étant donné un ensemble de paramètres.

II.2.7.1 Principe de la vraisemblance

Soit t une variables aléatoires indépendantes t_1, t_2, \dots, t_n qui sont distribuées de manière identique avec une densité f de paramètre θ_i ($i=1,2,3,\dots,n$) représentant une fonction de fréquence alternative où, $\theta_i = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ sont inconnus. Alors la vraisemblance des observations est donnée par : t_i

$$L(t_1, t_2, \dots, t_n, \theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i; \theta). \quad (\text{II.19})$$

II.2.7.2 Estimation du maximum de vraisemblance MDV

- Cas des données complète

L'estimation du maximum de vraisemblance (MLE) est une technique largement utilisée dans l'estimation de la vraisemblance. Son objectif est de trouver les valeurs des paramètres qui maximisent la fonction de vraisemblance. Cela est souvent réalisé grâce à des techniques d'optimisation, telles que l'ascension de gradient ou des méthodes numériques.

L'estimateur du maximum de vraisemblance est ce qui vérifie [9] :

$$\frac{\partial \log L(t, \theta)}{\partial \theta} = 0 \quad \text{Et} \quad \frac{\partial^2 \log L(t, \theta)}{\partial \theta^2} < 0$$

Donc le Hessien (ou matrice hessienne) est défini négatif

S'il y a plusieurs paramètres ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$) à estimer alors le système à résoudre est le suivant :

$$\frac{\partial L(t, \theta_i)}{\partial \theta_i} = 0, \frac{\partial L(t, \theta_i)}{\partial \theta_2} = 0, \dots, \frac{\partial L(t, \theta_i)}{\partial \theta_n} = 0 \quad i = 1,$$

Définition des temps de censures

- **Cas données censurées**

En observant n composants qui sont identiques et indépendants jusqu'à leur défaillance ou une date de censure connus, en supposant que les défaillances de ces composants suivent la même loi de probabilité. En définit deux ensembles : U pour les temps de défaillance (i.e. si $i \in U$, le temps t_i est un temps à la défaillance), et C pour les temps censurés (i.e. si $j \in C_d$, le temps t_j est un temps de censure à droite et si $k \in C_g$, le temps t_k est un temps de censure à gauche) [10].

La fonction de vraisemblance associée à cette situation est alors donnée par :

$$L(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n; \theta) = \prod_{i \in U} f(t_i; \theta) \prod_{j \in C_d} F(t_j; \theta) \prod_{k \in C_g} R(t_k; \theta). \quad (II.20)$$

II.2.7.3 Définition des temps de censures

Le temps de censure désigne le moment jusqu'auquel l'on observe un sujet dans une étude, sans que l'événement d'intérêt (décès, panne, rechute...) ne se soit produit. On sait donc que l'événement n'est pas survenu avant cette date, mais on ignore s'il se produira plus tard. Le temps de censure est fréquent en analyse de survie en raison de la fin de l'étude, d'un abandon du suivi, ou d'un événement compétiteur (comme un décès accidentel). Il existe plusieurs types de censure :

- **Censure à droite** (la plus courante) : l'événement n'a pas eu lieu avant la date de fin d'observation.
- **Censure à gauche** : l'événement a eu lieu avant le début de l'observation (mais la date exacte est inconnue).
- **Censure par intervalle** : l'événement est survenu entre deux visites, sans précision de l'instant exact.

Une hypothèse essentielle est que la censure soit dite non informative : le fait qu'un sujet soit censuré ne doit pas être lié à sa probabilité de survenue de l'événement dans le futur. Si ce n'est pas le cas (censure informative), cela peut introduire un biais dans l'analyse.

II.2.8 Définition de la défaillance

Selon la norme AFNOR, la défaillance d'un dispositif est définie comme « État d'un bien lorsque celui-ci est incapable d'accomplir une fonction requise. » [3].

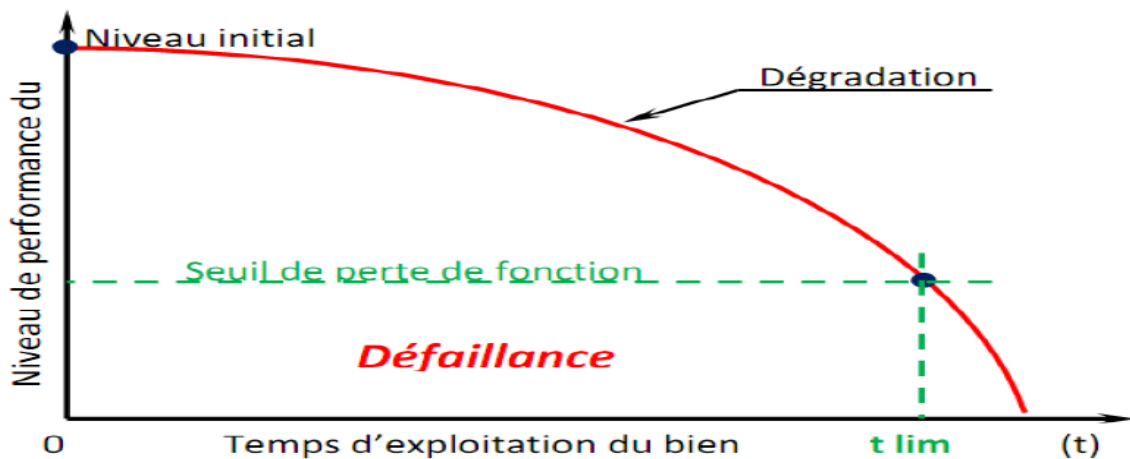


Figure II-6 : Relation dégradation/performance.

II.3 L'enjeu de la maintenance

II.3.1 Définition de la maintenance

Selon la norme AFNOR (Association Française de Normalisation), la maintenance représente « 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 spécifique afin d'accomplir la fonction requise » [3].

Le terme "maintenir" dans un système vise à prévenir les dysfonctionnements, tandis que, "rétablir" consiste à corriger des problèmes après une perte de fonctionnement. Enfin, un "état spécifié" suppose des objectifs clairs et mesurables. [11]

II.3.2 Objectifs la maintenance

- Améliorer la fiabilité du matériel : La maintenance préventive doit s'appuyer sur des analyses techniques du matériel pour être efficace et éviter des pannes.
- Garantir la qualité des produits : La surveillance régulière permet à détecter les problèmes et assure le bon fonctionnement des machines.

- Améliorer l'ordonnancement des travaux : La validation de la planification de la maintenance préventive doit être approuvée par la production. Les techniciens sont insatisfaits si l'arrêt n'est pas autorisé durant une intervention planifiée.
- Assurer la sécurité humaine : Il est important de suivre le calendrier et les normes de sécurité lors de la planification de la maintenance préventive pour éviter les risques imprévus, ce qui implique des visites régulières.
- Améliorer la gestion des stocks : La maintenance préventive simplifie la gestion des stocks en planifiant le remplacement des pièces à des dates spécifiques. Cela permet de ne pas conserver certaines pièces et de les commander seulement au besoin.

II.3.3 Types de Maintenance

La maintenance peut être répartie en deux grandes catégories : la maintenance préventive et la maintenance corrective, ces deux types jouent un rôle essentiel dans la gestion des équipements industriels [3].

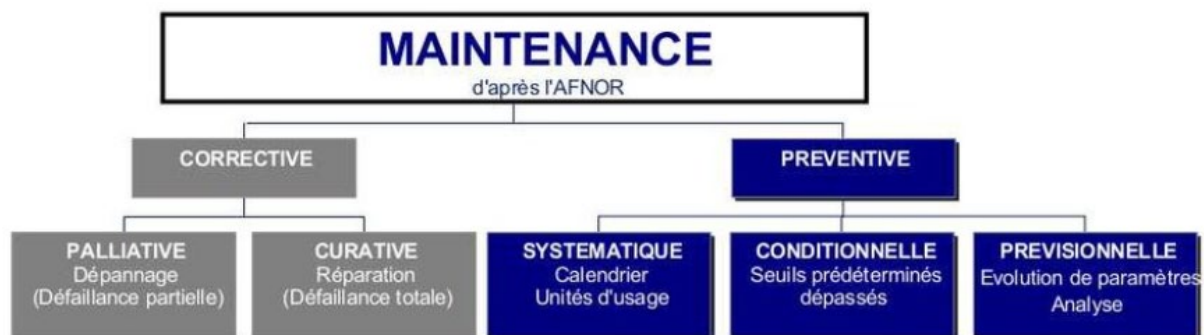


Figure II-7 : Classifications des types de maintenance selon la norme « AFNOR ».

II.3.3.1 Maintenance préventive

Selon la norme AFNOR, la maintenance préventive se définit comme « 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 » [3]. D'après la figure II-7, la maintenance préventive (MP) se divise en trois catégories qui sont :

II.3.3.1.1 Maintenance systématique :

Elle est définie comme étant une « 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 ». Il s'agit donc d'une maintenance planifiée qui implique le remplacement de plusieurs pièces prédéfinies, même en l'absence de tout signe de panne.

