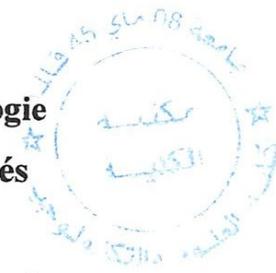


M1540-848

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés



Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
2^{ème} Année Master

*Etude de la maintenance pour l'optimisation du procédé de
dessalement multi-stage flash(MSF)*

Filière : Génie des Procédés
Spécialité: Matériaux et traitements de surfaces

Présenté par :
BOUKOUR Mouni

Sous la direction de :
FRIOUI Salah

Juin 2016

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant de m'avoir accordé la puissance et la volonté de terminer ce travail.

Je tiens à remercier Dr FRIQUI SAIAH pour son encadrement et lui exprimer ma profonde reconnaissance pour toute son aide scientifique, sa disponibilité, ses conseils, sa gentillesse et surtout l'intérêt qu'il a porté à mon travail et l'attention toute particulière accordée à la lecture et à la correction de ce mémoire.

Je remercie les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer la qualité et la valeur de mon travail.

Je remercie également Mr. NOUAH NOUR -EDDINE, Doctorant à l'université d'Alger, pour avoir accepté de m'aider.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à mes responsables de travail pour leur compréhension et leur aide.

Sans pour autant oublier tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin afin d'achever ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail:

A mon père, à ma mère, pour leur tendresse, leurs conseils, leurs sacrifices, leur présence à mes cotés et leur soutien, auxquels je dois ce que je suis. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon éternelle reconnaissance et de ma profonde affection.

A mes frères et mes sœurs.

A toute ma famille.

A mes amies et mes collègues.

Mouni

TABLE DE MATIERE

CHAPITRE I : LA DISPONIBILITE ET LES CONCEPTS F.M.D

| | | |
|----------|---|----|
| | Introduction générale | I |
| I.1. | La Maintenance | 01 |
| I.1.1. | Définition de la maintenance | 02 |
| I.1.2. | Entretien ou maintenance | 02 |
| I.1.3. | Les concepts de la maintenance | 02 |
| I.1.4. | Les méthodes de la maintenance | 03 |
| I.1.4.1. | La maintenance corrective | 03 |
| I.1.4.2. | La maintenance préventive..... | 04 |
| I.1.4.3. | La maintenance améliorative | 05 |
| I.2. | Disponibilité (Availability) | 06 |
| I.2.1. | Définition de la disponibilité | 06 |
| I.2.2. | Introduction au concept de disponibilité | 06 |
| I.2.3. | Analyse de la disponibilité..... | 09 |
| I.2.3.1. | Décomposition des temps | 09 |
| I.2.3.2. | Quantification de la disponibilité | 09 |
| I.2.3.3. | Composition de Temps totaux des disponibilités opérationnelles..... | 10 |
| I.2.4. | Le plan de disponibilité | 12 |
| I.2.4.1. | Objectif économique | 12 |
| I.2.4.2. | Obstacles économiques | 13 |
| I.2.4.3. | Obstacles humains | 13 |
| I.2.4.4. | Obstacles techniques | 13 |
| I.2.5. | Améliorer la disponibilité..... | 14 |
| I.3. | Fiabilité (Reliability) | 14 |
| I.3.1. | Définition de la fiabilité | 15 |
| I.3.2. | Qualité et fiabilité | 15 |
| I.3.3. | Efficacité optimale d'un système (pertinence) | 16 |
| I.3.4. | Définition de la défaillance | 16 |
| I.3.4.1. | Définition des paramètres nécessaires à la mesure de la fiabilité | 17 |
| I.3.4.2. | Modes de défaillances observées le plus fréquemment..... | 21 |

| | | |
|--------|---|----|
| I.4. | La Maintenabilite | 23 |
| I.4.1. | Situation de maintenabilité..... | 23 |
| I.4.2. | Temps moyen avant remise en service | 24 |
| I.4.3. | Calcul de la maintenabilité | 24 |
| I.4.4. | Amélioration de la maintenabilité | 25 |

**CHAPITRE II : CONNAISSANCE GENERALE SUR LES
TECHNIQUES DE DESSALEMENT**

| | | |
|-----------|--|----|
| II.1. | Les eaux salinées | 27 |
| II.1.1. | Les eaux marines | 28 |
| II.1.2. | Les eaux saumâtres | 28 |
| II.1.3. | Saumure | 29 |
| II.2. | Les procédés de dessalement d'eau de mer | 29 |
| II.2.1. | Principes généraux | 29 |
| II.2.2. | Les premiers procédés de dessalement | 29 |
| II.2.3. | Les procédés de dessalement..... | 30 |
| II.2.3.1. | Procédés à membrane..... | 31 |
| II.2.3.2. | Les procédés de distillation..... | 34 |
| II.2.3.3. | Autres procédés de dessalement..... | 38 |
| II.2.4. | Comparaison entre les procédés..... | 39 |
| II.2.5. | Coût du dessalement dans le monde..... | 39 |
| II.2.6. | Impact environnemental du dessalement | 40 |

**CHAPITRE III. LE PROCEDE DE DISTILLATION A DETENTES
ETAGEES (MULTI-STAGE FLASH MSF)**

| | | |
|------------|---|----|
| III. 1. | Etude théorique du procédé de dessalement MSF..... | 41 |
| III.1.1. | Description du procédé de distillation Multi-Stage Flash (MSF)..... | 41 |
| III.1.2. | Installations de dessalement du procédé MSF..... | 44 |
| III.1.2.1. | Les installations constituant le procédé MSF..... | 44 |
| III.1.2.2. | L'unité de dessalement..... | 45 |
| III.1.3. | Performances du procédé..... | 46 |
| III.1.4. | Avantages et Inconvénients du procédé..... | 46 |
| III.1.4.1. | Avantages..... | 46 |
| III.1.4.2. | Inconvénients | 47 |
| III.1.5. | Les problèmes rencontrés dans un procédé de dessalement MSF..... | 48 |

| | | |
|------------|---|----|
| III.1.5.1. | L'entartrage..... | 48 |
| III.1.5.2. | La corrosion..... | 49 |
| III. 2. | Modélisation du Procédé..... | 49 |
| III.2.1. | Modèle mathématique du procédé MSF..... | 50 |
| III.2.2. | L'équation de l'énergie..... | 51 |

CHAPITRE IV : MODELE ECONOMIQUE

| | | |
|-----------|--|----|
| IV .1. | Coût du dessalement..... | 53 |
| IV.1.1. | Conditions techniques | 53 |
| IV.1.2. | Conditions économiques..... | 53 |
| IV.2. | Méthode d'estimation de l'investissement total d'une Unité de dessalement..... | 54 |
| IV.2.1. | Méthode d'estimation de l'investissement..... | 54 |
| IV.2.1.1. | Coût capital direct..... | 55 |
| IV.2.1.2. | Coût Capital Indirect | 55 |
| IV.2.1.3. | Coût Capital de roulement..... | 55 |
| IV.2.1.4. | Méthodes de calculs..... | 56 |
| IV.2.2. | Méthode d'estimation du Coût de Production..... | 57 |
| IV.2.2.1. | Coûts directs de production ou charges d'exploitation directes..... | 57 |
| IV.2.2.2. | Coûts indirects de production ou charges d'exploitation indirectes..... | 57 |
| IV.2.2.3. | Récapitulatif des différentes rubriques du coût de production | 58 |
| IV.3. | La Fonction objective. Modèle économique choisi..... | 59 |

CHAPITRE V : APPLICATIONS DES CONCEPTS F.M.D ET CALCUL POUR LE PROCEDE MSF

| | | |
|------|--|----|
| V.1. | Application des concepts F.M.D pour le procédé MSF | 64 |
| V.2. | Etude de cas..... | 68 |

CHAPITRE VI. RESULTATS ET DISCUSSION

| | |
|------------------|----|
| Conclusion | 76 |
|------------------|----|

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|----------------------|--|----|
| Tableau I.1: | Disponibilité opérationnelle d'un équipement | 13 |
| Tableau I.2: | Les Facteurs de la disponibilité | 25 |
| Tableau II.1: | Classification des eaux selon la salinité | 27 |
| Tableau II.2: | Composition chimique de l'eau de mer | 28 |
| Tableau II.3: | La comparaison des procédés de dessalement eau de mer | 39 |
| Tableau II.4: | Variation du coût de dessalement avec le procédé exploité au 2006 ... | 40 |
| Tableau VI.1: | Les valeurs des paramètres et données sur les couts pour le problème d'optimisation | 71 |
| Tableau VI.2: | Les valeurs optimales obtenues en minimisant TAC (disponibilité du processus libre) | 72 |
| Tableau VI.3: | Les valeurs optimales obtenues en maximisant la disponibilité de processus (TAC gratuit) | 75 |

NOMENCLATURES

| Nomenclatures | Significations | Unités |
|----------------------|--|--------------|
| SW | Alimentation en eau de mer | m^3/h |
| D | Le distillat | tn/hr |
| W_{b-d} | La saumâtre rejetée | tn/hr |
| W_R | La saumâtre recyclée | tn/hr |
| F | Le débit total d'alimentation en eau de mer avec la saumure recyclée | tn/hr |
| R | Rapport de recirculation | $/$ |
| T_0 | Température de l'eau de mer à l'entre de l'unité | $[K]$ |
| T_{max} | Température de la vapeur a l'entrée du 1 ^{er} étage | $[K]$ |
| T_F | Température du mélange de l'eau de mer et la saumure recyclée a l'entrée de l'enceinte | $[K]$ |
| T_{b-d} | Température de la saumure rejetée | $[K]$ |
| $Min\phi(x, y, A_S)$ | Fonction de coût | $\$/year$ |
| A_S | La surface totale des étages | $[m^2]$ |
| Q^{DES} | La chaleur consommée pour chauffer l'eau de mer a T_{max} | $Gcal/hr$ |
| C_P | Chaleur spécifique du mélange de l'eau de mer et la saumure recyclée à pression constante. | $kcal/kg.k$ |
| ΔT_f | Baisse de température lors de passage de la vapeur d'un étage à un autre | $[K]$ |
| ΔT_e | Force motrice efficace pour l'opération de transfert de chaleur | $[K]$ |
| BPE | Elévation de point d'ébullition | $[K]$ |
| A_t | La surface d'échange de chaleur | $[m^2]$ |
| U | Coefficient d'échange global | $kcal/m^2.k$ |
| NS | Nombre d'étages | $/$ |
| $PROD$ | Production d'eau potable désirée | tn/hr |
| $C_{p,m}$ | La chaleur spécifique moyenne de l'eau de mer et la saumâtre recyclée | $kcal/kg.k$ |
| N_t | Le nombre de tubes | $/$ |
| β | La largeur | m |
| H_S | La hauteur | m |
| L | La longueur | m |
| D_S | Le diamètre de la coque | m |
| D | Le diamètre de chaque tube(D) | m |
| N | Le nombre de rangées de tubes | $/$ |
| L_D | La longueur du dessaleur | m |

| | | |
|--------------|--|--------------|
| Pt | L'emplacement | / |
| V_{vap} | La vitesse de la vapeur d'eau | m/s |
| ρ_{vap} | La densité de la vapeur d'eau | / |
| C_t | Coût capital total de l'unité | $\$/year$ |
| C_c | Coût capital de l'unité | $\$/year$ |
| C_e | Coût de la construction de l'unité | $\$/year$ |
| C_r | Coût capital de roulement de l'unité | $\$/year$ |
| C_{rn} | Coût capital d'une rubrique n | $\$/year$ |
| W_n | Débit de la rubrique n | / |
| C_n | Coût unitaire de la rubrique n pour un site non spécifique | $\$/year$ |
| I | Facteurs d'actualisations | / |
| T | Durée de vie de l'unité | <i>ans</i> |
| A | Facteur de disponibilité de l'unité. | % |
| i | Taux d'intérêt | % |
| TAC | Le coût total annuel | $\$/year$ |
| C_{OP} | Le coût d'exploitation | $\$/year$ |
| C_{inv} | Le coût d'investissement annuel | $\$/year$ |
| C_{PREM} | Le coût d'amortissement | $\$/year$ |
| C_{CMC} | Le coût de maintenance corrective | $\$/year$ |
| C_A | Le coût unitaire de surface | $\$/year$ |
| A_{tot} | La surface totale de l'unité | $[m^2]$ |
| ms | Le nombre des équipements dans chaque étage s | / |
| C_{PS} | Le coût unitaire de débit pompé, pour chaque étage (s) | $\$/year$ |
| Q_s | Le débit pompé dans chaque étage s | $kcal/hr$ |
| A_t | La surface totale d'échange de chaleur | $[m^2]$ |
| C_{heat} | Le coût de la chaleur | $\$/year$ |
| C_{pump} | Le coût de pompage | $\$/year$ |
| C_{feed} | Le coût de prétraitement | $\$/year$ |
| C_Q | Le coût unitaire de vapeur | $\$/year$ |
| C_P | Le coût unitaire de prétraitement | $\$/year$ |
| C_{PS} | Le coût unitaire de pompage | $\$/year$ |
| EPOT | Le temps effectif de fonctionnement | <i>hr</i> |
| RPROD | La capacité annuelle réelle | <i>tn/hr</i> |
| A_{sys} | Disponibilité opérationnelle | / |
| A_{sch} | Le temps d'arrêt pour maintenance planifiée | / |
| A_{sis} | Période d'indisponibilité | / |

| | | |
|--------------|--|---------|
| C_{CMC} | Le coût de maintenance corrective annuelle des équipements à l'étage s | \$/year |
| A_S | La disponibilité à l'étage s | / |
| A_i | la disponibilité d'un équipement (i) | / |
| $M(t)$ | La maintenabilité | / |
| $\mu(t)$ | Taux de réparation | / |
| A_0 | Disponibilité moyenne a un temps t_0 | / |
| MTTR | Moyenne des temps de techniques de réparation. | hr |
| MTBF | Moyenne de temps de bon fonctionnement | hr |
| A_g | Le taux global d'utilisation de l'équipement | / |
| MTA | Moyenne des temps d'arrêt | hr |
| TCBF | Cumul des temps de bon fonctionnement | hr |
| TA | Temps d'arrêt. | hr |
| $F(t)$ | Fonction de répartition | / |
| $R(t)$ | Fonction de fiabilité | / |
| P | Probabilité | / |
| $f(t)$ | Densité de probabilité | / |
| $\lambda(t)$ | Fonction du taux de défaillance | / |
| $\mu(t)$ | Taux de réparation | / |
| A_p | La disponibilité du système en série | / |
| N | Nombre d'équipements | / |
| A_{par} | la disponibilité du système en parallèle | / |
| A_{js} | La disponibilité de chaque équipement en parallèle | / |
| A_{pstby} | La disponibilité des unités en stand – by | / |
| A_{punit} | La disponibilité de chaque pompe | / |
| $apdes_1$ | La disponibilité de la pompe1 du distillat | / |
| $apdes_2$ | La disponibilité de la pompe2 du distillat | / |
| $apdes_3$ | La disponibilité de la pompe3 du distillat | / |
| x_i | Variables continus et réels | / |
| y_i | Variables binaires | / |
| A_{vap} | La disponibilité de la vapeur | / |
| A_{des} | La disponibilité du distillat | / |
| A_{feed} | La disponibilité du prétraitement | / |

Introduction

INTRODUCTION GENERALE

L'ingénierie et la construction d'un nouveau procédé, est un problème très complexe, Pour cela un besoin de produits finis doit être défini pour répondre à la demande du marché. Ensuite une étude technico-économique est menée pour sélectionner la technologie qui permettra d'atteindre l'objectif tracé et de répondre aux besoins définis.

Avant et pendant l'exécution du projet, des efforts constants sont faites afin de minimiser et optimiser les couts fixes de l'unité. Cependant, une attention bien particulière est faite pour prédire le cout de production, qui heureusement indique quelques profits pour les actionneurs de l'unité.

Cependant pour satisfaire la performance de cette unité industrielle, il est impérativement indispensable de considérer le facteur maintenance qui, rappelons que ce facteur maintenance est fonction de la maintenance de l'unité dont les gestionnaires ne se rendent pas compte de sa portée et ne stimulent pas sa véritable signification par des traditions techniques souvent édictés qui nécessitent au contraire des actions à corriger avec un suivi rigoureux ceci pour optimiser la fonction et tendre vers une forme de gestion satisfaisante d'une part les prestations nécessaires et d'autre part appréhender ou éviter un "gouffre financier".

Les coûts de la maintenance peuvent avoir toutes les proportions négatives possibles sans le souci et les efforts nécessaires pour palier à un niveau optimal qui, lui-même est variable du fait que l'usure est une fonction exponentielle dans le temps. La non valorisation des actions de maintenance entraîne des coûts anarchiques. A travers les notions élémentaires qui seront exposés ci-après il sera mis l'accent sur une mise au point pas même une sensibilisation parce que les gestionnaires ne manquent pas de pré-requis dans ce domaine.

Entretenir au jour le jour d'une manière aléatoire et l'optique des constructeurs et ou fournisseurs d'équipements industriels qui ne cessent d'avoir des relations commerciales étroites avec les pays en voie de développement jusqu'à leur préconiser des plans de développement et des achats d'équipements et de pièces selon un caractère purement commercial [1].

La pièce de rechange et la gestion des stocks demeurent un volet indissociable de la fonction maintenance surtout dans les pays à environnement non industriel. Malgré que les techniques et les approches dans ce domaine soient très connues par le gestionnaire, la maîtrise des délais et coûts de gestion des stocks restent aléatoires.

INTRODUCTION GENERALE

Cependant il est très ambitieux d'arranger et harmoniser les outils de la maintenance souvent connus au sens de politiques, procédures, choix, analyses, coûts, prises de décisions, lesquels outils sont généralement mal perçus dont l'effet se répercute directement sur leur pratique. A titre de rappel, les moyens au sens large et notions des techniques et approches sont disponibles en sciences appliquées sauf qu'il faudrait savoir les appliquer et les combiner au mieux dans l'espace et les circonstances propres exigés. L'insistance sur le degré de savoir ou la génération d'une culture de maintenance pour ne pas profaner la fonction maintenance avec toutes les initiatives, formulations et analyses, dépend d'un facteur des plus remarquables et prépondérant dans ce domaine qui est le génie et l'intuition humaine qui méritent d'être orientés. Le degré d'efficacité en maintenance n'est appréciable et n'a de sens que si la succession des tâches, ordres, exécutions et retour (feed-back) est clairement définie dans l'espace et le temps avec injection de procédés scientifiques et d'évaluation tant financière que technique d'une manière systématique et permanente.

La rationalisation des coûts de maintenance ne doit pas rechercher seulement une maximisation du profit à court terme, mais la préservation de ce profit à long terme. Pour ce faire il y a lieu d'adopter une politique si non une stratégie d'entretien pour pouvoir penser maintenance et le matériel sera suivie par période de sa naissance et ses différentes maladies [1].

Les techniques de maintenance ont évoluées et par nécessité l'introduction de l'outil informatique (MAO : Maintenance Assistée par Ordinateur ou GMAO : Gestion Assistée par Ordinateur), a permis de ce fait une grande capacité de traitement d'informations complexes qui aident aux analyses permettant en temps opportun d'indiquer le comportement réel des machines. Dans le but de palier aux aléas de fonctionnement, la maintenance s'est développée pour arriver à rechercher un certain degré de disponibilité lequel a conduit à résoudre un grand nombre de problèmes qu'il a fallu d'abord identifier, formuler et traiter grâce à l'application du tissu scientifique.

En outre les diagnostics d'équipements industriels nécessitent des connaissances poussées des sciences fondamentales comme la mécanique, l'électricité, la régulation, l'acoustique, la physique, la chimie et les mathématiques appliquées en technologie pour pouvoir établir des modèles pratiques et suivre leur comportement telles que les modes vibratoires, les régimes de fonctionnement, les degrés d'usure, les bilans énergétiques, les systèmes thermodynamiques, les vieillissements et caractéristiques de fiabilité, .etc.

INTRODUCTION GENERALE

La pratique de la maintenance ne se limite pas uniquement à l'appréciation et l'observation traditionnelle par l'acceptation d'une maintenance classique mais à des règles scientifiques ou précisément des systèmes et comportements non aléatoires basés sur des simulations et Modélisations de diagnostics à travers :

- ✓ Les essais, test, mesures et contrôle de paramètres et ou d'équipements en fonctionnement.
- ✓ l'analyse des comportements par comparaison et expérimentation en simulation et modélisation dynamiques.
- ✓ L'usage des commandes numériques et traitement par la MAO.