II.3.3.1.2 Maintenance conditionnelle :

Ce type de maintenance est défini comme étant une « maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent ».

La maintenance préventive conditionnelle permet de surveiller l'équipement en fonctionnement, et la décision d'intervention est prise lorsqu'il existe une preuve expérimentale de défaillance imminente ou d'un seuil de détérioration prédéfini.

II.3.3.1.3 Maintenance prédictive (prévisionnelle) :

L'AFNOR définit la maintenance prédictive comme : « une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien » [3].

Effectivement, la maintenance prédictive s'appuie sur des équations mathématiques en complément des indicateurs fournis par les capteurs (par exemple, température, vibrations, bruits, etc.), et les interventions de maintenance sont planifiées en fonction de l'examen de ces paramètres. Autrement dit, on associe les données provenant des capteurs à des modèles mathématiques et stochastiques afin de prévoir la progression de la détérioration au fil du temps.

II.3.3.2 La maintenance corrective :

La norme AFNOR définit la maintenance corrective comme 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 a pour but de corriger un dysfonctionnement afin de rétablir le bon fonctionnement d'un système ou d'une machine. Elle est aussi appelée maintenance réactive puisqu'elle est mise en place après l'apparition de la défaillance. D'après le schéma de l'AFNOR, la MC se divise en deux catégories qui sont :

II.3.3.2.1 Maintenance palliative

Il s'agit d'une intervention temporaire permettant de remettre un système en état de fonctionnement partiel, dans l'attente d'une réparation définitive. Elle vise à assurer provisoirement certaines fonctions essentielles, mais doit être suivie d'une maintenance curative complète [12].

II.3.3.2.2 Maintenance curative

Ce type de maintenance permet de restaurer définitivement le système en état de fonctionnement et assure la fonctionnalité pour laquelle il a été réalisé. Une réparation pour une maintenance curative est une action pouvant être décidée soit après une maintenance palliative, où de manière immédiate en conséquence d'une défaillance (sans maintenance palliative).

II.3.4 Critères affectant la maintenance

II.3.4.1 Critère de coût

Détermination des coûts revient à faire un bilan entre les coûts liés à la maintenance préventive (MP) et ceux liés à la maintenance corrective (MC) en cas de défaillance. Les coûts de défaillance (MC) se divisent en deux catégories [9] :

II.3.4.1.1 Coûts directes de défaillance

Les coûts de maintenance directs correspondent aux dépenses directement liées à la maintenance, à l'exclusion des coûts liés à l'indisponibilité et aux défauts de fonctionnement des équipements.

- Le coût de main d'œuvre : ils représentent les salaires du personnel de maintenance ;
- Les dépenses générales liées au service : Les frais liés à la consommation d'énergie pendant les interventions de maintenance ;
- Les frais de stockage et d'entreposage : Ils rassemblent tous les frais associés à la gestion du stock de pièces de rechange du magasin.
- Les coûts de pièces de rechanges : Ils représentent les frais liés à l'achat de matériaux ainsi que des pièces de rechange utilisées lors des interventions de maintenance corrective.
- L'externalisation : Si l'entreprise décide de faire appel à un prestataire pour effectuer des tâches de maintenance spécifiques, cela implique que certains services seront sous-traités à un fournisseur externe.

II.3.4.1.2 Coûts indirectes de défaillance

Les coûts indirects comprennent toutes les répercussions économiques induites par un arrêt spécifique d'une machine de production...

- Pertes de production : représentent les pertes dues à l'arrêt de production ;

- Pertes de matières premières : correspondent à la quantité de matière consommée mais qui n'a pas été transformée en un produit échangeable ;
- Main d'œuvre de production non utilisée : représentent les salaires du personnel du service de production qui n'est pas en activité pendant l'arrêt ;
- Amortissements non réalisés : Il s'agit de la perte d'amortissement des équipements en panne.

II.3.4.2 Coûts du préventif

Ils sont identiques aux coûts directs de défaillance, la principale différence entre les deux réside dans le temps nécessaire pour l'intervention, que ce soit pour la prévention ou pour la correction.

II.4 Conclusion

La maintenance industrielle vise à assurer le bon fonctionnement des équipements dans une usine en adoptant des stratégies de maintenance préventive, prédictive ou curative. Les défaillances des équipements peuvent entraîner des arrêts de production coûteux, d'où l'importance d'un plan de maintenance efficace. La fiabilité des équipements mesure la probabilité qu'ils fonctionnent sans défaillance. Pour optimiser la productivité, il est essentiel d'identifier les sources potentielles de défaillance et de mettre en place des procédures de maintenance adaptées. Comprendre ces concepts est essentiel pour garantir le bon fonctionnement et optimiser la performance des équipements industriels.

CHAPITRE III : Politiques de la maintenance

III.1 Introduction

Dans les industries, les systèmes utilisés pour produire des biens ou fournir des services représentent une grande partie de leurs équipements. Avec le temps, ces systèmes s'usent et se détériorent (Valdez-Flores et Feldman, 1989). Comme beaucoup de ces systèmes peuvent être réparés, la maintenance devient essentielle pour éviter les pannes et améliorer leur fiabilité.

Aujourd'hui, la maintenance joue un rôle de plus en plus important. C'est pourquoi il est nécessaire de mettre en place des stratégies efficaces pour entretenir les systèmes, réduire les pannes et limiter les coûts.

Dans ce chapitre, nous présentons une classification des différents modèles de maintenance, afin d'aider les professionnels et les chercheurs à choisir les méthodes les plus adaptées à leur situation. Même s'il existe de nombreux modèles, ils sont souvent regroupés selon quelques grandes politiques de maintenance, comme le remplacement à un âge précis ou la maintenance en fonction d'un seuil de défaillance.

Le chapitre est divisé en deux parties : la première traite des politiques pour les systèmes composés d'une seule unité, et la seconde des politiques pour les systèmes plus complexes avec plusieurs unités. Les politiques pour systèmes unitaires sont mieux connues et servent souvent de base pour les systèmes multi-composants [4].

III.2 Définition de politique de maintenance

Les politiques de maintenance sont définies comme étant l'ensemble des stratégies et des objectifs technico-économiques établis par le service de maintenance d'une entreprise pour assurer la gestion efficace du matériel. Il impose à ce service de mettre en place les ressources nécessaires afin d'atteindre ces objectifs de manière optimale [12].

III.3 Définitions de remplacement

- **Remplacement correctif** : Le remplacement correctif est effectué après une panne. Il comprend le diagnostic, la réparation ou le remplacement des composants défectueux, puis la vérification. Il est non planifié, car il intervient lorsque la défaillance se produit.

- **Remplacement préventif planifié** : Le remplacement préventif est une intervention planifiée réalisée avant qu'une défaillance ne survienne, afin de maintenir un équipement dans un état fonctionnel. Il repose sur l'inspection, la détection et la prévention des défaillances naissantes [13].
- **Remplacement opportuniste** : Le remplacement opportuniste est effectué lorsqu'une opportunité se présente (comme une panne d'un composant). Il consiste à remplacer d'autres composants non défaillants, si cela permet de réduire les coûts globaux. C'est une stratégie économique fondée sur l'opportunité d'intervention commune.

III.4 politiques de maintenance des systèmes unitaires

Il existe plusieurs modèles de maintenance, regroupés en grandes catégories. Cette section se concentre sur les politiques appliquées aux systèmes unitaires, qu'il s'agisse de pièces (roulement, pignon...) ou de machines intégrées à un ensemble (pompe, turbine...). Ces politiques, résumées ci-dessous, partagent l'hypothèse d'un taux de défaillance croissant avec le temps. Parmi ces politiques, on retrouve notamment [5] :

III.4.1 Politique de maintenance selon l'âge

Dans le cadre cette politique le système est remplacé lorsqu'il atteint un âge T (MP), ou suite à une défaillance non prévu (MC). Dans ces deux cas, la maintenance est considérée comme parfaite car le système est remplacé par un neuf comme il est illustré dans la figure III-1.

Pour le critère de cout, on note $C(T)$ le coût moyen de maintenance par unité de temps. Le coût d'une maintenance corrective est C_c , et celui d'une maintenance préventive est C_p , avec $C_p \leq C_c$. Les durées d'intervention sont négligées. Le coût moyen s'exprime comme :

$$C(T) = \frac{C_c * F(T) + C_p * R(T)}{\int_0^T R(t) dt} \quad (III.1)$$

Où T est l'âge de remplacement préventif. L'âge optimal T^* minimise $C(T)$. Cette politique repose donc sur des maintenances préventives effectuées à des âges fixés.

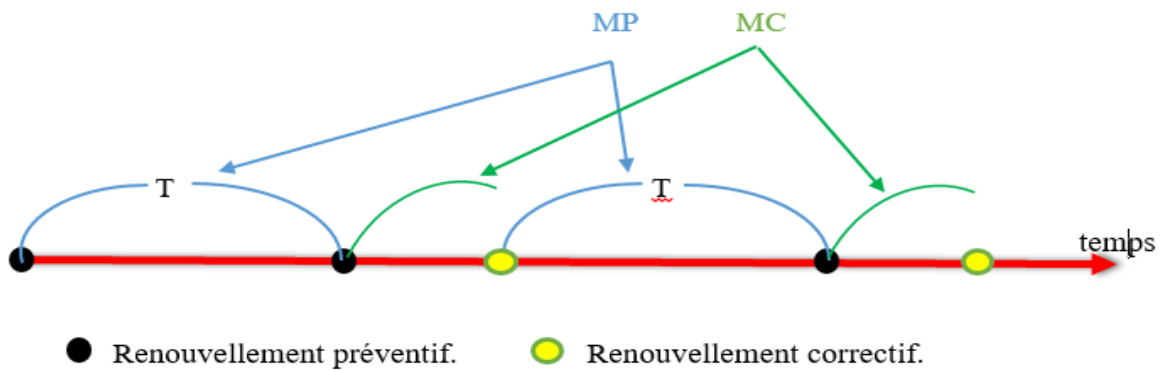


Figure III-1 : Schéma représente le principe de la politique de maintenance selon l'âge.

III.4.2 Politique de maintenance en bloc

Cette politique appelée aussi ‘politique de maintenance préventive périodique’, car elle consiste à renouveler le système périodiquement à des intervalles fixe kT (avec $k=1, 2, 3...$), indépendamment des défaillances survenues. Elle comprend trois model de base :

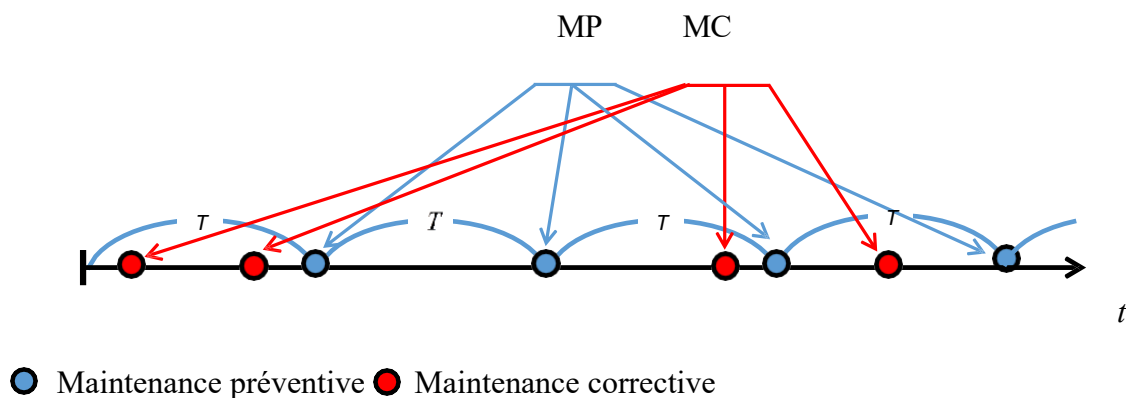


Figure III-2 : le principe la politique de maintenance en bloc

Model I

Dans cette politique, le système est renouvelé à intervalles fixes T , ou après une défaillance. Elle ressemble à la politique basée sur l'âge. Le paramètre T est à optimiser, et le coût moyen par unité de temps s'écrit :

$$C(T) = \frac{C_c \cdot E[N_d(T)] + C_p}{T} \quad (\text{III.2})$$

Où $E[N_d(T)]$ est l'espérance du nombre de défaillances sur l'intervalle $[0, T]$.

Model II

Dans le modèle I, le système est renouvelé immédiatement après la défaillance. Par contre ici la défaillance est détectée uniquement lors des moments de la MP. Le système reste défaillant jusqu'à la réparation lors de la MP suivante. La fonction du coût par unité de temps dans ce modèle s'écrit :

$$C(T) = \frac{C_c * F(t) + C_p}{T} . \quad (\text{III.3})$$

Model III

Ce modèle correspond à “ *une politique de maintenance préventive périodique avec réparation minimale* ”. Les défaillances sont détectées immédiatement et réparées, mais ces réparations n'améliorent pas l'état du système (MC minimale). Autrement dit, le système continue de se dégrader comme si la défaillance n'avait pas été corrigée. Le coût moyen par unité de temps prend en compte ce type est donner par :

$$C(T) = \frac{C_c * H(T) + C_p}{T} . \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$H(T) = \int_0^T \lambda(t) dt . \quad (\text{III.5})$$

$H(T)$: « le taux de hasard cumulé », $\lambda(t)$ est aussi appelé, dans ce modèle, taux d'occurrence de défaillance ("Rate of Occurrence Of Failure (ROCOF)" en anglais).

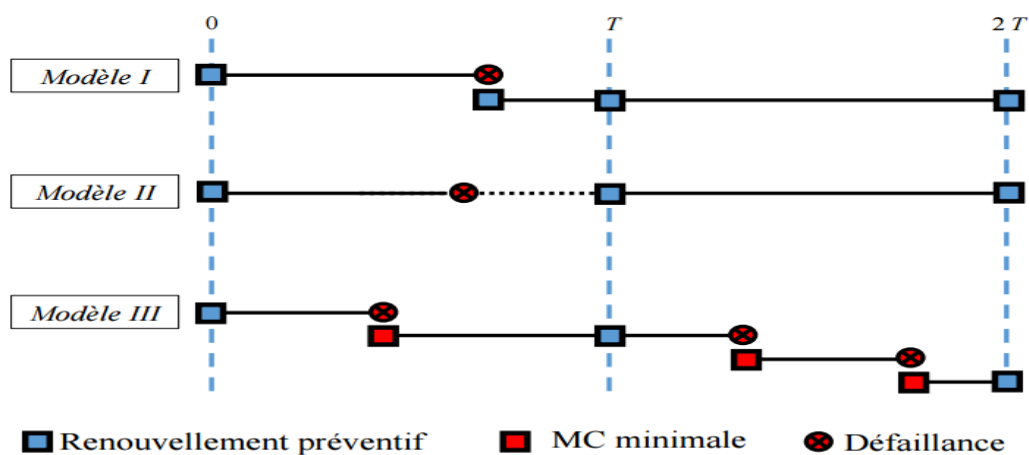


Figure III-3 : schéma représente les trois model de base de la politique de maintenance en bloc (politique MP périodique).

III.4.3 Politique de MP périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance

La politique de maintenance périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance est une approche plus réaliste pour les systèmes réparables. Elle implique des actions de maintenance qui ne sont pas parfaites, contrairement au modèle III de la politique en bloc, où le système est renouvelé à chaque période de temps T . Dans cette politique, les périodes T représentent les moments de maintenance imparfaite, et le système n'est renouvelé qu'après un certain temps KT de fonctionnement [5].

Les hypothèses de cette politique sont les suivants :

- Le système commence à fonctionner à l'instant $t = 0$ dans un état neuf.
- L'intensité de défaillance augmente avec le temps.
- Des actions de maintenance imparfaite se produisent à des moments spécifiques, et qu'une réparation minimale est faite après une défaillance.
- À l'instant $t = KT$, une action de maintenance remet le système à son état neuf.
- Les coûts respectifs pour la réparation minimale, la maintenance et le renouvellement sont désignés comme C_c , C_p et C_r .

La fonction du coût de maintenance par unité de temps est donnée par l'expression suivante :

$$C(K, T) = \frac{C_c H(K, T) + (K-1)C_p + C_r}{KT} \quad (\text{III.6})$$

III.5 Politiques de maintenances des systèmes multi-composants

Les politiques de maintenance des systèmes multi-composants se concentrent sur des stratégies optimales de maintenance qui sont appliqués à des systèmes complexe composés de plusieurs composants (interdépendants) qui dépendent les uns des autres. Lorsqu'il n'y a pas de dépendance économique ou structurelle et que les défaillances sont indépendantes, les politiques précédentes restent valables pour un système multi-composants. Chaque sous-système doit être considéré séparément. Mais souvent des dépendances existent. Ainsi, ce qui est optimal pour un sous-système n'est pas pareil pour l'ensemble du système [12].

III.5.1 Concept des dépendances entre le même système

Pour assurer le bon fonctionnement des systèmes à multiple composants, il est essentiel de considérer les interactions entre les éléments. Les dépendances économiques, stochastiques et structurelles sont importantes pour la modélisation et la planification de la maintenance [9].