Ce qui a donné naissance à une variante de maintenance maîtrisée et performante grâce à la technologie pour prétendre enfin vers le zéro panne par la maintenance prédictive ou conditionnelle.

Ce travail est basé sur l'optimisation des procédés dans l'industrie en prenant en compte la disponibilité qui présente la capacité des équipements à remplir une fonction requise dans les conditions données pendant un temps (t).

L'étude de la disponibilité dépend de l'influence de la maintenance qui forme l'ensemble des activités visant à maintenir a un degré convenable les moyens de production pour assurer la continuité du matériel et équipement et la qualité de production a un prix optimum pour satisfaire la disponibilité et la sécurité des équipements .

Il est à rappeler que la disponibilité est un facteur économique qui relie les notions de fiabilité et de disponibilité, cette dernière dépend à son tour de la probabilité de défaillance des équipements. En effet, cette défaillance dépend directement de la conception technique et de l'environnement de fonctionnement et de la moyenne de temps de bonne fonctionnement et le temps alloué de réparation.

Le problème ainsi posé, consiste à le résoudre en déterminant ces paramètres optimales et en même temps la fiabilité optimale et la maintenabilité de chaque équipement du procédé pour maximiser le profit annuel attendu tout en considérant les couts des équipements, les couts d'exploitation et les couts de maintenance.

Sachant qu'une bonne disponibilité est obtenue par redondance des équipements en série ou en parallèle sous forme de bloc diagramme de fiabilité d'une part et d'autre part de la disponibilité de chaque équipement qui lié directement a la dépense sous forme d'investissement pour assurer en pratique une bonne fiabilité et une maintenabilité remarquable.

INTRODUCTION GENERALE

La deuxième partie de mon travail sert à déterminer la disponibilité du procédé soit par :

1- Diminuer ou abaisser le cout total annuel d'investissement sans prendre en considération la disponibilité.

2- Maximisé la disponibilité des systèmes.

Pour traiter ce sujet, notre mémoire sera organisé selon cinq chapitres :

Introduction générale.

Le premier chapitre: La disponibilité et les concepts Fiabilité, maintenabilité et disponibilité (F.M.D).

Le deuxième chapitre: Connaissance générale sur les techniques de dessalement.

Le troisième chapitre: Le procédé de distillation a détente étagées (multi-stage flash-MSF).

Le quatrième chapitre: Modèle économique.

Le cinquième chapitre: Application des concepts F.M.D et calcul pour le procédé MSF.

Le sixième chapitre: Résultats et discussion.

En fin : Une conclusion générale.

Chapitre I

La disponibilité et les concepts F.M.D

Le concepteur d'équipement est fréquemment une société qui n'exploite pas les installations qu'elle conçoit. Elle aura de ce fait forcément des difficultés à tenir compte dans sa conception des conditions d'exploitation particulières d'exploitation des clients. Généralement le concepteur attache peu d'attention à la maintenabilité des installations. Les cahiers des charges ainsi que les contrats devraient impérativement mentionner outre les objectifs de production, les critères fondamentaux de la maintenance en partant du principe général que toute installation destinée à l'exploitation doit être forcément entretenue.

Le bon fonctionnement d'une machine de production (absence de dysfonctionnement: le « zéro-panne », le « zéro-défaillance ») 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 il s'agit de : Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité (F.M.D).

L'investissement dans la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité de l'équipement moderne de production augmente de façon notable leur durabilité et leur rentabilité. Concrètement, les gains anticipés de l'implantation d'un système simple de gestion en maintenance préventive peuvent représenter une augmentation de la productivité de la main - d'œuvre de maintenance; une réduction en termes de temps d'arrêt imprévus; une réduction sur les coûts des pièces de rechange; une diminution des appels de service et une diminution des heures supplémentaires après installation d'un tel système.

L'exécution de la maintenance dans une usine est d'une importance capitale pour maintenir les équipements en état de bon fonctionnement. Le calcul de la fiabilité d'un équipement constitue un outil incontournable pour évaluer l'efficacité de n'importe quel équipement.

I.1.LA MAINTENANCE

Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des usines aussi bien que pour la qualité des produits. C'est un défi industriel impliquant la remise en cause des structures figées actuelles et la promotion de méthodes adaptées à la nature nouvelle des matériels.

I.1.1.Définition de la maintenance

La maintenance est un ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût optimal, dans le terme maintenance, ou on emploie très souvent les termes techniques suivants :

- * **Maintenir**: Contient la notion de «prévention» sur un système en fonctionnement.
- * **Rétablir**: Contient la notion de «correction» consécutive à une perte de fonction.
- * **État spécifié ou service déterminé**: Implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques.
- * **Coût optimal** : Qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité.

I.1.2.Entretien ou maintenance

- Entretien, c'est dépanner et réparer un parc matériel, afin d'assurer la continuité de la production: entretenir, c'est subir le matériel.
- Maintenir, c'est choisir les moyens de prévenir, de corriger ou de rénover suivant l'usage du matériel, suivant sa criticité économique, afin d'optimiser le coût global de possession maintenir, c'est maîtriser. En fait, la plupart des services « entretien traditionnel » sont en mutation vers la maintenance.

I.1.3.Les concepts de la maintenance

L'analyse des différentes formes de maintenance repose sur 4 concepts :

1. Les événements qui sont à l'origine de l'action : référence à un échancier, la subordination à un type d'événement (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), l'apparition d'une défaillance.
2. Les méthodes de maintenance qui leur seront respectivement associées : maintenance préventive systématique, maintenance préventive conditionnelle, maintenance corrective.
3. Les opérations de maintenance proprement dites : inspection, contrôle, dépannage, réparation, etc.
4. Les activités connexes: maintenance d'amélioration, rénovation, reconstruction, modernisation, travaux neufs, sécurité, etc.

I.1.4. 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 donc connaître :

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

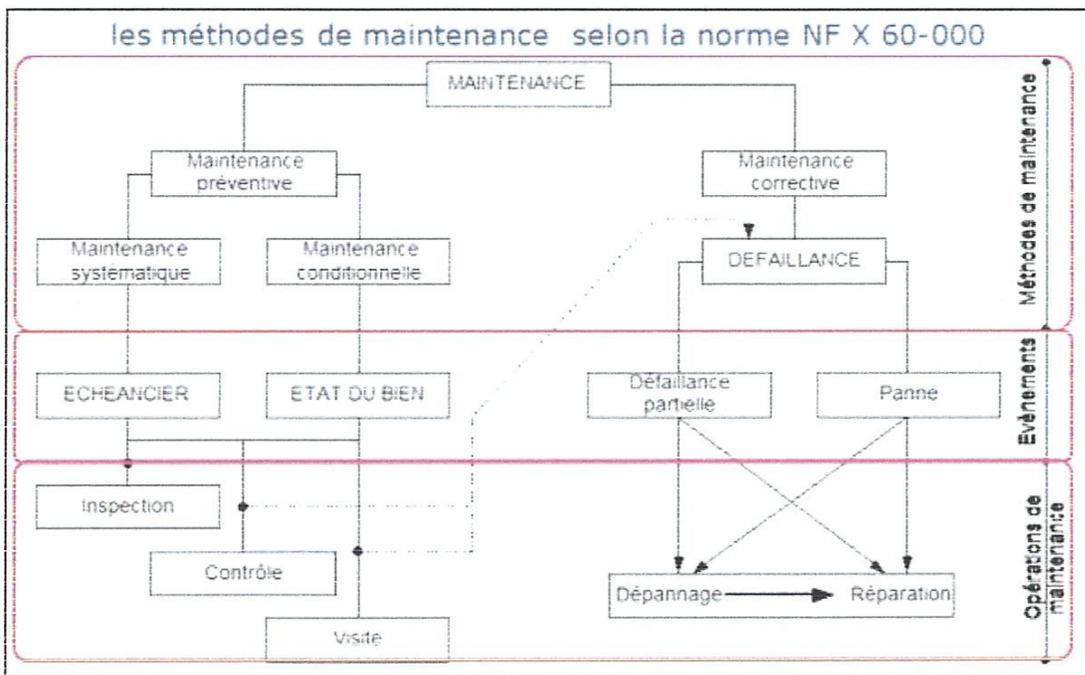


Figure I.1 : Les méthodes de la maintenance selon la norme NF X 60-000.

I.1.4.1. La maintenance corrective

C'est l'opération de maintenance effectuée après défaillance. Elle correspond à une attitude de défense (**subir**) dans l'attente d'une défaillance fortuite, attitude caractéristique de l'entretien traditionnel.

Opérations de la maintenance corrective :

Après apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous. Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) : test détection localisation diagnostic dépannage, réparation contrôle amélioration éventuelle historique.

I.1.4.2.La maintenance préventive

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un équipement ou la dégradation d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances du matériel en cours d'utilisation.

L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

I.1.4.2.1.Objectifs de la maintenance préventive

- ✓ Augmenter la durée de vie du matériel.
- ✓ Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- ✓ Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- ✓ Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- ✓ Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.
- ✓ Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc....
- ✓ Améliorer les conditions du travail du personnel de production.
- ✓ Diminuer le budget de maintenance.
- ✓ Supprimer les causes d'accidents graves.

I.1.4.2.2.Types de maintenance préventive

a- La maintenance préventive systématique

C'est la maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage.

b- La maintenance préventive conditionnelle (maintenance prédictive)

C'est la maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc...).

I.1.4.3.La maintenance améliorative

L'amélioration des biens d'équipements est un ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise. On apporte donc des modifications à la conception d'origine dans le but d'augmenter la durée de vie des composants, de les standardiser, de réduire la consommation d'énergie, d'améliorer la maintenabilité...etc.

C'est une aide importante si l'on décide ensuite de construire un équipement effectuant le même travail mais à la technologie moderne : on n'y retrouvera plus les mêmes problèmes.

I.1.4.3.1.Objectifs de la maintenance améliorative

La maintenance améliorative est un état d'esprit nécessitant un pouvoir d'observation critique et une attitude créative. Un projet d'amélioration passe obligatoirement par une étude économique sérieuse: l'amélioration doit être rentable. Tout le matériel est concerné, sauf bien sûr, le matériel proche de la réforme.

Les objectifs de la maintenance améliorative d'un bien sont :

- ✓ L'augmentation des performances de production.
- ✓ L'augmentation de la fiabilité.
- ✓ L'amélioration de la maintenabilité.
- ✓ La standardisation de certains éléments ou sous-ensemble,
- ✓ L'augmentation de la sécurité des utilisateurs.

Dans la littérature, les méthodes d'allocation de paramètres de bon fonctionnement des composants ou équipements des systèmes sont très nombreuses. Elles se différencient par de nombreux points tels que :

- ✓ Le paramètre à optimiser : fiabilité, disponibilité, maintenabilité, etc.
- ✓ Le type de système considéré : série, parallèle, série parallèle, etc.
- ✓ L'approche considérée : on distingue deux principales approches d'allocation. L'une est appelée approche par pondération ou l'on part de l'objectif de bon fonctionnement considéré et on cherche à le distribuer aux composants du système de telle sorte que l'objectif global soit atteint. La deuxième est appelée approche par optimisation ou l'on cherche une solution répondant à des critères d'optimalité en considérant les variables de décision (disponibilités des pièces de rechange par exemple).

I.2.DISPONIBILITE (AVAILABILITY)

La politique de maintenance d'une usine est fondamentalement basée sur la disponibilité du matériel impliqué dans le système de production.

I.2.1.Définition de la disponibilité

C'est l'aptitude d'un équipement à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs soit assurée. Cette valeur s'exprime le plus souvent sous la forme d'un pourcentage de temps pendant lequel le système est disponible par rapport à l'horaire de service négocié.

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

La disponibilité peut être aussi défini comme **la probabilité de bon fonctionnement d'un dispositif à l'instant t.**

I.2.2.Introduction au concept de disponibilité

La notion de disponibilité sous-entend trois autres notions :

- ✓ La fiabilité qui traite de la fréquence des défaillances, caractérisée par le taux de défaillance $\lambda(t)$ et la moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF).
- ✓ La maintenabilité qui caractérise les durées de maintenance, exprimé par le taux de réparation $M(t)$ et la moyenne des temps techniques de réparation (MTTR).
- ✓ La logistique qui traite de l'ensemble des moyens en matériel, en personnel, en rechange, de la documentation et de la politique de maintenance mise en œuvre.

Pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité, il doit :

- ✓ Avoir le moins possible d'arrêts de production.
- ✓ Etre rapidement remis en bon état s'il tombe en panne.

La figure ci-dessous montre l'interaction entre la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité.

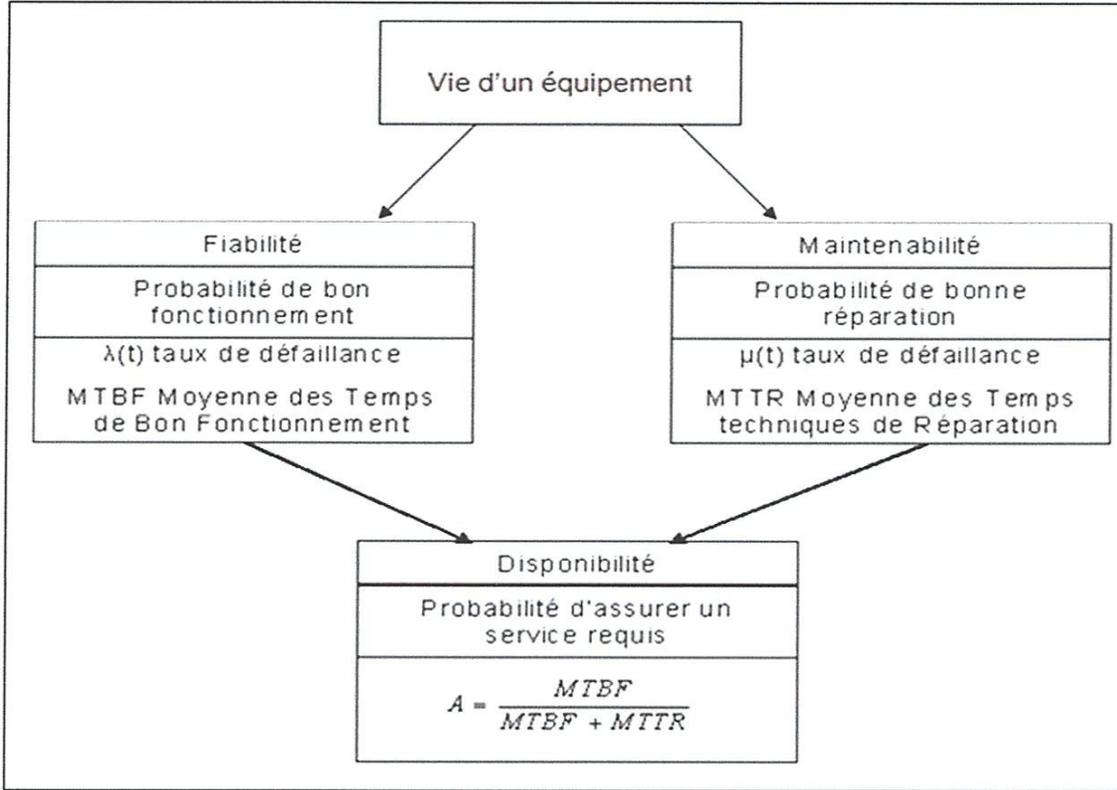


Figure I.2 : Fiabilité, maintenabilité et disponibilité d'un système réparable [2]

La disponibilité relie donc les notions de fiabilité et de maintenabilité, on distingue deux définitions d'efficacité optimale d'un système :

- a) **La disponibilité intrinsèque :** Qualifie une valeur déterminée dans les conditions de maintenance et d'exploitation supposées idéales.
- b) **La disponibilité opérationnelle :** Qualifie une valeur déterminée dans les conditions de maintenance et d'exploitation données. C'est à dire on prend en compte les conditions réelles d'exploitation et de maintenance.

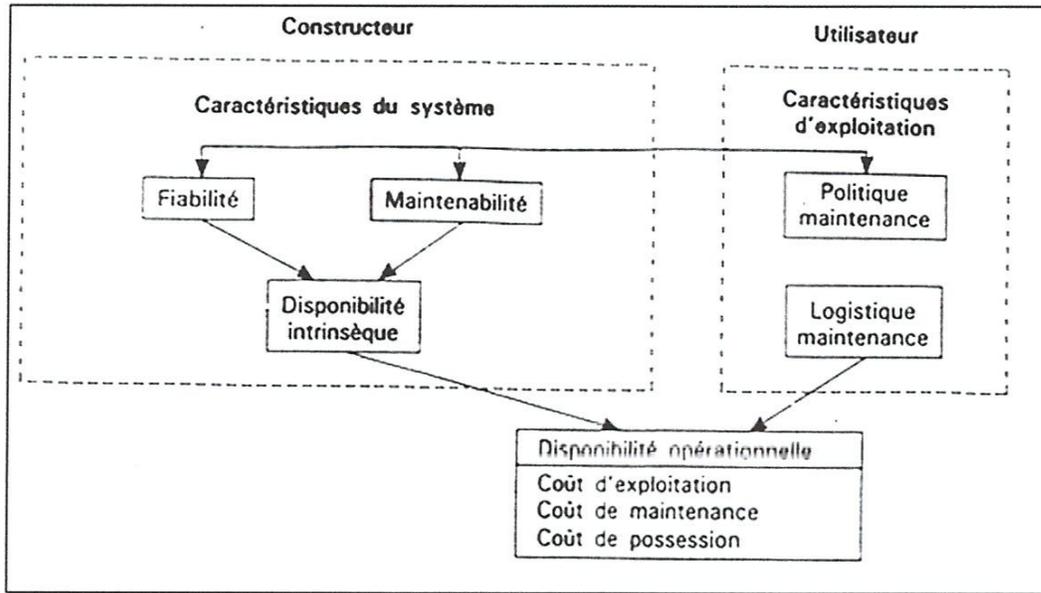


Figure I.3 : La disponibilité intrinsèque et opérationnelle

La figure ci-dessus montre l'importance à attribuer à la logistique d'intervention. Des enquêtes prouvent que le temps de réparation ne représente qu'un quart des temps d'intervention. Ce qui sous-entend que 75 % du temps (immobilisation) est dû à des problèmes de logistique [3].

La disponibilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs [4].