- **Dépendances économiques**

La dépendance économique signifie l'impact des activités de maintenance effectuées sur plusieurs sous-systèmes en même temps revient moins coûteuses et ou nécessite moins de temps que pour chaque sous-systèmes individuellement, ce qui permet des économies.

- **Dépendances stochastiques**

Les défaillances dépendantes indiquent que les occurrences de pannes des sous-systèmes sont conditionnellement liées, ce qui signifie qu'il existe une corrélation entre ces pannes. En d'autres termes, la défaillance d'un composant peut avoir un impact sur les autres composants, entraînant une interdépendance des temps de défaillance.

- **Dépendances structurelles**

La dépendance structurelle désigne la manière dont l'architecture d'un système influe sur sa robustesse. Dans un système en série, la moindre défaillance d'un élément peut entraîner l'effondrement de l'ensemble du système, tandis que dans un système en parallèle, le système ne cesse de fonctionner que si tous les éléments sont défaillants simultanément.

III.5.2 Différents types de politique de maintenance des systèmes multi composants

Dans un système multi-composant, différentes politiques de maintenance peuvent être appliquées pour assurer son bon fonctionnement. Ces politiques varient selon le moment et la manière dont la maintenance est déclenchée : à intervalles fixes, selon l'état des composants, ou en fonction des opportunités.

La figure III-4, illustre les principaux types de politiques de maintenance pour les systèmes multi-composants.

III.5.2.1 Politiques de regroupements

Des modèles d'optimisation de maintenance visent à réduire les coûts associés à la maintenance dans des systèmes complexes. De nombreuses recherches se concentrent sur le développement de politiques de regroupement de la maintenance, qui peuvent être stationnaire, dynamiques. Le but de ces politiques est d'optimiser le regroupement des actions de maintenance afin de maximiser les avantages économiques et de réduire les inconvénients, permettant ainsi une meilleure efficacité en termes de coûts et de délais.

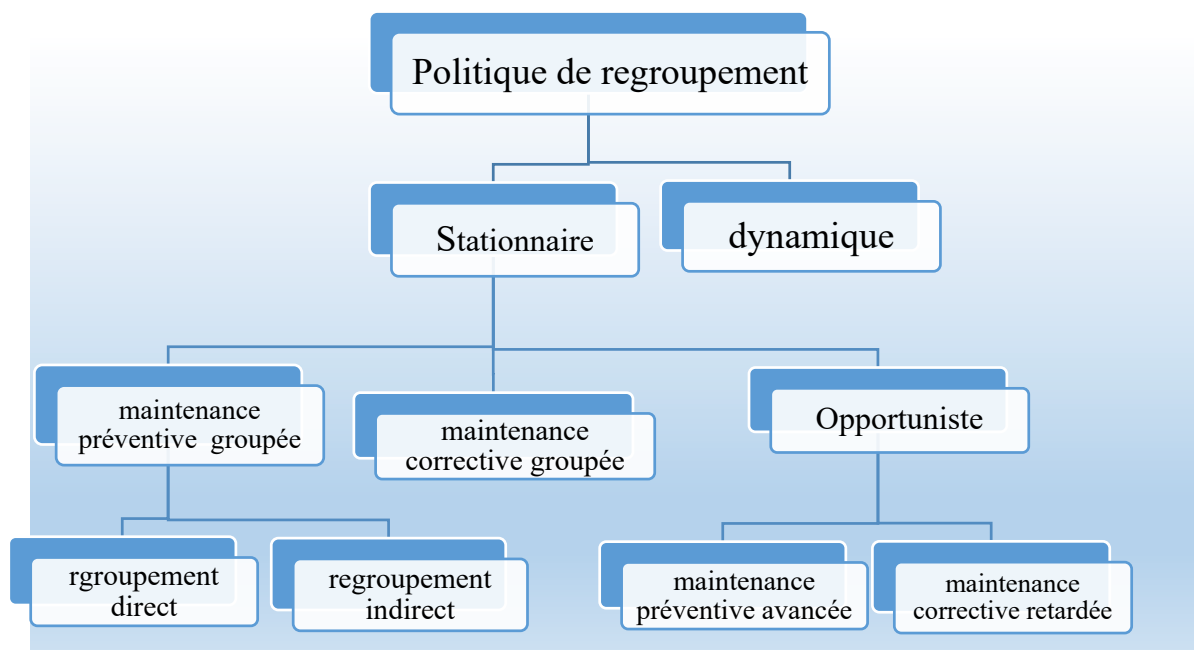


Figure III-4 : les principaux types de politiques de maintenance pour les systèmes multi-composants. [13].

III.5.2.1.1 Regroupement stationnaire

Le regroupement stationnaire consiste à regrouper différentes actions de maintenance sur une période illimitée sans tenir compte de l'état actuel du système. Il existe trois types de regroupement stationnaire en fonction de la nature des actions de maintenance, Qui sont les suivantes [13] :

- Maintenance corrective groupée.
- Maintenance préventive groupée.
- Maintenance opportuniste.

➤ **Regroupement de la maintenance corrective**

Dans les systèmes comprenant plusieurs composants, il est possible de regrouper les actions de maintenance corrective, en particulier dans les systèmes redondants où certains composants peuvent être laissés en panne sans arrêter le fonctionnement du système. Certains chercheurs suggèrent de réparer ces composants défectueux à des dates spécifiques. Dans un système parallèle de n composants, il est nécessaire d'effectuer un entretien régulier à chaque période T en réparant tous les composants défectueux à ce moment-là. La valeur de T est choisie de façon à minimiser le coût moyen par unité de temps, en équilibrant les économies réalisées sur les coûts de maintenance et les pertes de production dues aux pannes.

➤ **Regroupement de la maintenance préventive**

Les politiques de maintenance préventive pour les systèmes mono-composants restent généralement une base pour les politiques de regroupement. Lorsque les ressources sont disponibles pendant les périodes de maintenance, le regroupement devient important. Les stratégies populaires incluent le remplacement par bloc et basé sur l'âge, avec pour objectif de trouver une planification de maintenance pour un groupe de composants afin de minimiser des coûts de maintenance. Les stratégies de regroupement se divisent en deux catégories : le regroupement direct, où les composants sont regroupés physiquement, et le regroupement indirect, où les composants sont regroupés par des critères spécifiques.

• **Regroupement direct**

Selon cette politique, tous les composants du système sont répartis dans chaque sous-groupe et sont toujours conjointement maintenus avec une périodicité, ce regroupement direct implique une planification basée sur des variables de décision. Cette approche commence par la définition d'un vecteur de structure $S = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ qui détermine le groupe auquel chaque composant i sera assigné, ainsi qu'un vecteur de planification pour chaque groupe ($T_s = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$). L'optimisation de cette démarche s'avère complexe car elle nécessite la détermination à la fois de la structure de regroupement optimale et des cycles de maintenance préventive pour chaque groupe. Les auteurs soulignent que le cycle optimal pour un groupe n_k est défini par $T_{n_k} = \min_{i \in n_k} t_i$. Afin de parvenir à la meilleure structure de regroupement, en utilisant la programmation dynamique.

- **Le regroupement indirect**

Le regroupement indirect se focalisait sur l'optimisation de sous-groupes prédéterminés, examiner l'optimisation du groupe lui-même, ce qui ajoute de la complexité en raison de sa nature combinatoire. Ce modèle implique $n+1$ paramètres : une variable continue τ et un entier k pour chaque composant. Il permet un remplacement préventif à des intervalles de maintenance réguliers basés sur T (déterminé par k et τ). Appelé groupement indirect standard (SIG), ce modèle a d'abord été utilisé en théorie des stocks, puis appliqué à la maintenance par Goyal et Kusy, et ensuite développé par Goyal et Gunasekaran. Le coût total par unité de temps est déterminé par une équation spécifique :

$$C_{sig}(\tau) = \frac{C_0}{\tau} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i^p + M_i(k_i \tau)}{k_i \tau}. \quad (III.7)$$

L'objectif est de trouver les valeurs optimales pour τ et les k qui minimisent la fonction de coût, le problème de programmation en nombres entiers mixtes est compliqué par la nature des coûts de défaillance. Cependant, un algorithme itératif pour un modèle polynomial pour tous composants a été mis au point par Goyal et Gunasekaran cet algorithme ne prend pas en compte les périodes creuses où aucune maintenance n'est effectuée, entraînant ainsi des solutions sous-optimales. Ces périodes creuses peuvent survenir lorsque certaines valeurs de k excèdent 1, entraînant des intervalles de maintenance manqués. Un autre modèle connexe est le problème de révision conjointe (JOP), dans lequel tous les composants subissent des révisions majeures à intervalles réguliers, ainsi que des révisions mineures à différents moments (τ/k) [9].

$$C_{jop}(\tau) = \frac{C_0 + \sum_{i=1}^n (k_i - 1) C_i^p + k_i M_i(\tau/k_i)}{\tau}. \quad (III.8)$$

➤ **Politique de maintenance opportuniste**

Dans la planification, le regroupement opportuniste combine les activités la maintenance préventive et celle du corrective. Lorsqu'un appareil tombe en panne, cela permet de réaliser la maintenance prévue (programmée) sur d'autres appareils en même temps. L'objectif est de trouver un bon équilibre entre les coûts des travaux de maintenance prévus(préventive) et les avantages de les regrouper avec des travaux non prévus(corrective). On distingue deux formes de regroupement opportuniste : la maintenance préventive avancée et la maintenance corrective retardée.