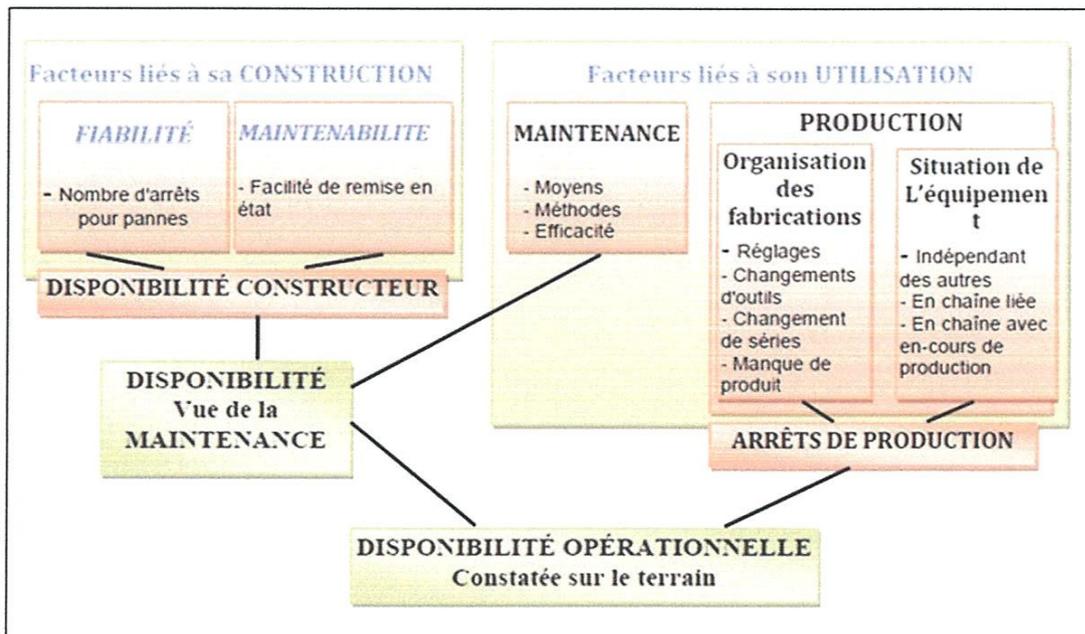


Figure I.4 : Différent facteurs liés à la disponibilité

I.2.3. Analyse de la disponibilité

I.2.3.1. Décomposition des temps

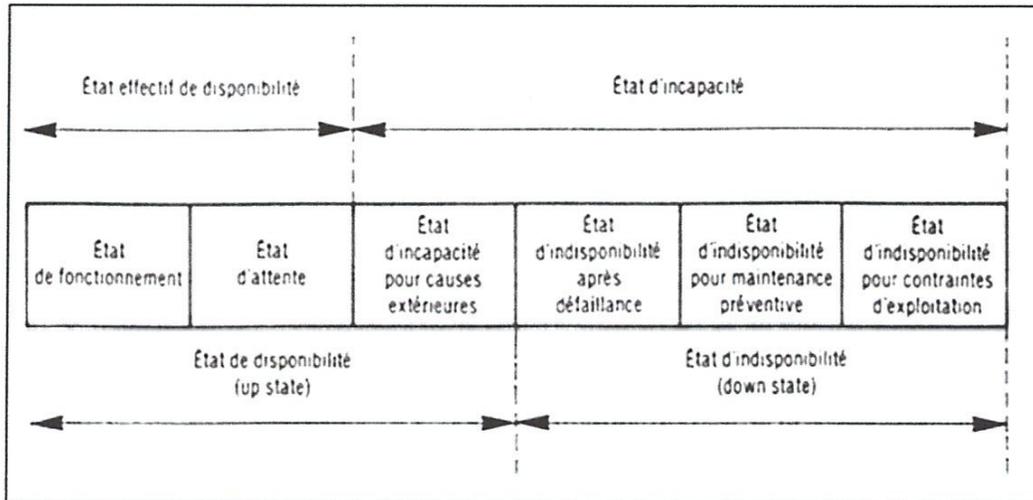


Figure I.5 : Décomposition des temps d'un équipement

I.2.3.2. Quantification de la disponibilité

La disponibilité peut se mesurer :

- ✓ Sur un intervalle de temps donné (disponibilité moyenne),
- ✓ A un instant donné (disponibilité instantanée),
- ✓ A la limite, si elle existe, de la disponibilité instantanée lorsque $t \rightarrow \infty$ (disponibilité asymptotique),

- **Disponibilité moyenne sur un intervalle de temps A_0**

La disponibilité du point de vue « Maintenance » tient compte de la carence des moyens de maintenance et d'exploitation et exprimé par le temps de disponibilité par rapport au temps de disponibilité + temps d'indisponibilité ce qui donne la formule suivante :

$$A_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \text{Formule de base} \quad (1)$$

MTTR: Moyenne des temps de techniques de réparation.

MTBF: Moyenne de temps de bon fonctionnement.

- **Disponibilité A_g**

Caractérise le taux global d'utilisation de l'équipement et tient compte de l'incapacité des facteurs extérieures.

$$A_g = \frac{MTBF}{MTBF+MTA} \quad (2)$$

MTA: Moyenne des temps d'arrêt.

$$A_g = \frac{TCBF}{TCBF+TA} \quad (3)$$

Où :

TCBF : Cumul des temps de bon fonctionnement.

TA : Temps d'arrêt.

$$A_g = \frac{\text{Temps effectif de disponibilité}}{\text{Temps total}} \quad (4)$$

Ces formules nous indique que l'augmentation de la disponibilité se fait par :

- ✓ L'allongement de la MTBF (action sur la fiabilité).
- ✓ La notion de la MTA (action sur la maintenance).

I.2.3.3.Composition de Temps totaux des disponibilités opérationnelles

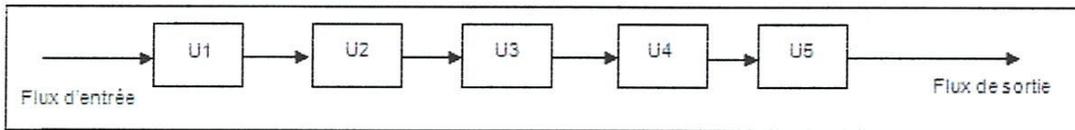
Une chaîne est constituée de différentes unités (ou machines) ayant leur vie propre (bon fonctionnement, panne, mode dégradé...), donc leur disponibilité A_i . Il est important de connaître l'influence de ces disponibilités propres à chaque unité sur la ligne complète, en particulier sur la disponibilité totale de la chaîne.

I.2.3.3.1.Chaines à unités liées

a – Unités en série dépendantes

Sur ce type de ligne, l'arrêt d'une unité entraîne l'arrêt de la ligne.

Si A_i est la disponibilité de la machine U_i et n le nombre de machines en série, la disponibilité Opérationnelle de La ligne sera :



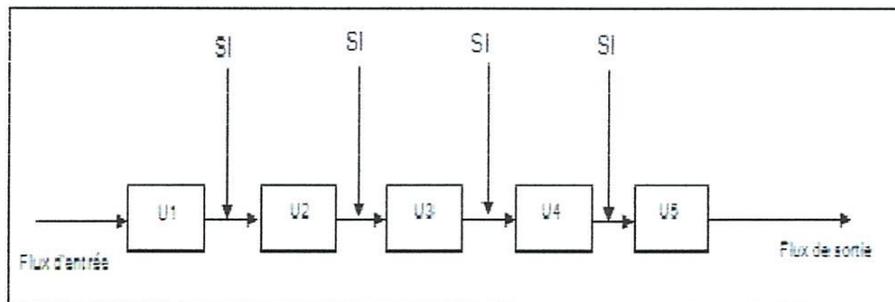
$$A_g = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{A_i} - (n-1)} \quad (5)$$

Dans ce type de ligne de production, on peut remarquer que :

- Plus le nombre d'unités est grand, plus la disponibilité globale a de chance de diminuer.
- Une perte, même infime de la disponibilité d'une unité fait chuter considérablement la disponibilité de la ligne.

b- Unités en série indépendantes

Sur ce type de ligne, l'arrêt d'une unité n'entraîne pas l'arrêt de l'ensemble de la ligne (existence d'un stock intermédiaire permettant d'alimenter la machine en aval de l'unité défaillante pendant une durée établie à partir du temps moyen d'arrêt le plus important enregistré en régime normal).



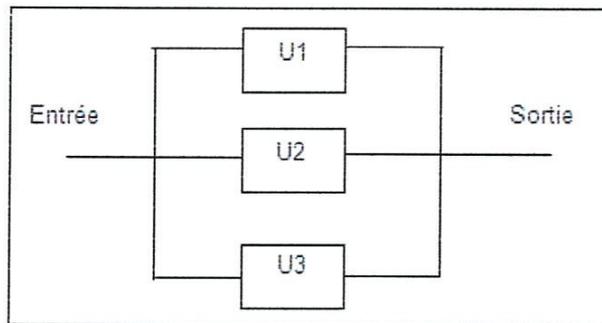
Les stocks intermédiaires(SI) sont reconstitués en faisant varier les cadences.

$$A(\text{Ligne}) = A_{u1} \times A_{u2} \times A_{u3} \times \dots \times A_{un}$$

$$A_{\text{Ligne}} = \prod_1^n (A_i) \quad (6)$$

I.2.3.3.2.Lignes à unités en redondance

Dans ce type de ligne, toutes les unités permettant d'accomplir la fonction requise, fonctionnent simultanément (La fonction est toujours réalisée).



$$A_{Ligne} = 1 - [(1 - A_1)(1 - A_2) \dots (1 - A_n)]$$

$$A_{Ligne} = 1 - \prod_1^n (1 - A_i) \quad (7)$$

I.2.3.3. Amélioration de la disponibilité des chaînes

Pour cela il faut :

- ✓ Détecter l'unité la plus pénalisante
- ✓ Engager une action de fiabilité / maintenabilité pour l'amener au niveau des autres unités (sans la pousser au dessus).
- ✓ Vérifier l'homogénéité des disponibilités A_i sur l'ensemble de la ligne.
- ✓ Si la disponibilité de la ligne est insuffisante, on améliorera les A_i de chaque unité.

I.2.4. Le plan de disponibilité (Availability Plan)

Le plan de disponibilité correspond à une planification sur le long terme des buts, des objectifs et des documents de ce processus. Ce planning définit les étapes et les moyens envisagés, tels que les ressources humaines, les processus, les outils et les techniques, dans le but d'améliorer de façon proactive la disponibilité des services informatiques tout en respectant les contraintes de coût imposées [5].

I.2.4.1. Objectif économique

Le but recherché dans le fonctionnement des machines qui tendent vers la complexité et les faramineux prix d'acquisition n'est autre que d'avoir réalisé la notion du plus opérationnel possible. Ceci se traduit en maintenance par la "disponibilité opérationnelle" d'une machine qui est le double fruit de sa "fiabilité" élaborée par les services conception et

installation du constructeur et de son ‘‘utilisation optimale’’ dont la charge revient au service maintenance de l'utilisateur [1].

Tableau I.1 : Disponibilité opérationnelle d'un équipement

| Constructeur | Utilisateur | Disponibilité Opérationnelle |
|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| - Conception au bureau d'études | Exploitation et maintenance | Coût de : |
| - Caractéristiques du système | Caractéristiques d'exploitation | Exploitation |
| - Fiabilité et maintenabilité | Politique maintenance | Maintenance |
| - Disponibilité intrinsèque | Logistique maintenance | possession |
| | Diagnostic surveillance | |

Cependant la disponibilité absolue est tributaire de trois obstacles prépondérants :

I.2.4.2.Obstacles économiques

Les répercussions multiples et variés sont souvent masquées et ou mal cernées et par conséquent ne peuvent être chiffrées par les moyens de gestion comptable.

I.2.4.3.Obstacles humains

Une politique FMD suppose un effort de formation et d'informations pluridisciplinaires pour pouvoir :

- ✓ Adopter une structuration spécifique et adaptée.
- ✓ Développer les méthodes d'analyse de fiabilité qualitative (AMDEC ou FMECA) et quantitative (MTBF et MTTR).

I.2.4.4.Obstacles techniques

Ils sont généralement proches des limites de la recherche scientifique appliquée notamment :

- ✓ Manque des données chiffrées sur les taux de défaillance parce que les lois statistiques utilisées sont complexes.
- ✓ Mauvaise appréhension des systèmes.
- ✓ Manque de surveillance intelligente.
- ✓ La disponibilité peut se mesurer :

- ✓ A un instant donné (disponibilité instantanée).
- ✓ Sur un intervalle de temps (disponibilité moyenne).
- ✓ A la limite, si elle existe, de la disponibilité instantanée.

Lorsque $t \rightarrow \infty$ (disponibilité asymptotique).

I.2.5. Améliorer la disponibilité

La capacité du processus de gestion de la disponibilité est fortement influencée par la gamme et la qualité des méthodes et des techniques disponibles pour son déploiement et son exploitation.

Dans l'absolu, il convient d'appliquer des méthodes simples pour y parvenir. On peut tout d'abord réduire le temps d'arrêt (période d'indisponibilité) en procédant aux actions suivantes :

- Réduire le temps de détection par la supervision du système et la mise en place d'alarmes ;
- Réduire le temps de réaction par la gestion des incidents et la mise en place de procédures ;
- Réduire le temps de réparation en disposant de configurations standards, de dossiers système à jour et de matériels de rechange disponibles;
- Réduire les temps de restauration (procédures, sauvegardes, données d'origine, etc.) ;

On peut ensuite réduire la fréquence ou l'impact des incidents par les actions suivantes :

- Investir dans des systèmes à tolérance de panne (améliorer la résilience).
- Réaliser des maintenances préventives permettant d'éviter un grand nombre d'incidents (gestion de la capacité, gestion des configurations, etc.) ;
- Mettre en place la duplication des services ou des environnements, de façon synchrone ou asynchrone en fonction de la criticité du service. Enfin, pour réduire les arrêts de service on peut :
- Planifier les interventions préventives en dehors des horaires de service (gestion du changement, gestion des mises en production) [5].

I.3. FIABILITE (RELIABILITY)

La complexité croissante des matériels et la miniaturisation rendent difficiles les actions de maintenance corrective. De plus, la mise en jeu d'investissements et de risques de plus en plus élevés, les coûts de perte de production élevés, certaines maintenances impraticables sur site (aérospatiale, nucléaire, travaux sous-marins...) tendent à imposer une connaissance chiffrée de la fiabilité afin d'évaluer quantitativement les risques, les moyens

logistiques...Correspond à l'aptitude d'un système à fonctionner durablement avec un minimum d'incidents ou d'interruptions.

I.3.1.Définition de la fiabilité

C'est la fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné (t).

La notion de temps peut prendre la forme :

- ✓ De nombre de cycles effectués → machine automatique.
- ✓ De distance parcourue → matériel roulant.
- ✓ De tonnage produit → équipement de production.

On dit qu'un équipement est fiable s'il subit peu d'arrêts pour pannes et la notion de fiabilité s'applique :

- ✓ A du système réparable → Equipement industriel ou domestique.
- ✓ A des systèmes non réparables → Lampes, composants donc jetables.

I.3.2.Qualité et fiabilité

La qualité est prise ici dans le sens « satisfaction du besoin de l'utilisateur ».En général cela se traduit par la conformité du produit aux spécifications initiales.

La fiabilité mesure son aptitude à y demeurer conforme dans le temps, et dépend de nombreux facteurs tels que :

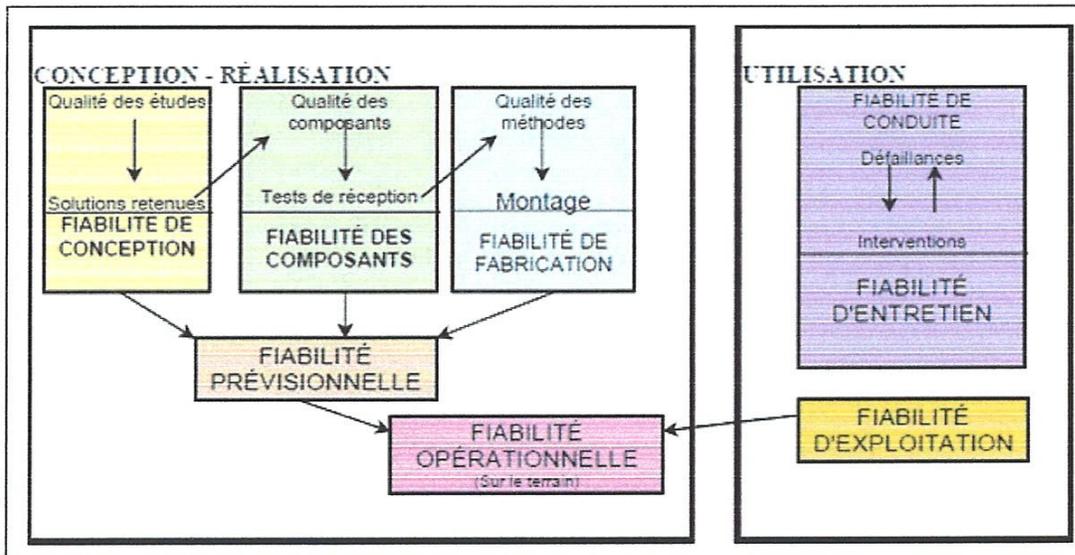


Figure I.6: Facteurs liées à la fiabilité

I.3.3.Efficacité optimale d'un système (pertinence)

C'est la zone ou le bilan économique final est optimum en tenant compte de tous les paramètres : Prix d'achat, fiabilité, maintenabilité, coût de la maintenance, sécurité...etc.

Ce prix de revient est un élément essentiel. En général, on ne recherche pas la meilleure fiabilité mais le meilleur compromis « prix/ fiabilité » pour un ensemble donné de performances. Comme le montre la figure suivante :

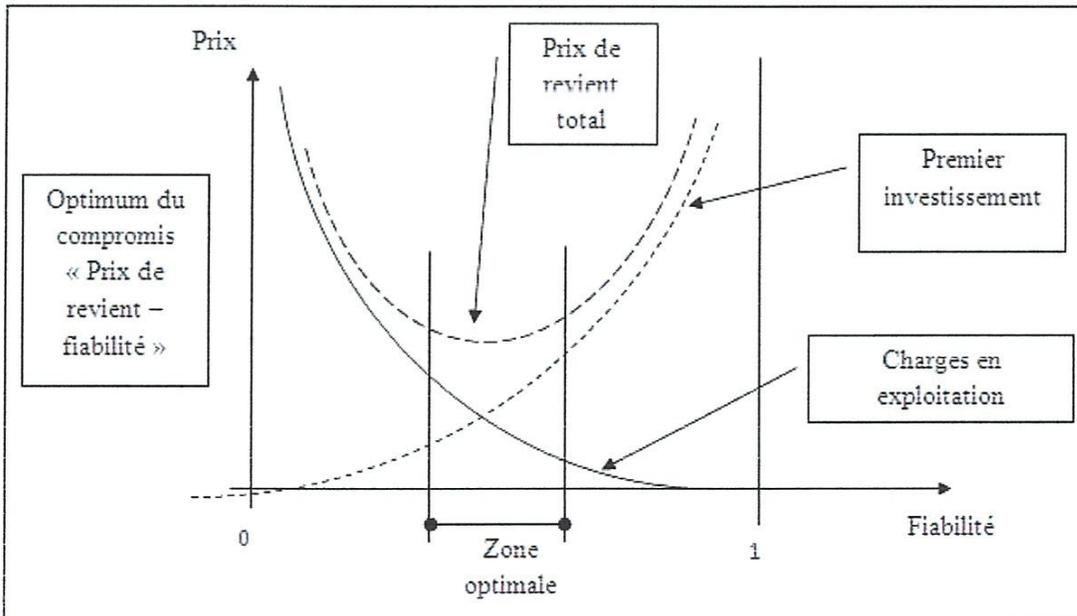


Figure I.7. : Compromis prix/ fiabilité

I.3.4.Définition de la défaillance

C'est la cessation de l'aptitude d'un équipement à accomplir une fonction requise.

- ✓ Après défaillance, un équipement est en état de panne.
- ✓ Une défaillance est un passage d'un état à un autre (bon fonctionnement à panne).

Synonymes usuels non normalisés : « failure » (anglais), dysfonctionnement, dommages, dégâts, anomalies, avaries, incidents, défauts, pannes, détériorations.

Une défaillance peut être :

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

Fonction requise:

Fonction d'un produit dont l'accomplissement est nécessaire pour la fourniture d'un service donné. Une fonction requise pourra être une fonction seule ou un ensemble de fonctions.

La notion du service pourra recouvrir une mission, c'est à dire une succession de phases par lesquelles doit passer le produit sur un intervalle du temps donné.

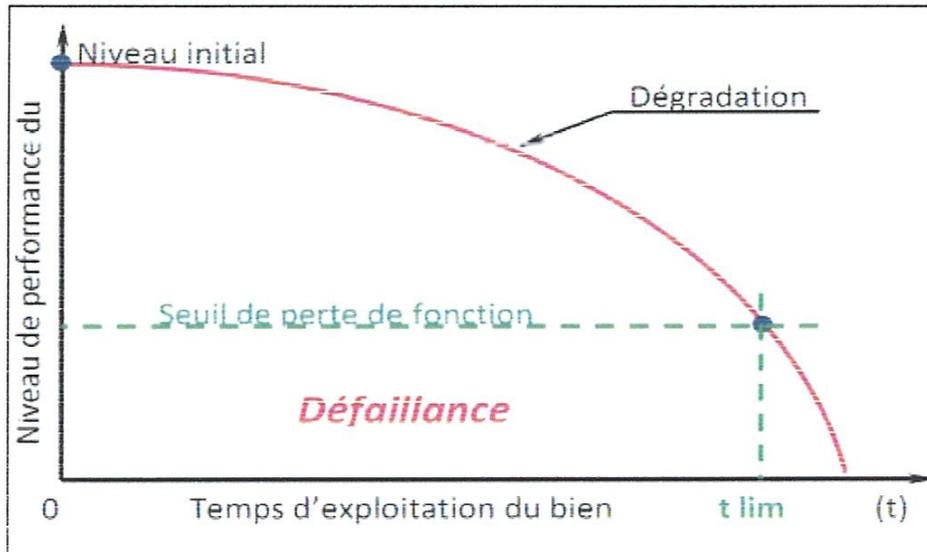


Figure I.8: Dégradation du bien et durée de vie

NB: t_{lim} indique le moment d'apparition de la défaillance.

I.3.4.1. Définition des paramètres nécessaires à la mesure de la fiabilité

I.3.4.1.1. Probabilité P

On veut à partir de défaillances enregistrées dans un intervalle de temps déterminé sur un équipement, définir la probabilité de défaillance sur la période de fonctionnement qui intéresse l'utilisateur, ou bien à partir de défaillances enregistrées sur un échantillon d'équipement, définir la probabilité de défaillance de la population d'équipements.

- ✓ La probabilité d'un événement est un nombre compris entre 0 et 1.
- ✓ La somme des probabilités de chacun des événements incompatibles est égale à 1.

On aura :

$$P_{de\ défaillance} + P_{de\ non\ défaillance} = 1 \quad (8)$$

$$F(t) + R(t) = 1$$

I.3.4.1.2.Fonction de réparation «F(t)»

C'est la probabilité de subir une défaillance à un instant (t) compris entre [0, t] (un dispositif mis en service tombera en panne pour la première fois à un instant (t) non connu à priori).

La fonction de répartition se définit par :

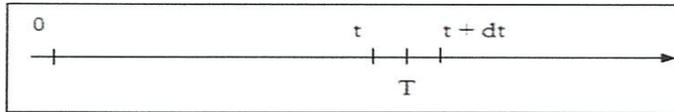
$$F(t) = P(T < t) = \frac{\text{Nombre de cas favorables}}{\text{Nombre de cas possible}} \quad (9)$$

I.3.4.1.3.Densité de probabilité « f (t) »

C'est la probabilité de subir une défaillance à l'instant (T) compris entre t et t + dt (c'est à dire juste à l'instant T). Dans le cas d'une variable aléatoire continue, la densité de probabilité « f (t) » est la dérivée de la fonction de répartition F(t).

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

$$F(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt \quad (10)$$



Exemple de représentation graphiques des fonctions « densité de probabilité » f(t), « de répartition » F(t).

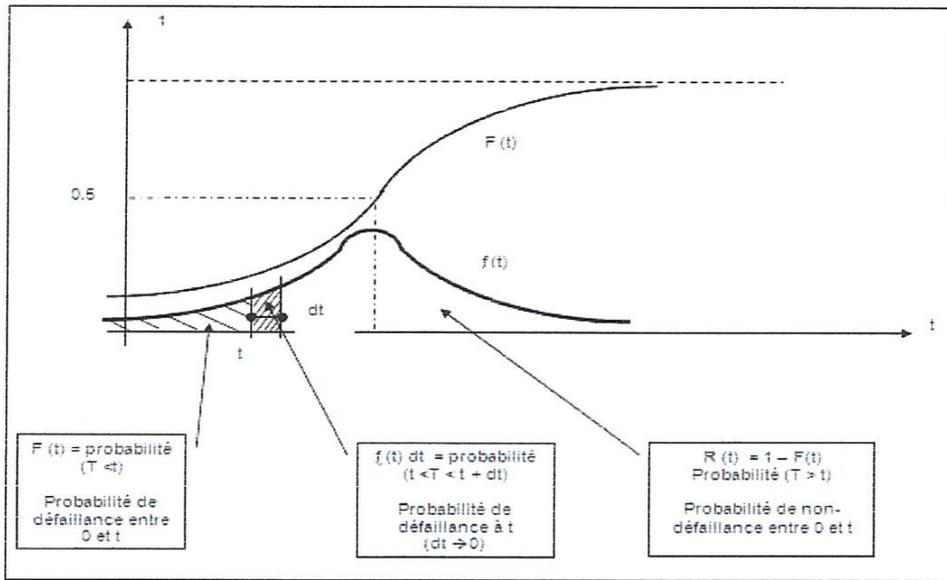


Figure I.9: Représentation graphique des fonctions densité de probabilité $f(t)$, de répartition $F(t)$

I.3.4.1.4.Fonction de fiabilité « R(t) »

La fiabilité se caractérise par sa courbe $R(t)$ appelée également « loi de survie » (R : reliability) et son taux de défaillance $\lambda(t)$.

Et représente la probabilité de non-défaillance dans l'intervalle de temps $[0, t]$, c'est-à-dire la probabilité de défaillance au delà du temps t (entre t et ∞).

$$R(t) = P(T > t)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (11)$$

C'est aussi la fonction complémentaire de la fonction $F(t)$: $F(t) + R(t) = 1$

donc : $R(t) = 1 - F(t)$.

I.3.4.1.5.Fonction du taux de défaillance « $\lambda(t)$ »

C'est la probabilité de subir une défaillance à l'instant « t » pour un équipement ayant vécu jusqu'à l'instant « t », Exprimée en général en défaillances par unité d'usage (généralement en pannes / heure). Statistiquement, $\lambda(t)$ caractérise la probabilité de défaillance dans l'intervalle Δt , pour un dispositif ayant vécu jusqu'à l'instant « t » ou $\lambda(t)$

est une densité de probabilité conditionnelle car il ne considère que la probabilité de défaillance du matériel encore en fonctionnement.

Remarque :

Si $f(t)$ est la densité de probabilité, nous avons : $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$

En intégrant l'expression précédente $F(t) = \int_0^t f(t)dt$ entre 0 et t, on obtient

l'expression : $R(t) = e^{\int_0^t \lambda(t)dt}$ (12)

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \Rightarrow f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{-dR(t)}{dt}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \Rightarrow f(t) = \lambda(t) \times R(t) = \frac{-dR(t)}{dt} \Rightarrow \frac{dR(t)}{dt} = \lambda(t) \times dt \Rightarrow$$

$$R(t) = e^{\int_0^t \lambda(t)dt}$$

Cette relation est fondamentale car quelle que soit la loi de fiabilité, elle permet un tracé expérimental de la fiabilité en fonction du temps (L'évolution du taux de défaillance étant connue) selon une courbe appelée courbe en baignoire.

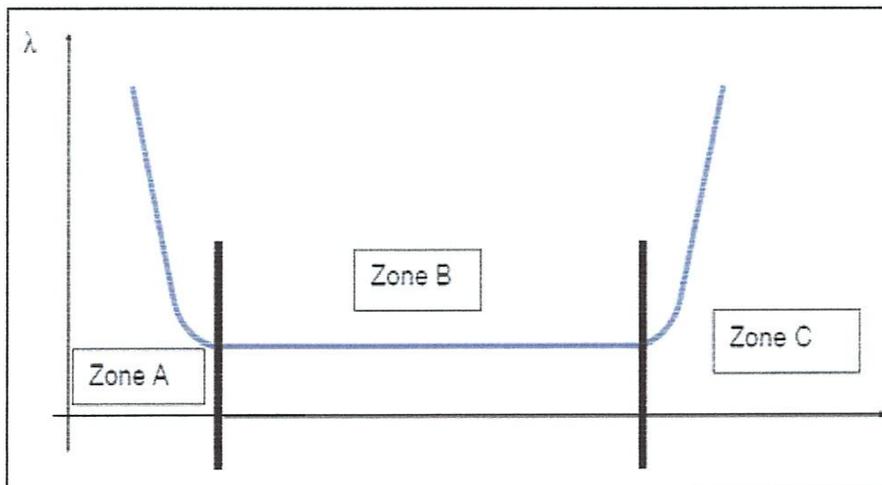


Figure I.10 : L'évolution de la durée de vie d'un équipement (courbe en baignoire)

Zone A : Epoque de jeunesse

Zone B : Epoque de maturité, fonctionnement normal, défaillance aléatoire Indépendante du temps.

Zone C : Epoque d'obsolescence, défaillances d'usure ou pannes de vieillesse.

Cas particulier de l'époque de maturité

Dans cette période, le taux de défaillance est sensiblement constant et égal à l'unité d'usage sur la MTBF. Ou MTBF est la moyenne des temps de bon fonctionnement entre défaillances consécutives (Mean Time Between Failure). Les calculs qui suivent ne sont donc valables que pour cette période.

Calcul de la MTBF

$$MTBF = \frac{\text{Temps de Bon Fonctionnement (TBF)}}{\text{Nombre de pannes}} \quad (13)$$

Calcul du taux de défaillance λ :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (14)$$

En réalité, La MTBF représente la moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances selon l'équation décrite ci-dessous :

$$MTBF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (15)$$

I.3.4.2. Modes de défaillances observés le plus fréquemment.

I.3.4.2.1. Méthode ABC (Diagramme Pareto)

Parmi la multitude de préoccupations qui se posent à un responsable de maintenance, il lui faut décider quelles défaillances doivent être étudiées et/ou améliorées en premier. Pour cela, il faut déceler celles qui sont les plus importantes et dont la résolution ou l'amélioration serait le plus rentable, en particulier en terme de coûts d'indisponibilité. La difficulté réside dans le fait que ce qui « est important » et que ce qu'il « l'est moins » ne se distinguent pas toujours de façon claire.

La méthode ABC apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités. On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts,

coût financier, nombre, etc.), chaque événement se rapportant à un équipement. On établit ensuite un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés. Sur le schéma **figure I.11**, on observe trois zones.

1. Zone A : 20% des pannes occasionnent 80% des coûts ;
2. Zone B : Les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires ;
3. Zone C : Les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global ;

On peut déduire qu'il est évident que la préparation des travaux de maintenance doit porter sur les Pannes de la zone A.

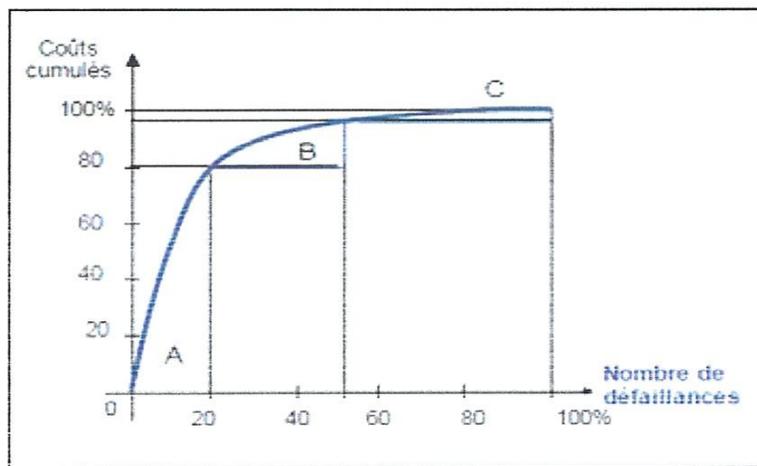


Figure I.11: Diagramme de Pareto ou courbe ABC

En maintenance cette méthode est très utile pour déterminer les urgences ou les tâches les plus rentables, par exemple :

- ✓ S'attacher particulièrement à la préparation des interventions sur les défaillances les plus fréquentes et/ou les plus coûteuses (documentation, gammes opératoires, contrats, ordonnancement, etc..),
- ✓ Rechercher les causes et les améliorations possibles pour ces mêmes défaillances,
- ✓ Organiser un magasin en fonction des fréquences de sortie des pièces (nombre de pièces et emplacement),
- ✓ Décider de la politique de maintenance à appliquer sur certains équipements en fonction des heures et des coûts de maintenance.

Mais il est à rappeler que cette méthode ne résout pas les problèmes, mais elle attire l'attention du technicien sur les groupes d'éléments à étudier en priorité.

I.3.4.2.2. Diagrammes de Pareto en N, Nt et t

Le service maintenance peut exploiter cette méthode en allant beaucoup plus loin :

- ✓ On dresse un tableau regroupant les sous-ensembles, le nombre de défaillances N, les temps d'arrêt par sous-ensemble Nt et la moyenne des temps d'arrêt t ;
- ✓ On élabore les diagrammes en bâtons N, Nt et t ; ils permettront de déterminer la priorité de prise en charge des sous-ensembles par le service maintenance,
- ✓ Le graphe en N oriente vers l'amélioration de la fiabilité ;
- ✓ Le graphe en Nt est un indicateur de disponibilité, car Nt estime la perte de disponibilité de chaque sous-ensemble ;
- ✓ Le graphe en t oriente vers la maintenabilité, c'est à dire l'amélioration de l'aptitude à la maintenance.

I.4.LA MAINTENABILITE

I.4.1. Situation de maintenabilité

Dans des conditions données d'utilisation, c'est l'aptitude d'un équipement 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 précis.

La maintenabilité caractérise la facilité à remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement. Cette notion ne peut s'appliquer qu'à du matériel maintenable, donc réparable. C'est aussi la faculté de réparabilité ou simplification des tâches visant à entretenir et réparer le matériel (accessibilité, encombrement, montage, démontage, sécurité, ...).

Il existe aussi une définition probabiliste plus stricte de la maintenabilité : c'est la probabilité de remettre un système en état de fonctionner en un temps donné avec des moyens donnés et dans des conditions données en retrouvant la fiabilité initiale.

“Les moyens prescrits ” englobent des notions très diverses : moyens en personnel, appareillages, outillages, etc. La maintenabilité est estimée par le taux de réparation « μ ».

Capacité de maintenance (Maintenabilité) : Représente le potentiel de maintenance externe et indique la capacité d'un fournisseur externe à remettre un système en état de fonctionnement [3].

I.4.2. Temps moyen avant remise en service

C'est le temps pendant lequel l'équipement est inapte à accomplir une fonction requise à la suite d'une défaillance et avant remise en service, la figure ci-dessous schématise les états successifs que peut prendre un système Réparable.

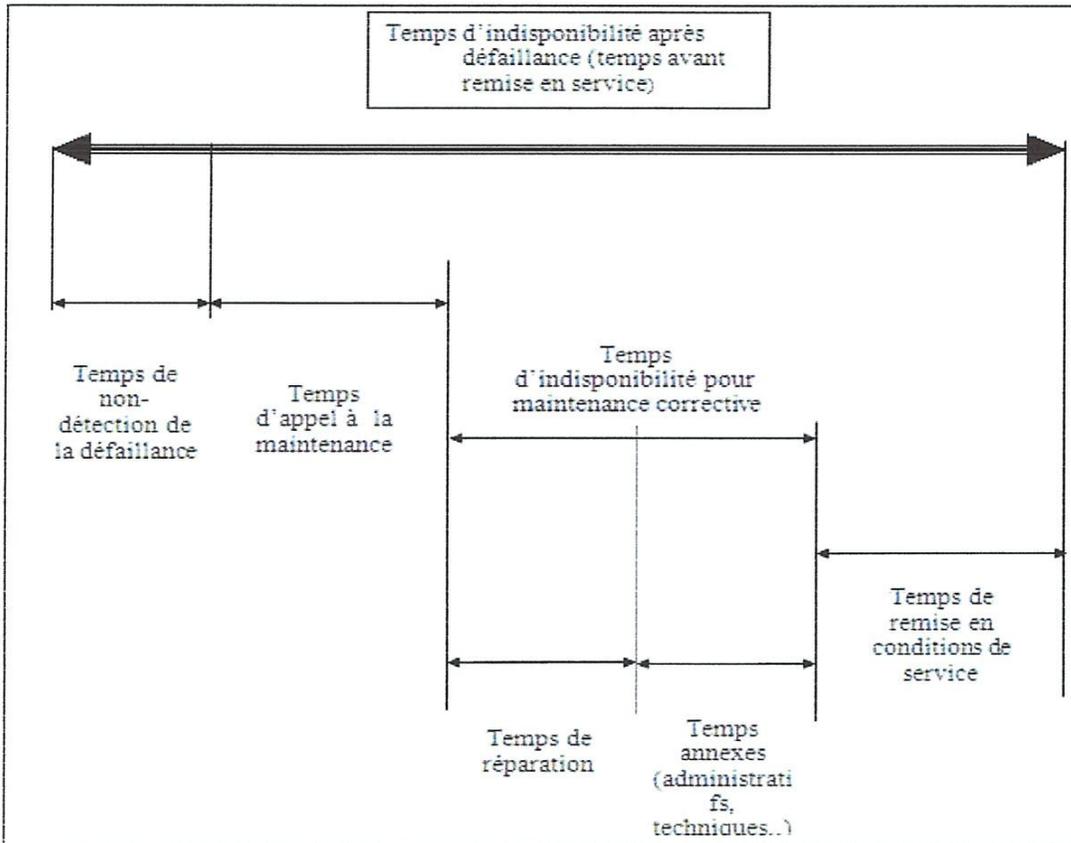


Figure I.12: Temps d'indisponibilité après défaillance

L'indicateur privilégié de maintenabilité correspond aux temps d'immobilisation qui se décomposent en :

- ✓ Délais d'intervention.
- ✓ Durée d'intervention.

La maintenabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs qui sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.2 : Les facteurs de la maintenabilité [6]

| Facteurs liés | | |
|--|--|---|
| A l'équipement | Au constructeur | A la maintenance |
| - Documentation - Aptitude au démontage - Facilité d'utilisation | - Conception - Qualité du service après-vente - Facilité d'obtention des pièces de rechange - Coût des pièces de rechange | - Préparation et formation des Personnels - Moyens adéquats - Etudes d'améliorations (maintenance améliorative) |

I.4.3. Calcul de la maintenabilité

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR (Moyenne des Temps Techniques de Réparation) ou encore Mean Time To Repair. Où :

$$MTTR = \sum \frac{\text{Temps d'intervention pour } n \text{ pannes}}{\text{Nombre de pannes } (n)} \quad (16)$$

Taux de réparation μ

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (17)$$

I.4.4. Amélioration de la maintenabilité

Cette recherche doit commencer dès la conception du matériel avec des actions concernant l'amélioration de la maintenance (évite les défaillances, donc diminue MTTR) ainsi que l'amélioration de la durée, du coût et des exigences logistiques des tâches de maintenance de tout type.

Le temps de réparation, composante du temps d'indisponibilité pour maintenance corrective, peut être réduit par la mise en œuvre de méthodes et de moyens performants tels que :

- ✓ Diminution du temps de localisation de la panne ;
- ✓ Diminution du temps de diagnostic ;
- ✓ Diminution du temps de correction de la panne ;
- ✓ Diminution du temps de contrôle.

Cependant on peut améliorer la maintenabilité en :

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

Une approche d'étude de maintenabilité doit être développée au stade de la conception des équipements pour répondre aux aspects liés à :

- ✓ L'évidence des éléments qui permettent d'accroître la maintenabilité tels que les critères liés au bien et aux moyens de la maintenance ;
- ✓ Diminution de la durée de détection des défaillances (dispositifs de vérification) ;
- ✓ Diminution de la durée du diagnostic (repérage, documentation, procédures) ;
- ✓ Diminution de la durée de réparation (accessibilité, facilité de démontage et remontage, interchangeabilité) ;
- ✓ Diminution de la durée nécessaire au contrôle (essais en exploitation, limites de Tolérances).

Chapitre II

Connaissance générale sur les techniques de dessalement

L'eau est une substance essentielle à la survie et au développement de l'humanité. La terre est la planète de l'eau (71% de la surface en est recouverte), mais 97% de cette eau est salée (3% d'eau douce dont les 2/3 sont gelés aux pôles).

Le manque de cette ressource et sa rareté, causée, à la fois, par la sécheresse et la surexploitation des nappes phréatiques, devient un grand problème qui menace la vie des habitants dans plusieurs régions. Rechercher et produire de l'eau potable, à partir d'autres ressources naturelles, est d'une extrême importance. Or, au voisinage de plusieurs régions, manquantes d'eau potable, existent des sources d'eaux tell que l'eau de mer et les eaux saumâtres contenant un certain pourcentage de sel.

Le dessalement des eaux saumâtre et, a fortiori, de l'eau de mer procure une Solution séduisante à cette problématique. C'est pourquoi le marché du dessalement est d'ores et déjà en pleine expansion avec une progression 7% par an.

Les usines de dessalement se multiplient dans de nombreux pays (Libye, l'Australie, la grande Bretagne); surtout dans les pays en prise à des pénuries d'eau (Algérie, Libye, pays du golfe) mais aussi dans les pays d'Europe du sud (Espagne, Italie, Grèce) et aux Etats-Unis.

II.1.LES EAUX SALINEES

Afin de mieux comprendre les procédés de dessalement, une présentation rapide des caractéristiques de l'eau apparaît nécessaire.