- **Maintenance préventive avancée**

Les stratégies de maintenance préventive opportuniste avancée sont particulièrement adaptées aux systèmes en série, où la défaillance d'un seul composant entraîne l'arrêt complet du système. Cet arrêt constitue alors une opportunité pour effectuer des maintenances préventives sur d'autres éléments.

Dans un contexte industriel plus complexe, des approches récentes ont émergé, intégrant des politiques de maintenance opportunistes pour optimiser la gestion des systèmes multi-composants. Certains chercheurs ont développé une méthodologie basée sur la simulation de Monte Carlo pour déterminer les meilleures stratégies d'intervention. Par la suite, leur modèle a été enrichi en prenant en compte les durées de remplacement, un facteur crucial dans la planification réelle des maintenances.

- **Maintenance corrective retardée**

Une maintenance corrective retardée consiste à combiner des actions de maintenance préventive et corrective en reportant les réparations. Lorsqu'un composant est défaillant, il est laissé à son état jusqu'à qu'il soit réparé au prochain contrôle programmé ou à la panne d'un autre. Cette stratégie est souvent utilisée dans des systèmes redondants/parallèles où une panne n'arrête pas l'ensemble du système. Des chercheurs ont proposé une politique de maintenance corrective retardée concerne la maintenance des systèmes de structure k sur n . Les auteurs proposent une stratégie de remplacement préventif qui s'appuie sur un seuil de composants défaillants m sur un cycle de maintenance T . Si le nombre de défaillants est inférieur à m , le système est remplacé à la période de maintenance préventive kT . Sinon, tous les composants sont remplacés immédiatement.

III.5.2.1.2 Politique de maintenance dynamique

La politique de regroupement dynamique est une approche flexible qui consiste à ajuster la maintenance en fonction de l'état réel des composants et des opportunités. Contrairement à un planning fixe (stationnaire), elle repose sur des données actualisées en temps réel, comme le niveau d'usure ou les signes de défaillance. Lorsqu'un composant atteint un seuil critique, une intervention est prévue, c'est l'occasion d'envisager la maintenance d'autres pièces, si cela permet de réduire les coûts et d'éviter plusieurs arrêts.

Cette stratégie permet de réduire les coûts, de limiter les arrêts de production et d'optimiser la disponibilité du système. Des fenêtres de temps appelées "opportunités de maintenance" sont identifiées, durant lesquelles il est possible d'effectuer plusieurs opérations sans perturber le fonctionnement global. Des méthodes comme les algorithmes ou les outils de suivi d'usure aident à décider du meilleur moment pour agir [12].

III.6 Conclusion

En conclusion, pour assurer la maintenance des systèmes industriels, il est essentiel de tenir compte de leur complexité architecturale et fonctionnelle. Pour les systèmes élémentaires, des approches telles que le remplacement périodique ou la réparation corrective peuvent être suffisantes et rentables. En revanche, pour les systèmes multi-composants, sont caractérisés par leurs interdépendances et leurs modes de défaillance, il est nécessaire d'opter pour des stratégies plus élaborées, comme les politiques de regroupement (stationnaire ou dynamique) afin d'optimiser les performances, réduire les coûts et améliorer la disponibilité du système. Il est donc important de procéder à une analyse approfondie des contraintes techniques, économiques et opérationnelles pour choisir la meilleure politique de maintenance qui garantira un équilibre optimal entre performance, sécurité et rentabilité.

CHAPITRE IV : Optimisation de la maintenance du système de raffinage d'huile de complexe CEVITAL

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une application d'une politique de maintenance optimisée dans un environnement industriel réel. L'étude concerne la ligne de production C du complexe agroalimentaire CEVITAL, spécialisée dans le raffinage de l'huile végétale. Ce type de système fonctionne en continu et repose fortement sur la fiabilité des équipements pour garantir la qualité du produit fini et maîtriser les coûts.

Pour répondre aux contraintes de disponibilité et aux exigences de performance, une stratégie de maintenance classique (corrective ou préventive simple) n'est pas suffisante. C'est pourquoi nous proposons une politique de maintenance opportuniste stationnaire, associée à une maintenance préventive avancée et à un remplacement en bloc, selon le modèle III étudié dans les chapitres précédents.

Cette méthode permet de profiter des arrêts planifiés pour remplacer ou entretenir d'autres équipements proches de la fin de leur durée de vie, dans un objectif de réduction globale des coûts. L'objectif est de diminuer le coût moyen de maintenance sur le long terme tout en assurant une bonne continuité de fonctionnement pour les équipements critiques.

IV.2 Description du système a étudié

Notre étude considère un système de 11 composants disposés en série, comme nous avons mentionné au chapitre I exactement dans la figure I.5. Chaque composant fonctionne de manière autonome, le bon fonctionnement de l'ensemble est indispensable pour garantir l'opérabilité du système. La durée de vie de chaque composant est modélisée à l'aide d'une loi statistique, notamment la loi de Weibull, fréquemment utilisée en fiabilité. La stratégie de maintenance adoptée a pour objectif d'anticiper les défaillances, de minimiser les arrêts imprévus et d'assurer une disponibilité optimale du système tout en réduisant les coûts.

IV.2.2 Estimation des paramètres Weibull

L'analyse statistique menée nous a permis d'estimer les paramètres de la loi de Weibull pour chacun des 11 composants critiques identifiés dans la ligne C de la raffinerie d'huile du complexe CEVITAL. Les données utilisées proviennent des historiques de maintenance, traitées à l'aide de la méthode du Maximum de Vraisemblance (MLE) dans MATLAB.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de deux vecteurs contenant respectivement :

- Les paramètres d'échelle (η) exprimant la durée caractéristique des composants ;
- Les paramètres de forme (β) décrivant l'évolution du taux de défaillance dans le temps.

Tableau IV-1 : Résultats d'estimation des paramètres de weibull.

Composant i	Paramètre échelle η	Paramètre forme β
1	58.163	1.45
2	69.13	2.28
3	158.59	1.51
4	141.95	1.68
5	124.86	2.25
6	546.74	2.8
7	68.22	1.21
8	486.24	1.58
9	125.52	1.26
10	99.24	1.54
11	447.47	2.92

Avec : $R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right).$

IV.3 Politique de maintenance proposé

Dans le chapitre III, nous avons présenté deux types de politiques de maintenance : stationnaires (avec règles fixes) et dynamiques (adaptées aux changements). L'approche utilisée ici est opportuniste semi-dynamique, combinant les deux. Elle repose sur le remplacement en bloc, en tenant compte des coûts et de la fiabilité mise à jour à chaque cycle de maintenance.

Lorsqu'un composant atteint soit son moment optimal de maintenance préventive (T), ou son temps de défaillance (td), une intervention est déclenchée. A ce moment-là, le système évalue si d'autres composants peuvent être remplacés de manière anticipée (maintenance préventive avancée), à condition que cela réduise le coût global.

Ainsi, bien que les règles économiques de décision restent stables (comme dans une politique stationnaire), mais leur exécution est dynamique, car elle s'adapte en temps réel grâce à l'actualisation continue des données sur les composants. Ce modèle s'avère particulièrement adapter aux environnements industriels complexes, comme les systèmes de raffinage, où les interventions sont coûteuses et la coordination de la maintenance est essentielle.

IV.3.1 Structure de coût adoptée pour l'évaluation de la maintenance

La structure du coût de maintenance est élaborée de manière à distinguer clairement les composantes fixes et variables, selon le type d'intervention effectuée. Le coût total d'une action de maintenance se décompose en deux parties principales :

Le cout commun généralement appelée 'set-up-cost' noté C0, qui est considéré comme constante, il revient à l'outillage et la perte de production, le démontage et remontage, les dispositions de sécurité, la mobilisation de l'équipe de maintenance...etc.

La seconde partie est le cout du correctif et de préventive (Cp & Cc) qui sont considéré comme des variables, car ça revient aux caractéristiques spécifiques des composants à remplacer, tels que le coût de la pièce de rechange, la main d'œuvre et aussi la perte de production durant la période du remplacement du composant défaillant [9].