La distinction entre les types d'eau repose sur la concentration globale en sels : d'après l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), une eau est considérée comme potable si sa salinité totale est comprise entre 100 et 1000 mg/l, soit 0.1 et 1g/l. L'objectif de la salinité de l'eau produite pour la consommation se situe en général autour de 400 mg/l. Pour une utilisation industrielle, en revanche, une eau de salinité de 20 à 50 mg/l peut être acceptée.

Lorsqu'on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, on obtient les données consignées au tableau I.2.

Tableau II.1: Classification des eaux selon la salinité [8].

| Types d'eau | Salinité (mg/l) |
|-------------------------|---------------------|
| Eau douce | < 500 |
| Eau légèrement saumâtre | 1000 – 5000 |
| Eau modérément saumâtre | 5000 – 15000 |
| Eau très saumâtre | 15000 – 35000 |
| Eau de mer | 35000 – 42000 |

II.1.1. Les eaux marines

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). Dans l'eau, Les sels sont sous forme d'anions chlorures et sulfates parallèlement aux cations sodium, magnésium, calcium et potassium.

La salinité est définie comme le poids en gramme (g) des composants solides, la salinité moyenne des eaux de mers et océans est de l'ordre de 35 g/l, cependant cette valeur varie fortement selon les régions et la saison, Dans les zones maritimes chaudes et partiellement fermées elle est plus élevée : Mer méditerranée : 36 à 39 g/l, Golfe Persique : 40 à 70 g/l, Mer morte : 270 g/l, C'est l'inverse dans les mers froides recevant de forts apports fluviaux, Mer Baltique : 7 g/l [9].

L'évaporation de l'eau à partir de 1kg d'eau de mer conduit à l'obtention des sels secs dont le pourcentage et la constitution sont visualisés sur le tableau suivant :

Tableau II.2: Composition chimique de l'eau de mer [10]

| Composants chimiques | Formule | Salinité | % |
|-----------------------|--------------------------------|--------------|--------------|
| Chlorure de Sodium | Na Cl | 27,21 | 77,74 |
| Chlorure de Magnésium | Mg Cl ₂ | 3,81 | 10,88 |
| Sulfate de Magnesium | Mg So ₄ | 1,66 | 4,74 |
| Sulfate de Calcium | Ca Co ₃ | 1,26 | 3,60 |
| Sulfate de Potassium | K ₂ So ₄ | 0,86 | 2,46 |
| Carbonates de Calcium | Ca Co ₃ | 0,12 | 0,34 |
| Brimûre de Magnesium | Mg Br | 0,08 | 0,23 |
| | TOTAL | 35,00 | 99,99 |

L'eau de mer est une solution complexe qui contient tous les éléments indispensables à la vie (calcium, silicium, carbone, azote, phosphore, oligo-éléments), des matières organiques (teneur comprise entre 0.5 et 2mg) et, naturellement à l'état dissous, les gaz présents dans l'atmosphère. L'eau de mer est un milieu légèrement basique, Son pH étant compris entre 7.5 et 8.4.

II.1.2. Les eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre, On en trouve en particulier en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et aux Etats-Unis [11].

Les différentes teneurs en ions (Mg, Ca, F, etc...) peuvent être très variées selon l'origine de l'eau. La quantité de sel à éliminer est donc, elle aussi, variable selon son éventuelle toxicité.

Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO₃, le CaSO₄, le MgCO₃ et le NaCl.

II.1.3.Saumure

En pratique, lorsqu'il s'agit de déminéraliser une eau saline, les sels sont éliminés non pas sous forme de sels secs, mais dans une solution plus concentrée que l'eau à traiter, une telle solution est appelée « saumure».

II.2.LES PROCEDES DE DESSALEMENT D'EAU DE MER

II.2.1.Principes Généraux

Le dessalement s'appelle aussi désalinisation ou plus rarement dessalage. Il consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale pour la rendre potable ou l'utiliser pour l'irrigation.

D'après la norme ISO 9000:2000, le terme procédé ou processus désigne l'ensemble de moyens et d'activités liés qui transforment des éléments entrants en éléments sortants». Ces moyens peuvent comprendre les techniques, les méthodes et les ressources humaines, matérielles et financières.

II.2.2.Les premiers procédés de dessalement

Dès le IV^o siècle avant JC, Aristote observe le principe de la distillation. Au XII^o siècle, Adalard de Bath décrit deux expériences dans les questions naturelles au soleil, après l'évaporation sur un rocher, l'eau de mer se transforme en sel, lorsque le soleil fait défaut, on chauffe de l'eau de mer et sous l'effet de la cuisson, on la voit également se transformer en sel [12].

Cette métamorphose explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que les mers méridionales le soient davantage que les mers septentrionales.

Depuis les temps les plus anciens, les marins ont dessalé l'eau de mer à partir de simples bouilleurs sur leurs bateaux, mais l'utilisation à des fins industrielles est récente.

II.2.3. Les procédés de dessalement

Pour dessaler l'eau il existe diverses techniques, certaines sont plus adaptées à un environnement donné que d'autres. Actuellement on utilise cinq techniques regroupées en deux familles :

1. Les procédés de distillation (thermo-compression).
2. Les procédés membranaires (osmose inverse et l'électrodialyse).

Ces deux procédés représentent des avantages très importants puisque ils utilisent de grandes quantités volumiques d'eau de mer qui se trouve à proximité de l'usine.

Les technologies thermiques sont celles que le chauffage de l'eau fait le recueil de la vapeur condensée (distillation) pour produire de l'eau pure. Elles sont rarement utilisées pour dessaler l'eau saumâtre (eau de moins de 10,000 milligrammes par l de matières en suspension).

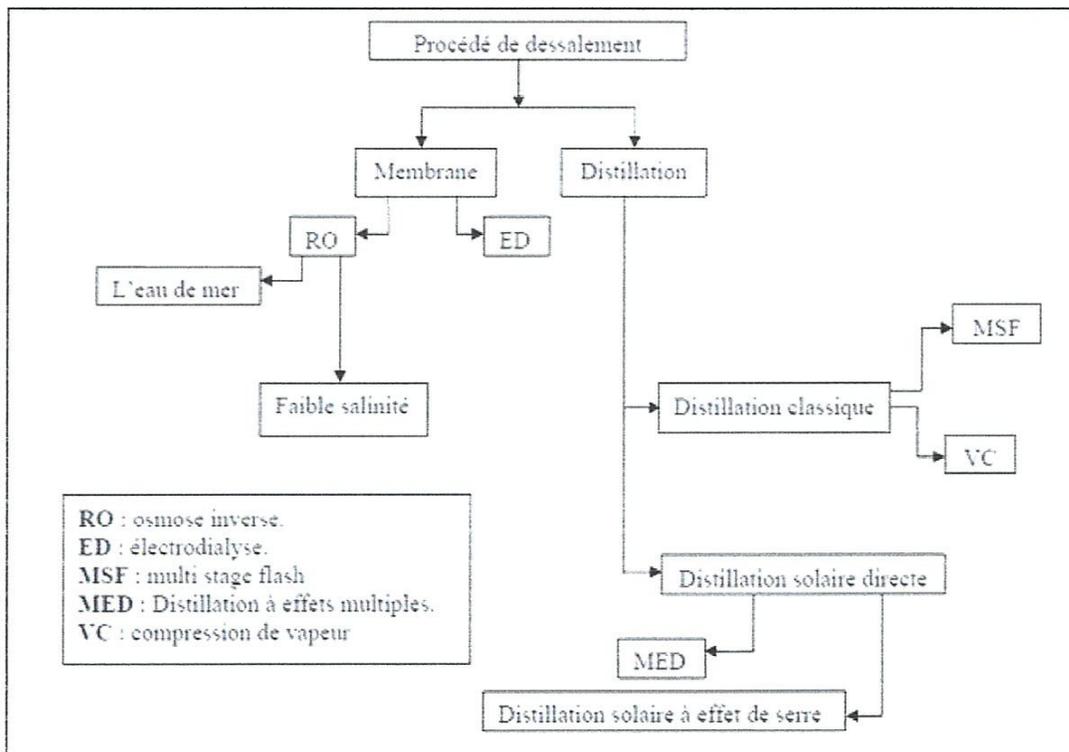


Figure II.1: Les principaux procédés de dessalement [13]

II.2.3.1. Procédés à membrane

Les principaux procédés à membranes utilisés dans le domaine du dessalement sont : l'électrodialyse et l'osmose inverse.

a) Electrodialyse à membrane sélective (ED)

L'électrodialyse est une méthode électrochimique dans laquelle le sel est séparé de l'eau par transfert d'ions suivant un principe des plus simples. Les sels dissous sont ionisés, c'est-à-dire constitués par des atomes qui, au lieu d'être neutres, sont porteuses d'une charge positive ou négative. Par exemple, le sel de cuisine (Na Cl), lorsqu'il est dissout, donne, dans l'eau, des ions positifs de sodium (Na⁺) et des ions négatifs de chlore (Cl⁻).

Elle consiste en l'utilisation de la mobilité des ions d'un sel dissous soumis à un champ électrique, dont l'application, entre une cathode et une anode permet la migration des ions (positifs et négatifs) à travers les membranes. Les anions gagnent l'anode, les cations la cathode. Le transfert des charges électriques est effectué par les ions, qui les transmettent aux électrodes.

Le dessalement est assuré par une alternance de membranes cationiques (perméables aux Cations) et de membranes anioniques (perméables aux Anions). Elles séparent des compartiments où la teneur ionique s'appauvrit, de compartiments recueillant les sels extraits.

[13]

Dans certains compartiments de la cuve, on peut donc collecter les ions retenus par chacune de ces deux membranes. Ainsi, des cellules où l'eau contient une concentration de sel alternent avec d'autres où l'eau a été dessalée. Lorsque l'eau est suffisamment dés ionisée (dessalée), elle est extraite de ces cellules [14].

En fait, l'électrodialyse a été surtout envisagée jusqu'ici pour le dessalement d'eaux Saumâtres, dont la salinité ne dépasse pas 1%, le procédé n'étant pas rentable pour des teneurs supérieurs en sel. L'électrodialyse n'est pas non plus pratiquée pour traiter les eaux à moins de 0.04% de sels. Malgré ces limitations, plusieurs petites usines de dessalement par électrodialyse sont exploitées dans le monde sur des bases commerciales.

La plus grande installation d'électrodialyse traite 10 000 m³ par jour. Les industries d'électrodialyse se concentrent en Russie, aux Etats-Unis et au Moyen Orient.

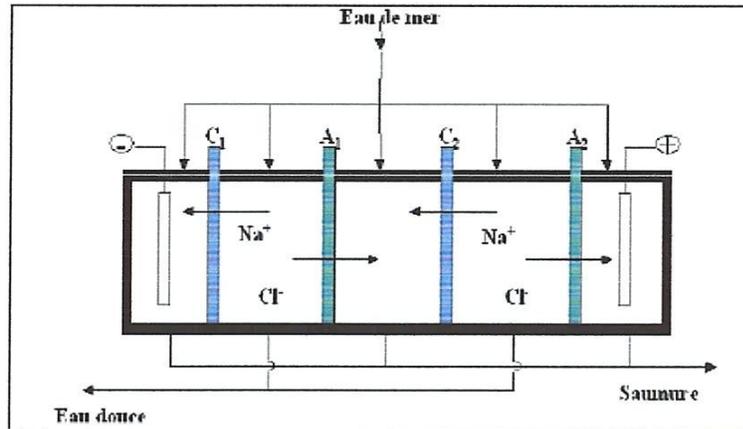


Figure II.2: L'electrodialyse

b) L'osmose inverse (OI)

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10^{-7} mm de taille.

L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression. La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de 0,5 g / l.

Principe de l'osmose inverse

On appelle osmose le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration.

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (**figure II.3**). Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

Une augmentation de la pression au delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (voir figure 1), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse.

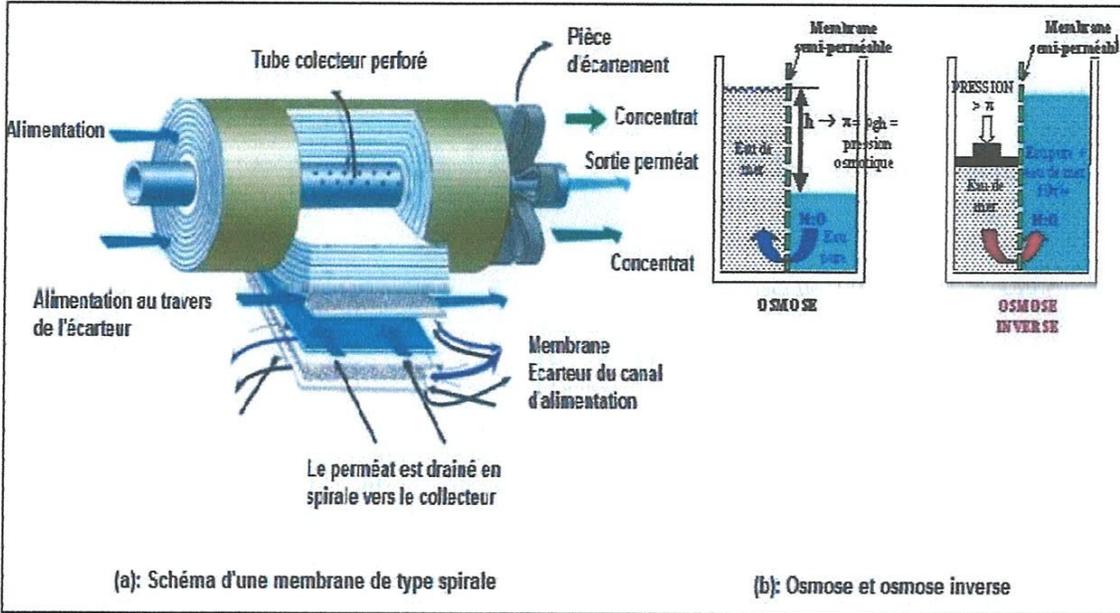


Figure II.3: Principe de l'osmose inverse (OI)

Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

Les éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse sont schématisés sur la figure II.4

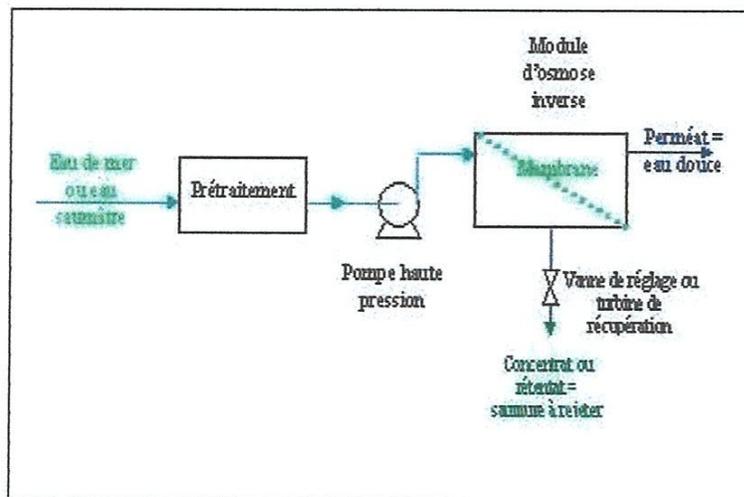


Figure II.4: Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

Le dessalement par osmose inverse nécessite d'abord un prétraitement très poussé et coûteux de l'eau de mer pour éviter le dépôt de matières en suspension (le sable et les colloïdes) sur les membranes qui conduirait très rapidement à une diminution des débits produits.

Après l'osmose inverse, on obtient une eau très pure possédant des mesures parfaites pour la Santé comme les eaux provenant des sources les plus naturelles [15].

II.2.3.2. Les procédés de distillation

Dans les procédés de distillation, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait d'accélérer le cycle naturel de l'eau.

En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.

L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet pour transformer 1kg d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à la même température il faut environ 2250 kilojoules (si le changement d'état se fait à 100°C).

Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

Deux procédés se partagent le marché du dessalement thermique : le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF) et le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).

a) Le procédé de distillation à détente étagée (MSF)

Sous les conditions de saturation, un liquide peut bouillir s'il y a un apport de chaleur ou une réduction de pression. Ce dernier cas est le procédé connu sous le nom de "Procédé par évaporation flash", donc dans le système multi stage flash l'eau est portée sous Pression à une température de saturation. Elle est introduite dans une enceinte à pression réduite où se produit une vaporisation immédiate.

L'eau de mer et le saumâtre sont envoyés dans l'installation à la température T_F elle est préchauffée jusqu'à une température maximale par une source de chaleur extérieure. Après cette étape, la saumure chaude se refroidit par une séquence de détente produisant de la vapeur, en fin cette vapeur se condense dans des condenseurs pour produire du distillat (eau douce). Ce procédé sera détaillé dans le chapitre III.

b) Le procédé de distillation à multiples effets (MED)

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C.

L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs.

La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur.

La vapeur ainsi produite dans le 1er effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2^{ème} effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2^{ème} effet et ainsi de suite (voir figure II.5). Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m³ d'eau douce produite) [16].

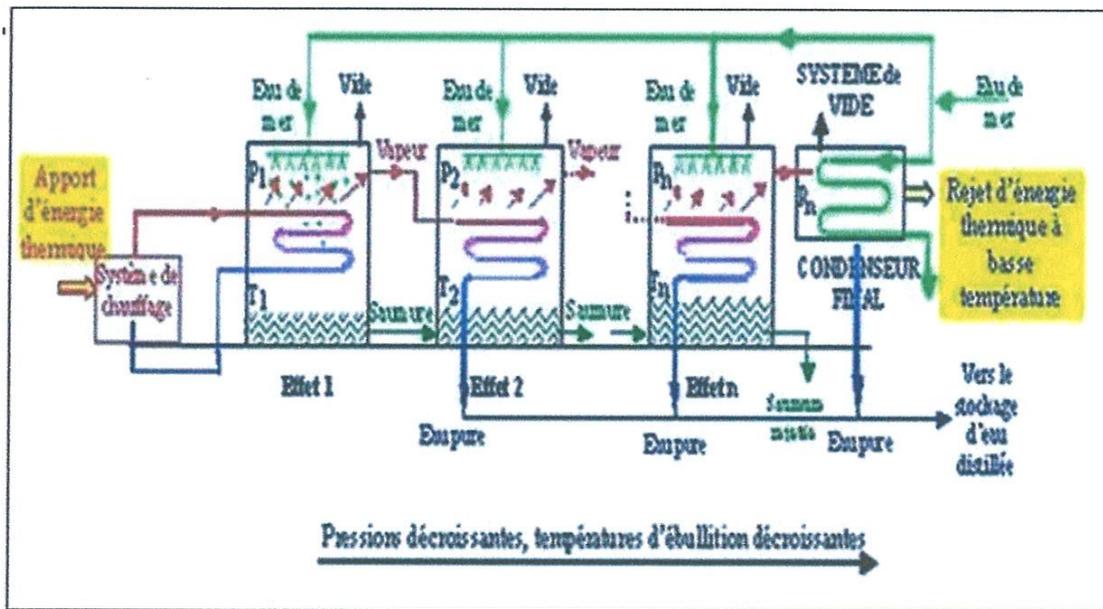


Figure II.5: Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière produisant le fluide de chauffage pour le premier effet. On peut cependant utiliser des chaleurs résiduelles en couplant le procédé MED à des usines de production d'électricité ou des usines rejetant produisant les eaux résiduelles à des températures de l'ordre de 80°C. Il faut également de l'énergie électrique pour les pompes de circulation et la production de vide.

Afin de limiter la consommation d'énergie thermique, il est aussi possible d'utiliser la compression mécanique de vapeur (MVC). Ceci est possible dans le cas de l'évaporation simple ou multiple effet. La vapeur produite dans le dernier effet ou dans l'effet unique (pour de petites unités) est aspirée par un compresseur.

Après compression, la température de saturation de la vapeur haute pression est augmentée. Cette vapeur peut donc être utilisée (elle est envoyée dans les tubes du faisceau tubulaire) pour porter à ébullition l'eau de mer dans l'évaporateur où règne une pression plus faible. La vapeur haute pression est ainsi condensée et se transforme en eau distillée liquide et le cycle se reproduit avec la vapeur produite par l'évaporation partielle de l'eau de mer.

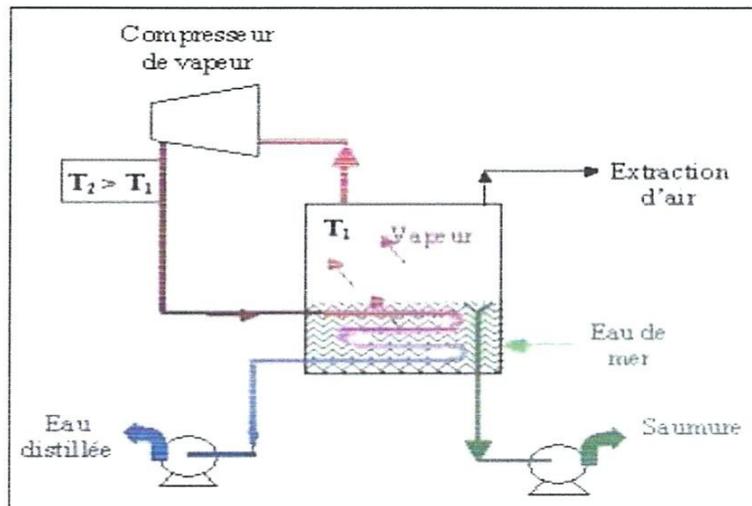


Figure II.6: Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec Compression de vapeur

Dans le procédé MED, l'ébullition de l'eau de mer au sein de chaque cellule (effet) se fait au contact de la surface d'échange de chaleur, il y a des risques d'entartrage dû à la précipitation de sels tels que CaSO_4 ou CaCO_3 dont la solubilité diminue quand la température augmente. Pour limiter ces risques, il faut donc utiliser un traitement à l'acide et limiter la température de tête (du 1er effet ou étage) à moins de 70°C.

A titre d'information, pour comprendre la nécessité de réduire la pression dans les systèmes multiples-effets ou à détente étagées, la figure II.7 donne l'évolution de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression.

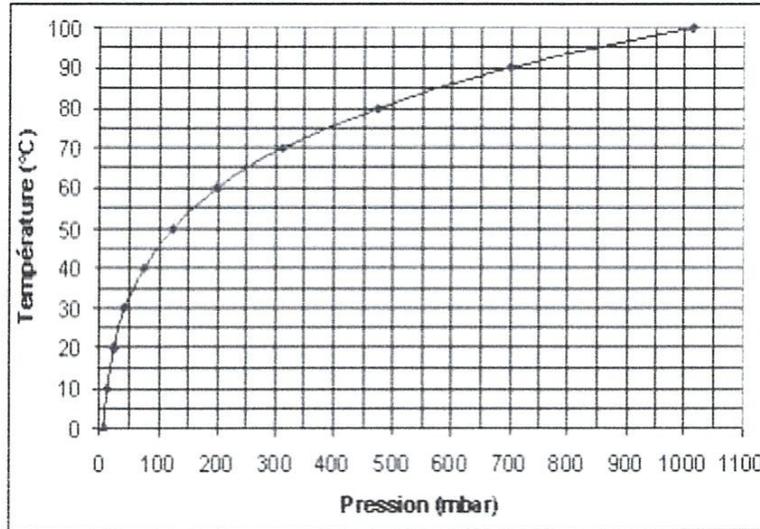


Figure II.7: Evolution de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression

C) compression a vapeur thermique (TVC)

La principale différence entre cette compression et celle du type à compression de vapeur mécanique est que la vapeur est comprimée thermiquement par un compresseur de type jet de vapeur, plutôt qu'un compresseur actionné par un moteur électrique.

L'eau de mer évaporée dans une chambre se condense à l'intérieur des tubes de la chambre suivante comme distillat. L'eau de mer pulvérisée et non évaporée de n'importe quelle chambre sera collectée au bas d'une chambre et constituera une partie de la saumâtre. Cette dernière quittera cette chambre pour la chambre suivante et où une quantité d'eau sera évaporée. Tandis que le distillat s'écoule dans le collecteur de la chambre suivante où une quantité s'évapore et qui va se condenser à l'intérieur des tubes entre les chambres. La même procédure de séparation est répétée dans chaque chambre et entre les chambres. Le reste de la vapeur produite dans la dernière chambre est considérée comme distillat. Pour récupérer la chaleur du distillat quittant l'évaporateur, la vapeur est séparée du distillat et condensée. Seulement une partie de l'eau de mer s'écoulant à travers les tubes du condenseur et qui condense la vapeur sera utilisée comme alimentation. Le reste avec toute sa chaleur est rejeté à la mer.

II.2.3.3. Autres procédés de dessalement

a) Congélation

Le procédé de congélation est identique au RO et au MVC, qui récupèrent l'eau à partir des solides dissous à l'aide d'une force motrice.

L'équipement principal de refroidissement ressemble beaucoup au réfrigérateur domestique. Cependant plusieurs méthodes sont utilisées pour le refroidissement de l'alimentation. La méthode la plus répandue est le contact direct entre l'alimentation et le réfrigérant tels que le Fréon. Quand la pression qui règne sur le réfrigérant baisse, ce dernier se volatilise et refroidi l'alimentation. Cette dernière se dépose en cristaux de glace d'eau d'une pureté très appréciée, laissant ainsi les sels dissous dans la saumâtre. Le réfrigérant évaporé est alors comprimé de nouveau et liquéfié pour être recyclé dans le congélateur.

Les cristaux de glace montent en surface dans une chambre froide et forment des blocs de glaces poreuses. Une lame mécanique réduit ces blocs en coupons très fins qui sont fondus pour produire de l'eau pure. Une quantité de cette eau produite est renvoyée vers des blocs de glace et utilisée comme eau de rinçage. Avant d'être déchargé du système, le produit et la saumâtre résiduels sont acheminés dans un échangeur de chaleur pour refroidir l'alimentation.

b) Distillation Solaire Directe

La distillation solaire est un procédé simple et pouvant être appliqué de façon rustique mais elle ne convient évidemment qu'aux régions où l'ensoleillement est suffisant. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente. Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, Couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel [17].

II.2.4. Comparaison entre les procédés

Tableau II.3: La comparaison des procédés de dessalement eau de mer [18]

| | MSF | MED | MED-TVC | MVC | OI |
|--|------------------------------|------------------------------|----------------------|---|--------------------------------|
| Température de fonctionnement (°C) | <120 | < 70 | < 70 | < 70 | <45 |
| Principale source | Thermique | Thermique | Thermique | Thermique Mécanique (via électricité) | Mécanique (via électricité) |
| Consommation d'énergie thermique (kWh/m ³) | 12 | 6 | 21 | Pas applicable | Pas applicable |
| Consommation électrique (kWh/m ³) | 3.5 | 1.5 | 1.5 | 8-14 | 4-7 |
| Salinité de l'eau brute (g/l) | 30 – 100 | 30 – 100 | 30 – 100 | 30 – 50 | 1 – 45 |
| Salinité de l'eau traitée (mg/l) | < 10 | < 10 | < 10 | <10 | < 500 |
| Capacité d'un train (m ³ /j) | 5.000– 60.000 | 500 – 12.000 | 100 – 20.000 | 10 – 2.500 | 1 – 10.000 |
| Avantages | Technique éprouvée | 20 %moins cher que le MSF | Capacité, Robustesse | Simplicité | Modularité |
| Inconvénients | Investissement, Consommation | Capacité plus faible que MSF | Consommation | Capacité | limitée Fragilité |

D'après le Tableau (II.3) on peut dire que l'avantage du procédé de dessalement MSF, semble être une solution aux pays en punerie d'eau permettant de produire des quantités importantes comparée au autres procédés, un autre avantage c'est que cette technique utilise l'énergie thermique qu'on peut facilement l'obtenir à partir d'une source d'énergie inépuisable comme le rayonnement solaire. En revanche, la consommation d'énergie électrique et le coût d'investissement présentent un obstacle à la réalisation de cette guerre de projet.

II.2.5. Coût du dessalement dans le monde

Le coût final du m³ d'eau dessalée ne peut être fourni de façon générale et précise. Il varie, évidemment avec les conditions économiques locales, l'époque de la construction de l'usine, la technique de dessalement, les caractéristiques de l'eau à dessaler (fort variables

selon le type de mer) la position par rapport au rivage et aux consommateurs et, bien entendu en fonction du prix de l'énergie thermique et de l'électricité. On constate simplement que les prix de revient ont une tendance générale à baisser, avec l'accroissement de la taille des installations et l'apport technologique.

Le calcul théorique du coût énergétique du dessalement pur d'une eau à 35g/l, et dans les meilleures conditions possibles est de 0,536 kWh/ m³.

Nous présentons ci-dessous quelques coûts moyens unitaires du dessalement pour des installations en fonctionnement.

Tableau II.4: Variation du coût de dessalement avec le procédé exploité au 2006 [19]

| Types d'eau | Technologie | Coût (\$/ m ³) |
|-------------------|--|----------------------------|
| Eau de mer | La technique d'évaporation (MSF) | 0.37 – 1.07 |
| | La distillation par effet multiple (MED) | 0.51 – 0.70 |
| | La thermo compression par vapeur (TCV) | 0.78 – 1.05 |
| | Osмосe inverse (OI) | 0.38 – 0.78 |
| | Hybride avec congélation | 0.17 – 0.37 |
| Saumâtre | Osмосe inverse (OI) | 0.17 – 0.37 |
| | L'électrodialyse (ED) | 0.19 – 0.35 |

II.2.6. Impact environnemental du dessalement

Le dessalement de l'eau a un impact à la fois positif et négatif sur l'environnement. Le principal effet positif direct est un accroissement des disponibilités en eau. L'impact positif Indirect sur l'environnement découle d'une salinisation réduite du sol grâce à une irrigation à base d'eau dessalée par rapport à l'utilisation d'eaux saumâtres.

Les répercussions négatives sur l'environnement peuvent tenir à divers éléments: évacuation de la saumure ou des eaux résiduelles produites par le dessalement; additifs chimiques anti-scalants ou anticorrosion; impact visuel au niveau du paysage; bruit; émission de gaz à effet de serre dérivant de la consommation d'énergie; etc. par ailleurs, l'évacuation de la saumure résiduelle dans les zones côtières ou intérieures n'a pas la même incidence, l'opération étant plus complexe dans le second cas tandis que les rejets directs dans les régions Côtières ont des retombées sur l'écosystème marin.

Chapitre III

**Le procédé de distillation à
détentes étagées (multi-
stage flash distillation
MSF)**

III.1.ETUDE THEORIQUE DU PROCÉDE DE DISTILLATION MSF

Le but d'un système de dessalement est de purifier l'eau saumâtre des matières dissoutes totales et en particulier des sels dans la limite autorisée est de 500 ppm ou moins. Ceci est accompli par plusieurs méthodes de dessalement, dont le MSF apparue en 1960 est le procédé le plus populaire pour le dessalement de l'eau de mer. En 1985, plus de 95.7% de l'eau dessalée produite à partir de l'eau de mer est fournie par le MSF [18].

III.1.1.Description du procédé de distillation Multi-Stage Flash (MSF)

Comme nous l'avons défini précédemment (chapitre II), ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore (figure 1) puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes.

C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré.

Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.

Le cycle flash-refroidissement est répété autant de fois de la même manière d'un étage à un autre jusqu'à ce que la saumure et le distillat seront déchargés respectivement comme une saumure de forte concentration en sel et un distillat de faible concentration en sel.

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, cette eau circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un filtre constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte.

Il existe deux types de MSF, Le premier est le MSF once through (Figure III.1) et le second est le MSF à recirculation (Figure III.2). La différence principale est que dans le MSF once through, la saumâtre obtenue après distillation de l'eau de mer est déchargé en totalité. Tandis que pour le deuxième type de procédé seulement une partie de cette saumâtre est recyclée. Par conséquent, pour l'unité à recirculation le coût des produits chimiques sera réduit de 30 % par rapport à celui de l'unité once through [20].

Cependant, il est généralement pratique de recycler une fraction de saumâtre, qui combinée avec l'alimentation permet l'extraction d'une quantité supplémentaire de distillat.

Il est à noter que la saumâtre recyclée, passant à l'intérieur des tubes et qui condense la vapeur dans chaque étage, récupère la chaleur latente de condensation de la vapeur. Ainsi, la saumâtre recyclée est presque préchauffée à la température opératoire maximale tout en récupérant la chaleur de la vapeur condensée. Cette partie du procédé représente la "section de récupération de chaleur" ou "section d'enrichissement". Cette saumâtre préchauffée atteindra finalement une température opératoire maximale dans un bouilleur alimenté en vapeur par une source extérieure.

Tandis que dans l'autre partie du procédé, où est localisée la sortie du distillat, une installation de faisceau de tubes permet la récupération de la chaleur perdue. Cette partie du procédé représente la "section de la chaleur perdue" ou "section d'épuisement" et où le réfrigérant n'est pas forcément de la saumâtre recyclée, mais de l'eau de mer. Une petite quantité de ce réfrigérant devient une partie de l'alimentation, tandis que l'autre quantité est rejetée à la mer.

La vitesse de libération de vapeur à partir des surfaces de saumure flashée doit être aussi faible que possible afin de minimiser la quantité de saumure. La vitesse maximale ne doit pas dépassée 8-9 m/s et est assurée par une surface adéquate (longueur et largeur) pour la chambre de détente.

Il est a noté, que le MSF est la technique de dessalement la plus simple. Une fois que les orifices inter-étages ont été ajustés, l'unité peut opérer pendant de longues périodes sans même réajuster ses débits. Cependant un (01) pound de vapeur peut produire plusieurs pounds de distillat.

Un rendement d'énergie élevée peut être atteint-en :

- ✓ Introduction d'un grand nombre d'étages possible et une surface de transfert de chaleur aussi grande que possible dans le design de l'unité.
- ✓ Augmentation au maximum de la température de la saumâtre, mais au risque d'augmenter le taux d'attaque de corrosion et par conséquent le dépôt de tartre.
- ✓ Utilisation de tubes d'une grande conductivité thermique.
- ✓ Introduction des techniques adéquates pour le contrôle du dépôt de tartre.
- ✓ Utilisation des techniques performantes de design, de fonctionnement et de maintenance afin d'éviter l'accumulation de gaz non-condensables.

Certaines de ces étapes qui augmentent l'efficacité du procédé, i.e. réduisent la consommation de l'énergie, peuvent augmenter d'une manière directe le coût capital de l'unité.

Les développements récents ayant pour objectifs de réduire le coût capital du MSF consistent à la substitution des tubes en alliage d'Aluminium par des Alliages coûteux tels que le Titanium et le Cuivre-Nickel. Une autre variante consiste à réduire les dimensions et l'utilisation des designs en verticale et en horizontal des étages de séparation.

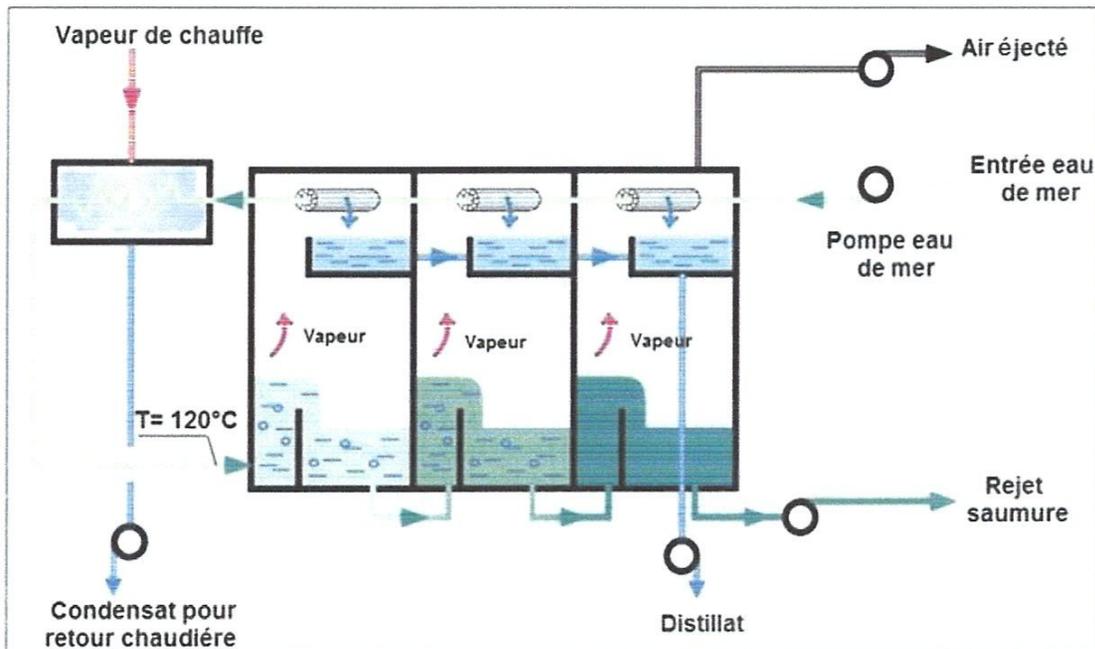


Figure III.1: Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives MSF à 3 étages MSF once through.

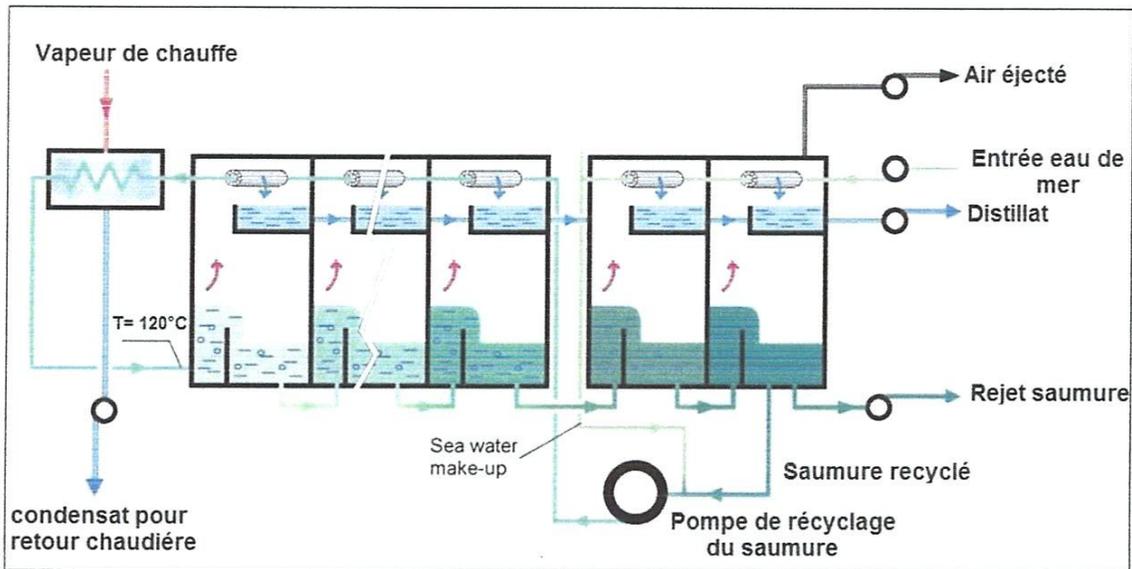


Figure III.2 : Principe de fonctionnement d'un système par détente successive MSF à 3 étages* MSF à recirculation*

Vu la température élevée dans les premières cellules, il est nécessaire d'effectuer un prétraitement important pour limiter l'entartrage.

Afin de diminuer le volume d'eau salée à prétraiter, on recycle la saumure au maximum au lieu de l'évacuer.

III.1.2. Installations de dessalement du procédé MSF

Le MSF travaille dans une plage de température entre 30 à 120°C , le système commence à fonctionner avec une pression maximale de 2 bars.

III.1.2.1. Les installations constituant le procédé MSF

Les usines de dessalement par MSF sont organisées selon le schéma suivant [21].

- 1. Une unité de pompage:** La plupart du temps, on pompe l'eau de mer mais parfois, des eaux souterraines qui peuvent présenter une salinité qui les rend impropres à la consommation.
- 2. Une unité de décantation:** Constituée de grandes cuves permettant le dépôt des impuretés les plus denses.
- 3. Une unité de prétraitement** avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides (une chloration) pour empêcher la prolifération de microorganismes et de produits anti-tartré, pour limiter les dépôts de carbonate de calcium.