Donc pour une maintenance préventive programmée pour un composant i, le coût de maintenance du système est donné par :

$$C_{sys}^p = C_0^p + \sum_i^n C_i^p. \quad (IV.1)$$

Et pour une maintenance corrective programmée pour un composant défaillant j avec des opportunités de remplacement préventive, le coût de maintenance du système donné comme suit :

$$C_{sys}^c = C_0^c + C_j^c + \sum_{i \neq j}^n C_i^p. \quad (IV.2)$$

IV.3.1.1 Estimation des coûts unitaires de maintenance

Afin d'évaluer de manière réaliste les coûts associés à chaque intervention de maintenance, nous avons procédé à une estimation des coûts unitaires pour les 11 composants critiques identifiés dans la ligne C.

Ces coûts sont présentés dans le tableau VI-2 avec un coût commun qui est fixe pour chaque intervention donnée par $C_0 = 15000$ Da.

Tableau IV-2 : Présentation des Coûts unitaires des composants du système proposé.

Composants i	Coût préventive C_p	Coût corrective C_c
1	44341.07	17736.43
2	1002461.68	400984.67
3	32612.34	13044.94
4	2104138.21	841655.28
5	994918.67	397967.47
6	421923.28	168769.31
7	39700.39	15880.16
8	305021.83	122008.73
9	98342.32	39336.93
10	71748.37	28699.35
11	21890.33	8756.13

IV.3.2 Règle de décision pour la maintenance opportuniste

Lorsqu'une opportunité d'intervention se présente, que ce soit à la suite d'une défaillance ou à l'occasion d'une maintenance préventive programmée, il est essentiel de disposer d'un critère décisionnel permettant d'identifier les composants non défaillants susceptibles d'être remplacés de manière anticipée. Dans ce cadre, nous avons introduit une règle d'opportunité fondée sur l'analyse de la dégradation des composants. Cette règle repose sur une évaluation du rapport coût/bénéfice de chaque remplacement préventif, en comparant le coût anticipé de l'intervention au risque et au coût potentiel d'une défaillance future.

La logique associée à cette règle peut être schématisée afin de visualiser les différentes configurations possibles et les coûts correspondants, comme illustré dans la figure IV-2 suivante [9] :

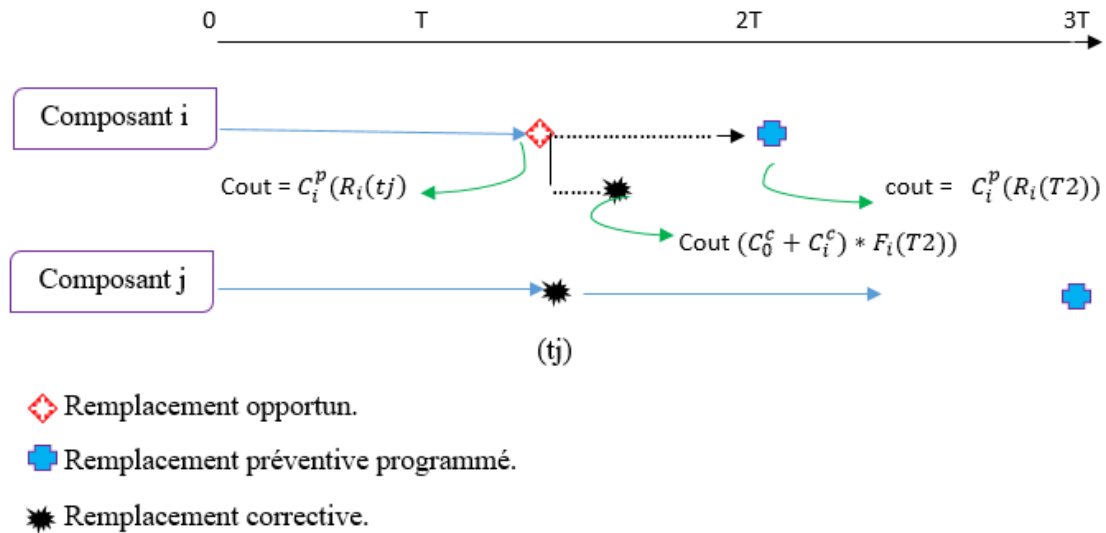


Figure IV-1 : présentation d'une logique décisionnelle.

La décision de remplacement opportuniste repose sur une comparaison entre le coût prévisionnel d'un remplacement anticipé et le coût attendu d'un remplacement correctif futur. Si le premier est inférieur au second, le remplacement préventif est exécuté. Dans le cas contraire, le composant est maintenu en fonctionnement jusqu'à sa prochaine date de maintenance planifiée.

Si : $C_i^p(R_i(tj) - R_i(T2)) < (C_0^c + C_i^c) * F_i(T2)$ = Remplacement opportun du composant i à l'instant tj

Sinon on le laisser jusqu'au prochain remplacement programmé.

IV.3.3 Algorithme de résolution

Afin de simuler la politique, un algorithme a été développé avec MATLAB. Celui-ci permet de suivre l'évolution des défaillances, des échéances de maintenance préventive, et de déclencher des remplacements selon des règles économiques et de fiabilité. L'organigramme ci-dessous (Figure VI-3) illustre les différentes étapes de traitement.

Description de l'algorithme (voir Figure IV-3) :

➤ **Phase préparatoire :**

- Le système est d'abord défini et structuré (nombre de composants, architecture...).

- Les données historiques nécessaires sont collectées : temps entre pannes (TBF), temps de correction (TCD), C_p , C_c , C_0 .
- Estimation des paramètres de Weibull (β , η) pour chaque composant à l'aide de la méthode du Maximum de Vraisemblance (MLE).

➤ **Détermination des temps caractéristiques :**

- Les temps de défaillance (t_d) simulés sont générés selon la fonction de probabilité de défaillance :

$$F(t_d) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t_d}{\eta}\right)^\beta\right).$$

- Les échéances de maintenance préventive planifiées (T) sont obtenues par l'optimisation de la fonction de coût :

$$C(T) = \frac{C_c * H(T) + C_p}{T}.$$

$H(T)$ est le taux d'occurrence de défaillance.

➤ **Choix de la maintenance à effectuer :**

- À chaque cycle, on compare les temps simulés de défaillance min (t_d) aux échéances min(T).
- Si min (t_d) < min (T) une maintenance corrective est déclenchée.
- Sinon, une maintenance préventive planifiée est effectuée sur le composant concerné.

➤ **Application d'une règle d'opportunité :**

- Une analyse est lancée sur les autres composants pour identifier les composants à un remplacement opportuniste.
- La décision repose sur la comparaison entre :

🚦 **Le gain estimé du remplacement préventif opportun :**

$$C_i^p (R_i(t_j) - R_i(T_2)).$$

🚦 **Le coût de remplacement correctif :**

$$(C_0^c + C_i^c) * F_i(T_2).$$

- Si le gain est inférieur au coût de correctif, le composant est remplacé préventivement.

➤ **Mise à jour des paramètres :**

- Les temps de défaillance et les échéances sont actualisés après chaque intervention.
- Le coût de maintenance du cycle est cumulé.

➤ **Répétition du processus et synthèse statistique :**

- L'algorithme se répète jusqu'à ce que l'horizon de simulation (50 ans) soit atteint.
- Afin de bien comprendre le comportement du système, nous allons simuler tout le processus 100 fois. Chaque simulation est unique et indépendante. Une fois toutes ces simulations terminées, nous ferons la synthèse en calculant des indicateurs clés : les statistiques de coût total, de remplacements effectués, et le gain total généré par l'opportunisme sont affichés.

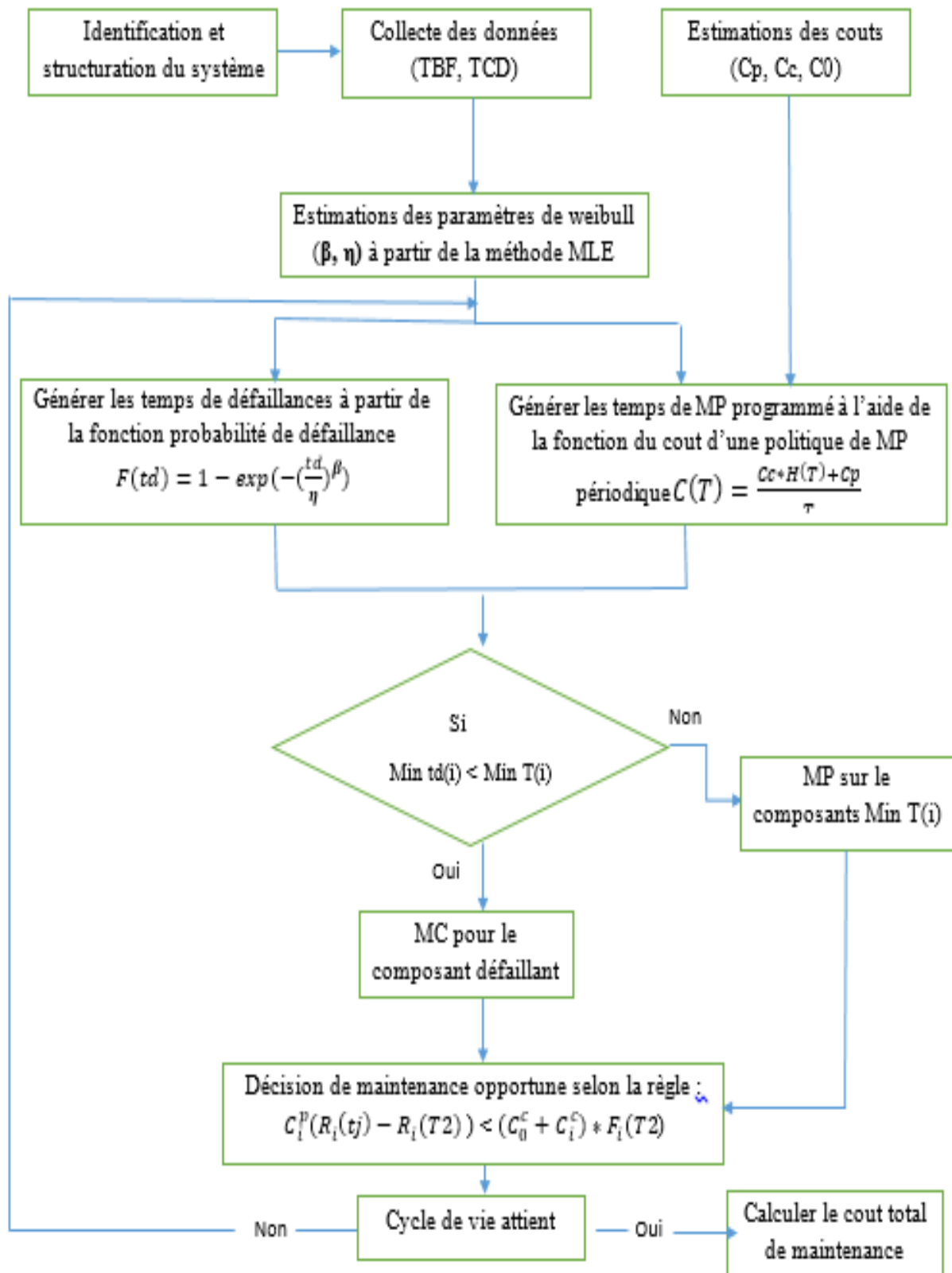


Figure IV-2 : Organigramme représente les étapes principales de la simulation.

IV.3.4 Résultats de simulation de la politique opportuniste

IV.3.4.1 Extrait de quelques cycles de simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats détaillés des trois premiers cycles de simulation de la politique de maintenance proposé, appliquée au système de raffinage du complexe CEVITAL.

Premier cycle – Maintenance corrective

Ce cycle est déclenché par une défaillance du composant 3, détectée à 41,17 jours. Une maintenance corrective est alors réalisée, avec un coût de :

- Coût de remplacement : $C_c = 28\,044,94$ Da.
- Coût fixe d'intervention : $C_0 = 15\,000$ Da.

Durant cette intervention, trois composants (1, 7, 11) ont été sélectionnés pour une maintenance préventive opportuniste, car leur maintenance anticipée offrait un gain économique supérieur au coût d'opportunité.

- Coût total de la maintenance opportuniste : $C_{to} = 105\,931,46$ Da.
- Coût total du cycle : $C_{tc} = 148\,976,40$ Da.
- Économie estimée grâce à l'opportunisme : $C_e = 47\,565,02$ Da.

Deuxième cycle – Maintenance corrective

Ce cycle est déclenché par une défaillance du composant 9, survenue à 81,57 jours.

- Coût de remplacement : $C_c = 54\,336,93$ Da.
- Coût fixe d'intervention : $C_0 = 15\,000$ Da.

Suite à l'évaluation économique, cinq composants (1, 3, 7, 10, 11) ont été jugés avantageux pour une maintenance préventive opportuniste.

- Coût total de la maintenance opportuniste : $C_{to} = 210\,292,50$ Da.
- Coût total du cycle : $C_{tc} = 279\,629,43$ Da.
- Économie estimée réalisée : $C_e = 136\,167,31$ Da.

Troisième cycle – Maintenance corrective

Une maintenance corrective est effectuée sur le composant 2, à l'instant 125,35 jours.

- Coût de remplacement : $C_c = 415\,984,67$ Da.
- Coût fixe : $C_0 = 15\,000$ Da.

Au total, sept composants (1, 3, 5, 7, 9, 10, 11) ont été sélectionnés pour bénéficier d'une maintenance opportuniste.

- Coût total de la maintenance opportuniste : $C_{to} = 1\,303\,553,16$ Da.
- Coût total du cycle : $C_{tc} = 1\,734\,537,83$ Da.
- Économie estimée réalisée : $C_e = 599\,557,24$ Da.

Ces premiers résultats démontrent que la politique de maintenance opportuniste permet de regrouper plusieurs opérations de maintenance lors d'un seul arrêt, ce qui optimise significativement les coûts à long terme tout en assurant une meilleure fiabilité du système.

IV.3.4.2 Résultats statistiques globaux de la politique optimisée

Afin de valider la robustesse de la stratégie adoptée, l'algorithme de résolution a été exécuté sur un ensemble de 100 simulations, représentant des scénarios réalistes de fonctionnement du système de raffinage au sein du complexe CEVITAL.

Les résultats statistiques moyens sont les suivants :

- Nombre moyen de cycles exécutés : 27 cycles, correspondant à une durée totale simulée moyenne de 19 286 jours, soit environ 52,84 années. Cela reflète la stabilité temporelle de la politique appliquée.
- Coût total moyen de maintenance : 117 833 242,14 DZD, intégrant l'ensemble des maintenances correctives, préventives planifiées et opportunistes.
- Coût moyenne annuelle : 2 356 664,84 DZD.
- Économie moyenne générée par l'opportunisme : 48 380 243,44 DZD, qui présentent une réduction de 29.1 % par rapport à la maintenance sans opportuniste.

En définitive, la stratégie mise en œuvre s'impose comme une solution fiable et économiquement avantageuse pour la gestion de la maintenance des équipements critiques en environnement industriel.

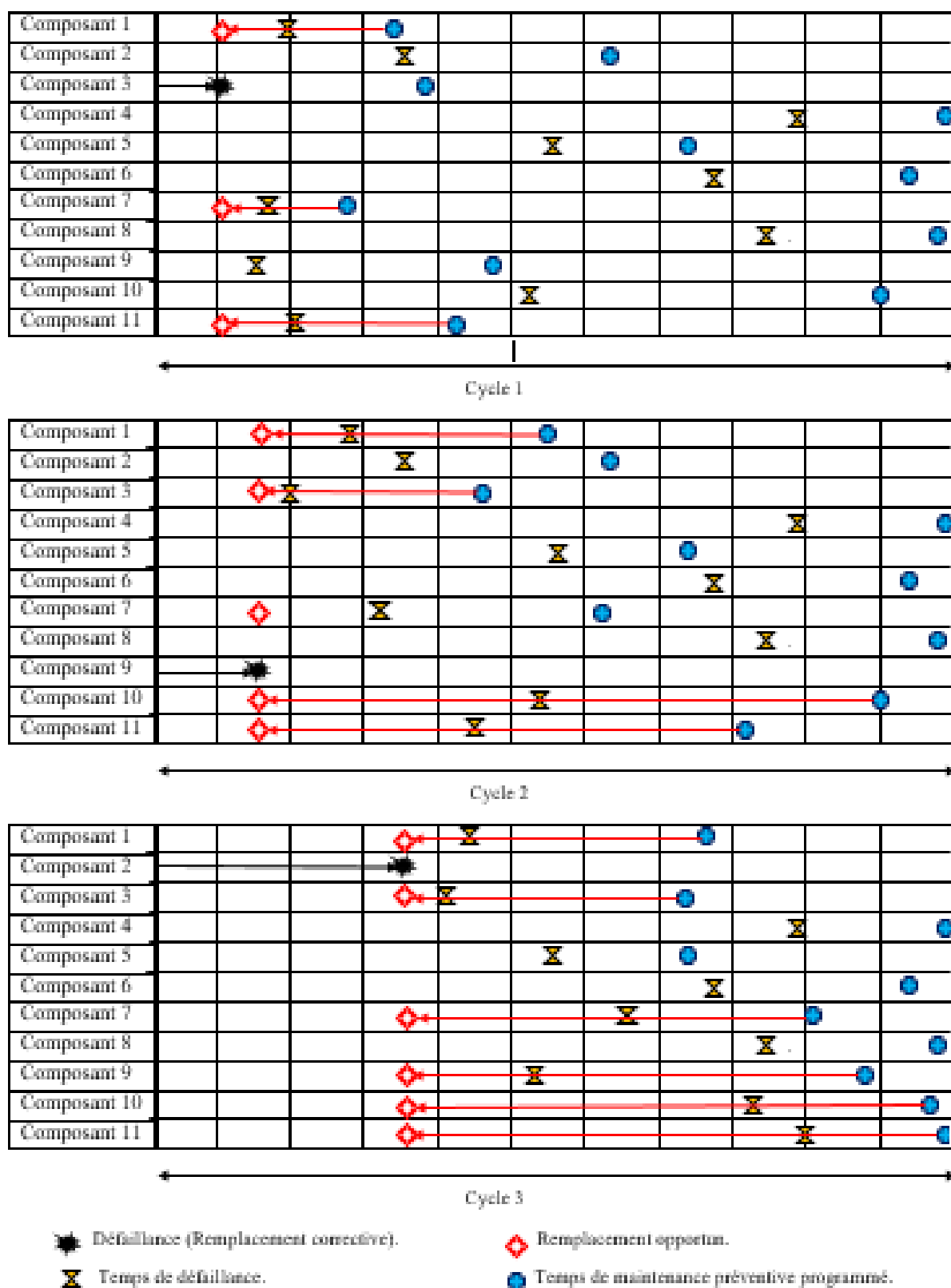


Figure IV-3 : Exemple de simulation de la maintenance corrective/préventive/opportun des trois premiers cycles.