4. **Une unité de désalinisation:** C'est le système qui retire les sels de l'eau brute.
5. **Une unité de traitement des eaux usées** (généralement par floculation et filtration) avant rejet.
6. **Systèmes auxiliaires:** Ils comprennent les systèmes d'alimentation électrique, les systèmes de dosage chimique, les systèmes de contrôle et d'instrumentation, etc.
7. **Le post-traitement** avec une éventuelle reminéralisations de l'eau produite. Le post-traitement de l'eau douce, à la sortie, est destiné à la potabiliser. Il s'agit d'une Aération et 'une légère correction de pH par ajout de carbonate de calcium. Dans certains cas on opère un traitement à l'ozone pour éliminer des germes éventuels.
8. **Une source d'énergie**, nécessaire notamment au pompage, à la mise sous pression de l'eau, etc. Elle peut être, par ordre décroissant d'investissement :

- ✓ l'énergie solaire, source d'énergie séduisante car renouvelable et non polluante, mais limitée aux petites installations de quelques kilowatts pour quelques heures d'utilisation.
- ✓ l'énergie éolienne permet une bonne production si les vents sont réguliers toute l'année, ce qui est souvent le cas en BORD de mer.
- ✓ le groupe électrogène qui apporte une réponse sûre et permanente, mais la consommation en énergie fossile est importante.
- ✓ le réseau électrique lorsque celui-ci est existant.
- ✓ l'énergie nucléaire. Des usines de désalinisation peuvent être couplées à des générateurs (ex : Aktau, Kazakhstan). De nombreuses études sont actuellement menées en ce sens (Japon, Libye...).

III.1.2.2.L'unité de dessalement

Une unité de dessalement MSF à simple passage est constituée par les dispositifs suivants :

- 1) L'étage de détente ayant les dimensions normalisées [18x3x4] (largeur x longueur x hauteur). C'est une grande piscine de saumure.
- 2) Le condenseur c'est un faisceau de tubes d'échange de chaleur entre l'eau de mer à l'état froide et le distillat pour condenser ce dernier.
- 3) Le séparateur des gouttelettes c'est un élément qui empêche les gouttelettes entraînés par la vapeur de passer au condenseur.

- 4) Un extracteur qui enlève les gaz non condensables dissous dans l'eau de mer d'alimentation et sert aussi à l'évacuation de l'air.

III.1.3.Performances du procédé MSF

Les performances des installations MSF et des usines thermiques en général, sont mesurées soit par le rapport de la masse de distillat générée par unité de masse de vapeur injectée, ce qu'on appelle ratio de gain opérationnel (RGO ou GOR gain output ratio), soit par le rapport de la masse de l'eau distillée produite à l'énergie thermique de la vapeur nécessaire à sa production, rapport appelé performance ratio (PR).

- ✓ Plus le RGO et le PR sont élevés, plus ils produisent de distillat en utilisant une quantité donnée de vapeur injectée ; et plus l'unité est efficace. Cependant, plus de modules sont nécessaires pour atteindre des RGO et PR plus élevés, ce qui entraîne un coût d'investissement plus important.
- ✓ Une MSF de petite capacité avec un ratio de performance 6 nécessite environ 70-80 kWh d'énergie thermique équivalente / kilo d'eau distillée produite, en plus d'une consommation électrique de 4-6 kWh/m³ pour le pompage et les systèmes auxiliaires.
- ✓ Il est à noter qu'en convertissant l'énergie thermique en consommation électrique équivalente, le rendement de la conversion doit être pris en compte. Doosan Heavy Industries & Construction a créé la plus grande unité d'évaporation multi flash (MSF) d'une capacité de 91 000 m³/jour pour l'usine de dessalement de Ras Al Khair en Arabie Saoudite.

III.1.4.Avantages et Inconvénients du procédé

III.1.4.1.Avantages

- ✓ Technologie relativement facile à maîtriser avec des centaines d'installations en fonctionnement dans le monde entier depuis plusieurs années et couronnées de succès. Surtout dans les pays producteurs de pétrole,
- ✓ L'intérêt principal de la technologie MSF apparue dans les années 50 qui est relativement facile à maîtriser réside dans le fait qu'il est possible de construire des unités fiables de très grande taille. C'est donc elle qui est utilisée pour les grands complexes de dessalement, surtout dans les pays producteurs de pétrole, et elle assure

plus de 60% de la capacité mondiale installée à ce jour sur l'eau de mer malgré son énorme consommation énergétique.

- ✓ Le procédé MSF dispose de la plus grande capacité installée parmi tous les processus de dessalement grâce à l'évolutivité, à la fiabilité et à la robustesse du procédé.
- ✓ Produit Une Eau Très Faible En TDS
- ✓ Nécessite un prétraitement minimal par rapport aux procédés OI.
- ✓ La composition de l'alimentation n'a presque aucun effet sur la consommation de l'énergie par pound de distillat. Ceci est directement opposé aux performances d'autres procédés de dessalement où la consommation en énergie est directement liée à la composition de l'alimentation.
- ✓ Le chauffage à haute température provoque l'élimination de toutes les impuretés et microbes de la solution d'eau de mer.

III.1.4.2. Inconvénients

- ✓ Le principal inconvénient reste le prix de ce procédé qui est assez cher. En effet, cette technique utilise énormément d'énergie pour chauffer l'eau, avec du gaz ou du pétrole, puis la refroidir. Le prix de l'eau augmente alors d'1€ par m³ d'eau. Elle est rentable seulement que si de la vapeur/énergie thermique à faible coût (gratuit) est disponible.
- ✓ Le procédé n'est pas très écologique puisqu'il rejette beaucoup plus de CO₂, gaz à effet de serre, que les autres techniques de dessalement. Les centrales thermiques reliées aux usines de dessalement par distillation utilisent des énergies fossiles traditionnelles [22].
- ✓ L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière, cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer.
- ✓ L'énergie thermique nécessaire est moins dépendante de la salinité de l'eau d'approvisionnement et donc peu économique pour le dessalement de l'eau saumâtre.
- ✓ Les besoins en produits chimiques pour la reminéralisations sont élevés comparés au procédé OI.
- ✓ Ce procédé, généralement rentable seulement pour de grandes capacités de production (Plusieurs centaines de milliers de m³), est très peu souple et nécessite une durée de mise en régime inadéquate.

III.1.5. Les problèmes rencontrés dans un procédé de dessalement MSF

III.1.5.1. L'entartrage

Il est dû au dépassement de solubilité de certains sels alcalinoterreux, dont notamment le carbonate de calcium (tartre vulgaire). Cette limite de solubilité peut être facilement atteinte en particulier pour les eaux à forte dureté calcique et à teneur élevée en ions bicarbonates. L'entartrage est généralement associé à la production d'un solide cristallin fortement adhérent et dense sur les surfaces d'échanges généralement métalliques sous forme de tartre dur [23].

Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être remplies :

- ✓ La limite de solubilité du sel contenu dans l'eau doit être dépassée.
- ✓ La vitesse de dépôt doit être suffisamment rapide.

Les sels entartrant sont des sels à solubilité inverse, c'est-à-dire des sels dont la solubilité diminue lorsque la température augmente. Pour ces sels, c'est donc au contact de la paroi chauffante, où la température est maximale, que la solubilité est minimale [24].

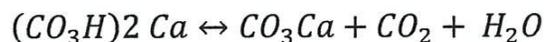
Les principaux ions directement ou indirectement responsables de l'entartrage sont : calcium, magnésium, bicarbonates et sulfates [20]. La composition des dépôts dépend de la température :

- ✓ En dessous de 85°C, le dépôt de CaCO_3 presque pur.
- ✓ De 85°C à 120°C, il y a prédominance de $\text{Mg}(\text{OH})_2$.
- ✓ Au dessus de 120°C il y a prédominance de CaSO_4 .

Les dépôts les plus rencontrés sont : Les carbonates, les hydroxydes et les sulfates [25]

1) Les carbonates

Le plus courant est le carbonate de calcium, sa précipitation dépend principalement de la température, du pH et des gaz dissous, il se forme par libération de CO_2 suivant l'équilibre :

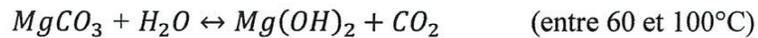


Certains facteurs extérieurs peuvent agir sur cet équilibre en le déplaçant dans le sens de la précipitation du CO_3Ca ; Ces facteurs sont essentiellement la température et la pression.

2) Les hydroxydes

L'hydroxyde le plus courant est l'hydroxyde de magnésium $Mg(OH)_2$ [26].

Sa précipitation se produit souvent dans les bouilleurs /évaporateurs par suite d'un traitement insuffisant de l'eau. L'évaporation de l'eau de mer à des températures élevées et /ou à des pH élevés entraîne la précipitation selon la réaction suivante :



3) Les sulfates

Les sulfates les plus courants sont les sulfates de calcium, de sodium et de potassium [26].

La formation du tartre peut être un sérieux obstacle au bon déroulement du transfert de chaleur par réduction de la section de passage.

Dans le but de limiter les risques et d'augmenter le taux de concentration du circuit, l'eau sera traitée par :

Adoucissement de l'eau sur résines échangeuses d'ions.

Décarbonatation sur résines qui abaisse à la fois la dureté TH et l'alcalinité TAC de l'eau.

Déminéralisation de l'eau sur résines.

III.1.5.2. La corrosion

C'est un processus électrochimique qui dépend de nombreux facteurs:

- Salinité de l'eau.
- Répartition ionique de l'eau.
- Forte aération de l'eau.
- Hétérogénéités des surfaces des métaux baignés par l'eau.

Une des méthodes de protection contre la corrosion consiste à régler le pH et l'alcalinité de l'eau pour que celle-ci soit à l'équilibre calco-carbonique par ajout de réactifs alcalins ou acides (le procédé dit d'équilibre naturel).

III.2. MODELISATION DU PROCEDE

L'objectif de notre étude consiste à analyser une installation MSF qui est composée de N étages, en vue de calculer la quantité d'eau distillée, recyclée, l'énergie consommée, la

disponibilité du procédé, et le coût annuel total. L'analyse va être basée sur les hypothèses suivantes :

Les paramètres suivant sont fixes :

1. La quantité d'eau de mer d'alimentation (alimentation).
2. La température de l'eau de mer à l'entrée de l'unité T_F .
3. La température de vapeur T_{max} .
4. La différence de température entre l'entrée et la sortie de l'étage est la même pour tous les étages.

Par ailleurs on néglige les pertes de chaleur dans les étages, tout en supposant que géométrie des étages est la même.

Le modèle du procédé, dans notre cas d'étude est représenté dans la figure suivante :

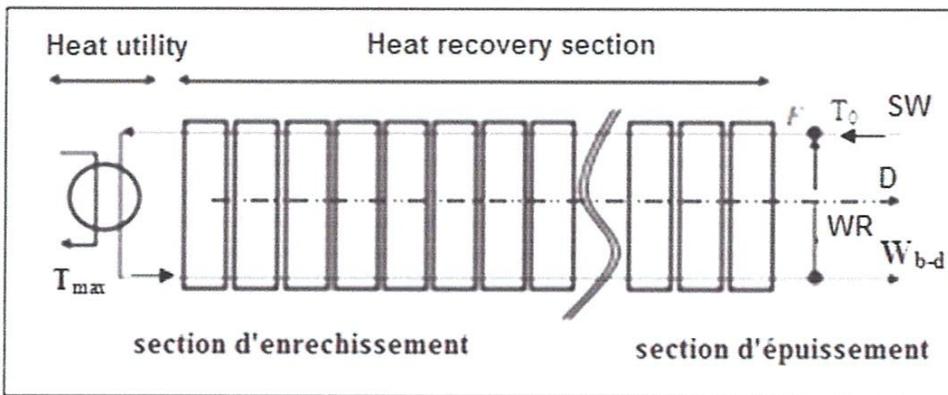


Figure III.3: Multi stage flash - système de dessalement de mélangeur.

III.2.1. Modèle mathématique du procédé MSF

- Bilan Global:
$$F = SW + W_R \quad (18)$$

- Bilan par composé

$$F \times C_p \times T_F = SW \times C_p \times T_0 + W_R \times C_p \times T_{b-d} \quad (19)$$

$$F = PROD + W_R \quad (20)$$

$$W_R = R \times W_{b-d} \quad (21)$$

Où :

F: Le débit total d'alimentation en eau de mer $SW + W_R$

SW : Le débit d'eau de mer a température T_0 .

W_R : La saumâtre recyclée.

PROD : Le débit distillé (production d'eau potable).

W_{b-d} : La saumâtre rejetée.

R : Rapport de recirculation.

C_p : Capacité calorifique d'eau à pression constante.

T_F : Température du mélange de l'eau de mer à l'entrée de l'unité avec la saumâtre recyclée.

T_0 : Température d'eau de mer à l'entre de l'unité.

T_{b-d} : Température de la saumure rejetée.

III.2.2.L'équation de l'énergie [28]

$$Q^{Des} = F \times C_p \times \Delta t \quad (22)$$

Q^{Des} : La chaleur consommée pour chauffer l'eau de mer.

C_p : La capacité calorifique de l'eau de mer (chaleur spécifique).

Δt : La différence de température entre deux étages, ou les pertes thermiques durant le passage de distillat jusqu'à condensation considérée comme constante dans tous les étages.

$$\Delta t = \Delta t_f + \Delta t_e + BPE \quad (23)$$

Où :

Δt_f : Baisse de température lors de passage de la vapeur d'un étage à un autre.

Δt_e : Force motrice efficace pour l'opération de transfert de chaleur.

BPE: Elévation de point d'ébullition.

La surface d'échange de chaleur est un paramètre très important dans les calculs d'échange de chaleur est obtenue à partir de l'équation :

$$A_t = \frac{F C_p}{U} \times NS \times \frac{\ln(\Delta t - EPE)}{\Delta t_e} \times \frac{(T_{max} - \Delta t - T_0)}{\Delta t_f} \quad (24)$$

Où :

U : Coefficient d'échange global

NS : Nombre d'étages

$$NS \times \Delta t_f = T_{max} - \Delta t - T_0 \quad (25)$$

Donc la production totale de distillat pendant le temps de disponibilité de l'unité est comme suit:

Donc la production totale de distillat pendant le temps de disponibilité de l'unité est comme suit:

$$PROD = F \left[1 - \left(1 - \frac{C_{p,m} \times \Delta t_f}{\lambda} \right)^{NS} \right] \quad (26)$$

$C_{p,m}$: La chaleur spécifique moyenne de l'alimentation eau de mer + la saumure recyclée.

Les relations entre la surface de transfert de chaleur (A_t), le nombre de tubes (N_t), le diamètre de chaque tube (D), la largeur (B) et la hauteur (HS) de la chambre sont données par les équations suivantes:

$$A_t = \pi T \times D \times B \times N_t \times NS \quad (27)$$

$$HS \equiv 2L \times B + D_s \quad (28)$$

Les relations suivantes sont entre le nombre de rangées de tubes (N) dans la direction verticale et le nombre de tubes (N_t), le diamètre de la coque (D_s), le nombre de rangées de tubes et l'emplacement P_t , et la longueur du dessaleur (LD):

$$N = 0.481 \sqrt{N_t} \quad (29)$$

$$D_s = N \times P_t \sqrt{2} \quad (30)$$

$$LD = \frac{PROD}{B \times V_{vap} \times \rho_{vap}} \quad (31)$$

Où :

V_{vap} , ρ_{vap} : Sont respectivement la vitesse et la densité de la vapeur.

La surface totale de chaque étage est donnée par l'équation:

$$A_s = 2L \times B + 2H \times L + HS \times B \quad (32)$$

Enfin, la contrainte suivante doit être satisfaite :

$$LD = D_s \times NS \quad (33)$$

Chapitre IV

Modèle économique

La mise en œuvre de projets de dessalement nécessite un budget correspond le coût total de l'eau dessalée exprimé en unités monétaires US\$/m³ ou Euros/m³ et il est estimé en faisant la somme des investissements annuels, plus les frais de fonctionnement et d'entretien, et le coût énergétique annuel, le tout exprime en unités monétaires par an (US\$/an ou Euros/an) divisé par le volume de l'eau dessalée produite en une année.

IV.1.COUT DU DESSALEMENT

Il est très difficile de calculer le coût précis, sans une étude effectuée cas par cas prenant en compte les conditions locales à la fois techniques et économiques.

IV.1.1.Conditions techniques

Les conditions techniques sont en fonction des paramètres suivants [29]:

- ✓ Salinités de l'eau traitée : eaux de mer ou eaux saumâtre ;
- ✓ Salinité de l'eau produite : eau destinée à la consommation humaine (selon la tolérance des habitants) ou eau de haute pureté pour l'industrie, ainsi que l'agriculture, caractéristique physique de l'eau (turbidité, matière en suspensions) qui peuvent, en particulier dans le cas de l'osmose inverse, imposer un prétraitement complexe si l'eau est très polluée ou au contraire l'absence de prétraitement si l'on a une eau très propre ;
- ✓ Composition chimique de l'eau à traiter dans le cas des eaux saumâtres (dureté, teneur en sulfates) ;
- ✓ Degrés d'automatisation et de contrôle de l'unité de dessalement ;
- ✓ Source d'énergie disponible ;
- ✓ Taille de l'unité ;

IV.1.2.Conditions économiques

Ces conditions économiques, peuvent être affectés par :

- ✓ Le coût de l'énergie est nul sur une plate forme offshore, peu élevé au moyen orient, très élevé pour des sites isolés.
- ✓ Le coût des produits chimiques savant que ces produits sont fabriqués localement ou doivent subir un transport plus ou moins long.

- ✓ Fluctuation de monnaies: la variation des cours des monnaies ne permettent pas de calculer des coûts avec une grande précision. Inflation variable en fonction du pays et du temps.
- ✓ Conditions de financement (taux d'intérêt).
- ✓ Cout de la main d'œuvre.

IV.2.METHODE D'ESTIMATION DE L'INVESTISSEMENT TOTAL D'UNE UNITE DE DESSALEMENT

Cette partie décrit la méthode utilisée pour estimée le coût capital d'investissement pour le procédé de dessalement de l'eau de mer .

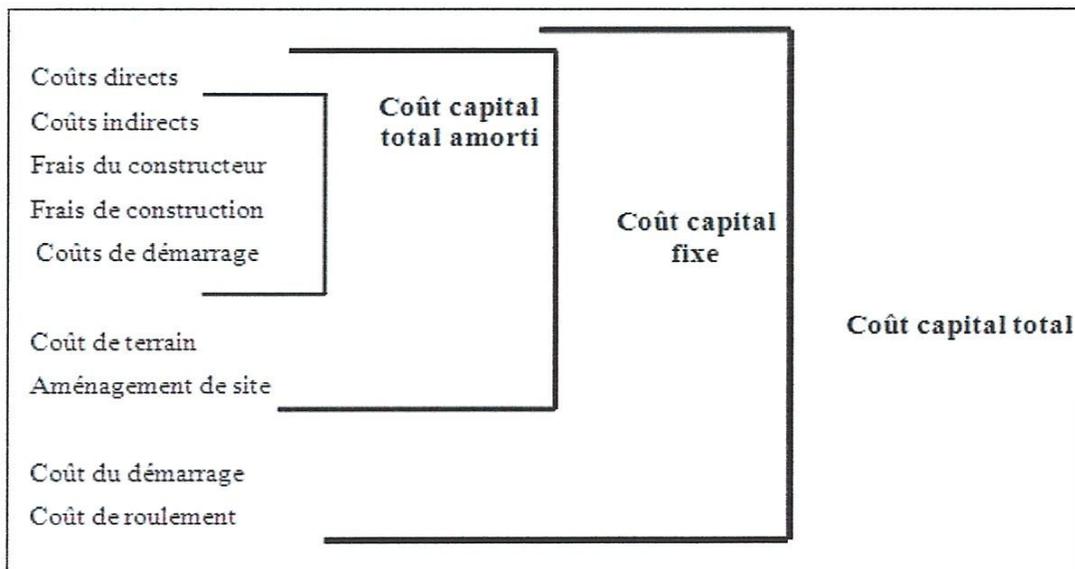
Le Coût d'investissement annuel est l'amortissement sur la vie économique du projet, Ils comprennent toutes les dépenses liées à la mise en œuvre du projet du début jusqu'a la mise en service [30].

1V.2.1.Méthode d'estimation de l'investissement

Le coût total d'une unité est considéré comme la somme total de :

- Coût capital.
- Coût d'installation.
- Coût capital de roulement.

Le coût total capital peut être schématisé comme suit :



IV.2.1.1. Coût capital direct

Cette rubrique couvre généralement les coûts des équipements et leurs accessoires aussi bien des unités que leurs annexes.