IV.3.4.3 Synthèse des résultats

Les simulations confirment l'efficacité de la politique proposée, en s'appuyant sur l'estimation de la fiabilité restante des équipements et sur une analyse économique à chaque cycle. Cette approche permet d'optimiser les coûts de maintenance tout en limitant les interruptions non planifiées

Les résultats montrent une moyenne de 27 cycles sur 50 ans, avec un coût cumulé maîtrisé et une économie moyenne de plus de 48 milliards DZD générée par l'exploitation des opportunités. Cette approche assure une meilleure disponibilité du système et prolonge la durée de vie des équipements, tout en maintenant une cohérence économique dans les choix de maintenance.

VI.4 Conclusion

En conclusion, la mise en œuvre de la politique de maintenance opportuniste (modèle III), appliquée sur la ligne C du complexe CEVITAL, à travers une modélisation sous logiciel MATLAB basée sur la fiabilité et les coûts réels. Cette approche a permis de minimiser les coûts et optimiser les interventions en réduisant les arrêts imprévus sur le long terme.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons conduit une analyse détaillée de la problématique de la maintenance industrielle, en mettant particulièrement l'accent sur les systèmes en série, connus pour leur forte sensibilité aux défaillances individuelles. L'étude a porté sur le complexe industriel CEVITAL, avec un focus spécifique sur la ligne C de la raffinerie d'huile, afin d'identifier les principaux enjeux liés à la fiabilité et à la disponibilité des équipements dans un contexte de production en flux continu.

Après avoir présenté les concepts fondamentaux de la fiabilité et les diverses politiques de maintenance, notre démarche s'est orientée vers l'application d'une stratégie de maintenance opportuniste, combinée à un remplacement en bloc (modèle III). Cette politique, adaptée aux spécificités du site étudié, a été formalisée et simulée dans l'environnement MATLAB, en s'appuyant sur les données de retour d'expérience et les paramètres de la loi de Weibull, ainsi que sur une modélisation des coûts associés aux différents types d'interventions.

Les simulations menées ont mis en évidence l'intérêt de cette approche, avec une réduction significative des coûts moyens de maintenance et une meilleure anticipation des arrêts imprévus. La comparaison avec une politique classique (corrective et préventive planifiée) a révélé les avantages économiques d'une intervention coordonnée lors d'opportunités identifiées.

Enfin, cette étude propose un cadre méthodologique pertinent pour la prise de décision en maintenance industrielle, combinant modélisation fiabiliste et critères économiques. Elle constitue une base exploitable pour améliorer la gestion des actifs industriels, tant sur le plan de la disponibilité que de l'optimisation des ressources.

Bibliographie

- [1] ELKARKOUR. *Stratégies de maintenance industrielle : Guide complet*. (N.d.).
- [2] CEVITAL. *Document interne*. (S.d.).
- [3] NORME, N. F. *EN 13306 : Terminologie de la maintenance*. Paris: AFNOR, (2001).
- [4] WANG, H et PHAM, H. *Reliability and optimal maintenance*. London : Springer-Verlag, (2006).
- [5] AIT MOKHTAR, E. *Modèle de maintenance*. In Cours, Master 2 Maintenance Industrielle. Béjaïa : Université de Béjaïa, (2020).
- [6] BELLAOUAR, A. et BELEULMI, S. *Fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité (FMD)*. Constantine : Université Constantine 1, Faculté des Sciences de la Technologie, Département de Génie des Transports, (2013).
- [7] LAGGOUNE, R. *Fiabilité des systèmes*. In Cours, Master 1 Maintenance Industrielle. Béjaïa : Université de Béjaïa, (2020).
- [8] AMRANI, M, BOUSSENOUNE, I et BENMIMOUN, A. *Modélisation de l'efficacité de la maintenance des systèmes multi-composants*. Mémoire de fin d'étude. Béjaïa : Université Abderrahmane Mira - Béjaïa, (2020).
- [9] LAGGOUNE, R. *Optimisation de la maintenance par la fiabilité opérationnelle des systèmes mécaniques multi-composants : applications industrielles*. Thèse de Doctorat, Université A. MIRA Béjaïa, (2009).
- [10] AIT MOKHTAR, E. *Fiabilité industrielle*. In Cours, Master 2 Maintenance Industrielle. Béjaïa : Université de Béjaïa.
- [11] LAGGOUNE, R. *Notions fondamentales sur la maintenance*. In Module Organisation et Gestion de la Maintenance. Béjaïa : Université A. MIRA Béjaïa, (2021).
- [12] DAHIA, Z. *Optimisation des maintenances préventives des systèmes technologiques en tenant compte de leurs niveaux de performances et de leurs dégradations*. Thèse de Doctorat, Université Frères Mentouri Constantine 1, (2022).

[13] VU, H. *Stratégies de regroupement pour la maintenance des systèmes à composants multiples avec structure complexe*. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, (2014).

[14] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Survival analysis. *In* Wikipedia, The Free Encyclopaedia. En ligne : https://en.wikipedia.org/wiki/Survival_analysis (consulté en juin 2025).

Résume

Ce projet de fin d'études porte sur l'optimisation de la maintenance des systèmes configurés en série, appliquée à la ligne C de la raffinerie d'huile du complexe CEVITAL. L'objectif principal est de proposer une politique de maintenance adaptée qui réduit les coûts, limite les arrêts non planifiés et améliore la fiabilité des équipements. Après une présentation du complexe industriel, une étude approfondie des concepts de fiabilité et des politiques de maintenance est réalisée. Une attention particulière est portée aux systèmes multi-composants avec dépendances structurelles, économiques et stochastiques. Le cœur du travail consiste à appliquer une politique de maintenance opportuniste stationnaire avec remplacement en bloc, dont la performance est évaluée par simulation sous MATLAB, en utilisant des paramètres Weibull estimés. Les résultats montrent une réduction significative du coût global de maintenance et une amélioration de la disponibilité du système.

الملخص (Arabe)

يتناول هذا المشروع النهائي موضوع تحسين صيانة الأنظمة المرتبة على التوالي، مع تطبيق على الخط C من مصفاة الزيوت التابعة لمركب سيفيتال CEVITAL. يتمثل الهدف الأساسي في اقتراح سياسة صيانة مناسبة تُمكن من تقليل التكاليف، والحد من التوقفات غير المخططة، وتحسين موثوقية المعدات. بعد تقديم المركب الصناعي، تم التطرق إلى مفاهيم الموثوقية وسياسات الصيانة بمختلف أنواعها، مع التركيز على الأنظمة متعددة المكونات التي تحتوي على تبعيات هيكلية واقتصادية وعشوائية. تم اعتماد سياسة صيانة فرصية ثابتة مع الاستبدال الجماعي، وقد تم تقييم أدائها من خلال محاكاة باستعمال برنامج MATLAB اعتماداً على توزيع ويبل. أظهرت النتائج المحصلة انخفاضاً ملموساً في التكاليف وتحسناً في جاهزية النظام.

Abstract (English)

This final project focuses on the optimization of maintenance for series-configured systems, applied to production line C of the oil refinery in the CEVITAL industrial complex. The main goal is to propose a tailored maintenance policy that reduces costs, minimizes unplanned downtime, and improves equipment reliability. After introducing the industrial site, key concepts of reliability and maintenance strategies are discussed. Special attention is given to multi-component systems with structural, economic, and stochastic dependencies. The proposed approach is based on a stationary opportunistic maintenance policy with block replacement, and its performance is assessed through MATLAB simulations using estimated Weibull parameters. The results demonstrate a significant reduction in total maintenance cost and an improvement in system availability.