- a) Equipement délivrés.
 - b) Installation des équipements.
 - c) Instrumentation et control.
 - d) Piping.
 - e) Equipements et matériels électriques.
 - f) Bâtiments et construction.
 - g) Annexes.
1. Utilités : Filtration d'air, compression, production de la vapeur et de l'électricité chaudières, système de condensation,
 2. Offsites : Alimentation en eau ; Traitements des eaux usées ; Générateurs; Bacs de stockage.

IV.2.1.2. Coût capital indirect

Les charges de contrat et les intérêts de construction constituent l'essentielle de cette rubrique elle comporte :

- a) Engineering et supervision.
- b) Charges de construction.
- c) Charges d'encouragement qui peuvent atteindre 5% du coût direct + coût indirect.
- d) Intérêt de la construction et de l'installation.
- e) Eventualités : Mauvaises conditions météorologique, guerre, inflation, erreurs d'estimation, etc. ..., qui peuvent atteindre 10% du coût direct + coût indirect.
- f) Frais de démarrage.

IV.2.1.3. Coût Capital de roulement

Il représente les coûts de :

- a) Matières premières et fourniture en stock.
- b) Produits en stock.
- c) Remboursements.
- d) Encaissement de crédits.
- e) Taxes et assurances.

f) Cache mensuel pour le payement des dépenses telles.

IV.2.1.4. Méthodes de calculs

Le coût de roulement est estimé pour chaque type de procédé en utilisant le (Tableau An 1.1, et le (Tableau An1.2), ce coût a été estimé sur la base de :

- Taux de production de 100 %.
- Facteur de disponibilité de 85%.
- Une durée de vie de l'unité d'environ 30 ans.
- Taux d'intérêt 8%.

D'après [30], le coût capital de roulement peut être estimé par les équations suivantes :

$$C_t = C_c + C_e + C_r \quad (34)$$

Où :

C_t : Coût capital total de l'unité.

C_r : Coût capital de roulement de l'unité.

C_e : Coût de la construction de l'unité.

C_c : Coût capital de l'unité.

$$C_{rn} = C_{an} \times 1 \quad (35)$$

$$C_{an} = 8760 \times W_n \times C_n \times A \quad (36)$$

$$I = \frac{\left[1 - \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{-T}\right]}{\left(\frac{i}{100}\right)} \quad (37)$$

Ce qui donne :

$$C_{rn} = 8760 \times W_n \times C_n \times A \times I \quad (38)$$

Où :

C_{rn} : Coût capital de roulement de la rubrique n, par exemple, cette rubrique peut être de l'énergie électrique.

I : Facteurs d'actualisations.

T : Durée de vie de l'unité.

W_n : Débit de la rubrique n (voir Tableau An1.3).

C_n : Coût unitaire de la rubrique n pour un site non spécifique.

A : Facteur de disponibilité de l'unité.

i : Taux d'intérêt

IV.2.2. Méthode d'estimation du coût de production

D'après[30], le coût total de production est celui de la transformation et les dépenses qui en découlent. Le coût de la transformation et aussi le coût de fonctionnement qui se répartit généralement en deux catégories, l'une directe et l'autre indirecte.

IV.2.2.1. Coûts directs de production ou charges d'exploitation directes

Ce coût a une relation directe avec les opérations de transformation.

- a) Matières premières.
- b) Les unités et les graisses.
- c) Utilités : La vapeur, l'électricité, l'air comprimé, l'eau de refroidissement, le carburant, etc. Les prix unitaires de ces utilités ont été ceux représentés dans tableau An2.1.
- d) Coût de main d'œuvre direct.
- e) Coût de maintenance: Cette rubrique est nécessaire pour la maintenance et la réparation de tous les équipements afin de maintenir une meilleure efficacité de la production et la productivité. Elle comporte le travail, la supervision, le matériel et les fournitures.
- f) Fourniture de Production : Les graphes, les lubrifiants, les tests chimiques etc.
- g) Dépenses du laboratoire d contrôle de la qualité : Les tests de laboratoire, contrôle des opérations de production et le contrôle de la qualité du produit.
- h) Paiement des redevances.

IV.2.2.2. Coûts indirects de production ou charges d'exploitation indirectes

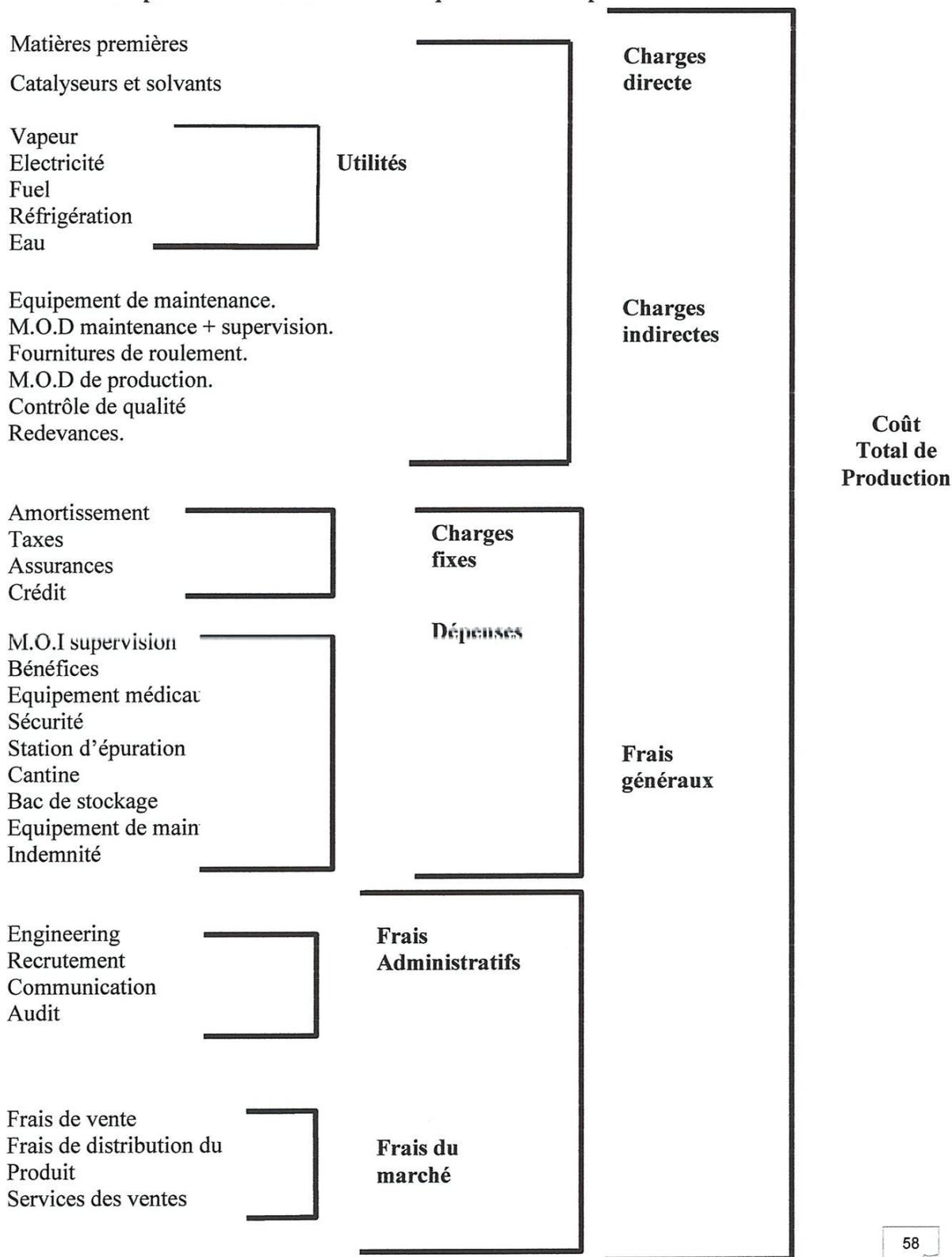
Ces charges ne concernent pas directement la production. Ce sont les charges fixes et les frais généraux de l'unité.

- a) **Charges fixes** comprennent les amortissements, les taxes, assurance et loyers,
- b) **Dépenses** : Coût de la main-d'œuvre, coût de la supervision, dépenses de la sécurité, unité de traitements des eaux usées, dépenses de la restauration, indemnité, coût des équipements de maintenance,
- c) **Frais généraux**
 - 1) Frais de l'administration : Engineering, recrutement, communication, audit.
 - 2) Frais de vente.

3) Frais de financement (paiement d'intérêt).

4) Frais de recherche et de développement.

IV.2.2.3. Récapitulatif des différentes rubriques du coût de production



IV.3.LA FONCTION OBJECTIVE MODELE ECONOMIQUE CHOISI :

Dans cette partie on cherche a minimise le cout total annuel (TAC) de l'eau dessalée.

Pour obtenir une production annuelle (PROD) d'eau douce, on base sur le calcule des facteurs influents seulement.

- Pour résolu le problème on suppose :

Min $\Phi(x, y, A_s)$: $\Phi(x, y, A_s)$ fonction objectif économique (coût total annuel),

$$A_{\min} \leq A_s \leq 1$$

$$y \in Y [0, 1]$$

$x \in X \mathbb{R}^n$: x est un vecteur de variables continues spécifiées dans l'ensemble compact X .

Où :

A_s est le nombre de variables continues décrivant la disponibilité du procédé, qui à son tour fonction de vecteurs de fiabilité (R) et de maintenabilité (M).

Enfin A_{\min} est la valeur minimale de disponibilité du processus imposée par le concepteur.

En général la réalisation d'une bonne disponibilité est souvent obtenu par la redondance des équipements placées en séries ou en parallèles (ou par des configurations plus complexes); mais aussi la disponibilité de chaque équipement peut être améliorée par des investissements plus d'investissement en plus est par conséquent avoir une fiabilité et une maintenabilité efficace. Donc, non seulement les variables de base du processus doivent être pris en compte, mais aussi la configuration de fiabilité du système (la redondance de structure par exemple).

En fait alors que la première est influencée par l'arrangement physique des équipements et leurs interconnexions (interaction de façon efficace), la disponibilité du système dépend de l'arrangement des unités et de la fiabilité individuel ainsi que la maintenabilité de chaque unité.

De toute évidence si nous voulons permettre un compromis économique entre l'exigence de fonds propres supplémentaire et les coûts opérationnels due a l'objectif d'atteindre plus de fiabilité et / ou la maintenance des équipements à entretenir, ou d'acquérir de meilleures configurations pour améliorer la disponibilité du système; nous devons introduire ces variables dans la formulation du problème.

Alors;

Le Coût total annuel de l'eau dessalée est donc la résultante de tout ces coûts et peut être exprimé par la formule suivante :

$$TAC = C_{OP} + C_{inv} + C_{prem} + C_{CMC} \quad (39)$$

Où :

C_{OP} : Le coût d'exploitation

C_{OP} : Comprend le coût de vapeur dans le dispositif de chauffage, le coût de prétraitement et le coût de pompage.

C_{CMC} : Le coût de maintenance corrective.

C_{prem} : Le coût d'amortissement.

C_{inv} : Le coût d'investissement annuel, comprend les coûts de la zone d'investissement (la surface total d'échange de chaleur et la surface totale des chambres) et le coût de pompage.

le coût d'investissement doit tenir compte des équipements en stand by dans le bloc diagramme de fiabilité.

Le coût d'investissement est donné par l'équation ;

$$C_{inv} = C_A \times A_{tot} + \sum ms \times C_{ps} \times Q_S \quad (40)$$

Où

C_A : Le coût unitaire de surface,

A_{tot} : La surface totale de l'unité,

C_{ps} : Le coût unitaire de débit pompé, pour chaque étage (s),

Q_S : Le débit pompé dans chaque étage (s).

Selon nos restrictions de conception à chaque pompe de l'étage nous pouvons attribuer un, deux ou trois pompes (deux en stand-by),

ms : Le nombre des équipements dans chaque étage (s).

Donc, le coût d'investissement dans chaque étage est fonction d'un nombre entier de variables ms qui est dans notre cas le nombre de pompes dans chaque étage.

La surface totale A_{tot} est calculée en additionnant la surface totale d'échange de chaleur (A_t) et la surface totale des chambres (A_s), affecté par un facteur, qui est connu et qui représente le ratio des coûts entre ces surfaces

$$A_{tot} = A_t + Fact \times A_s \quad (41)$$

Il est clair que les coûts d'investissement sont fonction de la capacité nominale de l'usine, mais compte tenu de la disponibilité des procédé, ces coûts sont également fonction de la capacité réelle RPROD, voir l'équation (18).

Le coût d'exploitation (C_{OP}) est donné par la relation:

$$C_{OP} = C_{heat} + C_{pump} + C_{feed} \quad (42)$$

Où: C_{heat} : Le coût de la chaleur, donné par :

$$C_{heat} = C_Q \times Q^{Des} \quad (43)$$

Où :

C_Q : Est le coût unitaire de vapeur, (voir tableau Annexe 1.3)

Q^{Des} : Est la chaleur consommée.

C_{feed} : Le coût de prétraitement. donné par :

$$C_{feed} = C_p \times F \quad (44)$$

Où : C_p : Est le coût unitaire de prétraitement, (tableau An1.3)

F : Est le débit d'alimentation.

C_{pump} : Le coût de pompage donné par :

$$C_{pump} = \sum C_{ps} \times Q_s \quad (45)$$

Où : C_{ps} : Est le coût unitaire de pompage, (tableau An1.3).

Q_s : Le débit de chaque étage (s) .

Sachant que l'usine ne fonctionne pas tout le temps, à cause des problèmes de défaillance ou de la maintenance, donc le temps effectif de fonctionnement (EPOT) est différent du temps total disponible et peut être calculé par la formule suivante :

(EPOT) = temps total disponible¹ – temps d'arrêt pour maintenance planifié² – temps d'arrêt pour maintenance non planifié³ / temps total disponible

(1) 8760 h

(2) supposé ici 168 h

(3) période d'indisponibilité

Alors, la quantité annuelle à produire, où la capacité annuelle réelle $\left(RPROD \left(m^3/an \right) \right)$ est déférente de $\left(PROD \left(m^3/an \right) \right)$ et sera calculé par l'équation :

$$RPROD = \frac{PROD}{EPOT} = \frac{RPROD}{A_{sys}} \quad (46)$$

Avec :

A_{sys} : Disponibilité opérationnelle et donné par :

$$A_{sys} = A_{sis} \times A_{sch} \quad (47)$$

où :

A_{sch} : Période d'indisponibilité ou le temps d'arrêt pour maintenance planifiée (ici supposée connue).

A_{sis} : Période d'indisponibilité de l'usine (le temps d'arrêt pour maintenance non planifiée).

RPROD : La capacité réelle de l'usine lors de son fonctionnement, ou sa disponibilité (les équipements de base sont conçus).

PROD: La production annuelle désirée (un paramètre du problème supposé ici connue), il est à noter que RPROD est toujours supérieur à PROD, parce que on divise par un facteur inférieur à 1 dans l'équation (46).

Alors, le coût d'investissement est inversement proportionnel à la disponibilité pour satisfaire la production annuelle souhaitée.

Les coûts opérationnels sont les mêmes, parce que les flux augmentent dans la même proportion que le temps opératoire est diminuée.

Dans les modèles de fiabilité, il est implicitement supposé que pendant le temps que le système est non disponible, il est en cours de réparation.

Ainsi, le coût de maintenance corrective est:

$$C_{CMC} = ms \times \sum C_{cms} (1 - A_s) \quad (48)$$

Avec :

C_{CMC} : Le coût de maintenance corrective annuelle des équipements à l'étage s,

ms : Le nombre d'équipements à l'étage s,

A_s : La disponibilité à l'étage s,

$1 - A_s$: le temps d'indisponibilité pour maintenance corrective,

Le coût total de maintenance corrective est obtenu en faisant la somme des coûts de tous les étages.

L'objectif premier de la production est de produire le plus possible et le plus Longtemps possible, alors que l'objectif de la maintenance est de garantir la disponibilité maximale de l'outil de production, ce qui nécessite obligatoirement son arrêt pendant un temps donné pour y intervenir.

Il est à rappeler que, le Coût total d'investissement annuel est la résultante de tout les dépenses cites au paravent C_{OP} , C_{inv} , C_{prem} , C_{CMC} .

On remarque que tous ces coûts (C_{OP} , C_{inv} , C_{prem}) sont constants à l'exception du coût de maintenance C_{CMC} qui est variable et dépend de taux de défaillance des équipements.

La réduction des coûts de maintenance passe impérativement par la connaissance approfondie des équipements.

Les équipements constituant le procédé de dessalement multi étage flash concernés par la maintenance sont généralement classés dans les catégories suivantes:

1) La cuve d'évaporation

- a) Nettoyage des tubes de condensation de vapeur.
- b) Réparation ou remplacement des tubes condensation de vapeur.
- c) La réparation de l'intérieur de la cuve et l'élimination des dépôts en vrac.
- d) Nettoyage de demister.
- e) Réparation des fuites d'air et de liquide dans l'enveloppe du récipient extérieur.
- f) Réparation des fuites entre les sections de l'eau distillée et la saumure dans le récipient.
- g) La réparation et le réglage des dispositifs inter-étages de contrôle de flux pour la saumure, l'eau distillée, et évacuation des gaz.
- h) Réparation et isolation de l'extérieure contre la corrosion.

2) Le réchauffeur de l'eau d'alimentation

- a) Nettoyage des tubes
- b) Réparation ou remplacement des tubes

3) Les désaérateurs (système d'éjection)

- a) La réparation ou le remplacement des buses de distribution de liquide ou les collecteurs.
- b) Réparation ou remplacement de matériel d'emballage et ses supports.
- c) Réparation des fuites de vide.

4) Système à vide

- a) Vérification des buses d'éjection pour l'érosion et leurs remplacement si besoin.
- b) Vérification des diffuseurs d'éjection pour l'érosion et les dépôts et les remplacer ou les nettoyer au besoin.
- c) Vérification des buses de pulvérisation dans les condenseurs à contact direct et les nettoyer ou les remplacer si nécessaire.

5) Les pompes centrifuges

- a) Remplacer les bagues d'usures usées sur roue et les recouvrir.
- b) Remplacer la pompe érodée.
- c) Remplacer l'emballage et les joints d'arbre usé.
- d) Remplacer la pompe et les pilotes de roulements usés.
- e) Lubrification de la pompe et les paliers du pilote.

6) Système de dosage chimique

- a) Service de crépine des sections de pompage des produits chimiques.
- b) Nettoyage des valves des pompes et les remplacer selon les besoins.
- c) Remplacer l'emballage de la pompe ou les diaphragmes.
- d) Nettoyage des réservoirs de produits chimiques.

7) Instruments et contrôles

- a) Vérifier les pièces mobiles de l'usure et les réparer ou les remplacer.
- b) Réparer ou remplacer les pièces usées ou corrodées sur les vannes de control.
- c) filtration d'air de service et le sécher.
- d) Calibrer les instruments.

Chapitre V

**Applications des concepts
F.M.D et calcul pour le
procédé MSF**

V.1. APPLICATION DES CONCEPTS F.M.D POUR LE PROCEDE MSF

Appliquant les formules de fiabilité maintenabilité et disponibilité au procédé de dessalement MSF à recirculation [28] déjà détaillé dans le chapitre (I)

Il est à rappeler que la disponibilité d'un équipement (i) désigné par (A_i) est la capacité d'un équipement (ou d'un composant ou d'un procédé) pour remplir ses fonctions selon la conception requise par le constructeur dans les conditions opérationnels et environnementales normales. Pour cela, on définit la moyenne du temps de bon fonctionnement entre défaillances consécutives $MTBF_i$ et la moyenne du temps de réparation $MTTR_i$ de chaque équipement qui nous renseigne sur la disponibilité de l'équipement qui peut être défini par l'équation suivante :

$$A_i = \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i} \quad (49)$$

Tel que :

$$MTBF = \frac{\text{temps de bon fonctionnement TBF}}{\text{nombre de pannes}}$$

$$MTTR = \frac{\sum \text{temps d'intervention pour } n \text{ pannes}}{\text{nombre de pannes}}$$

Pour calculer les valeurs de ces deux facteurs ($MTBF_i$ et $MTTR_i$) nous devons adopter un modèle de fiabilité pour ce système.

Mathématiquement, on peut écrire, la formule $R(t) + F(t) = 1$ donné par Henley et Kumamoto,

Où :

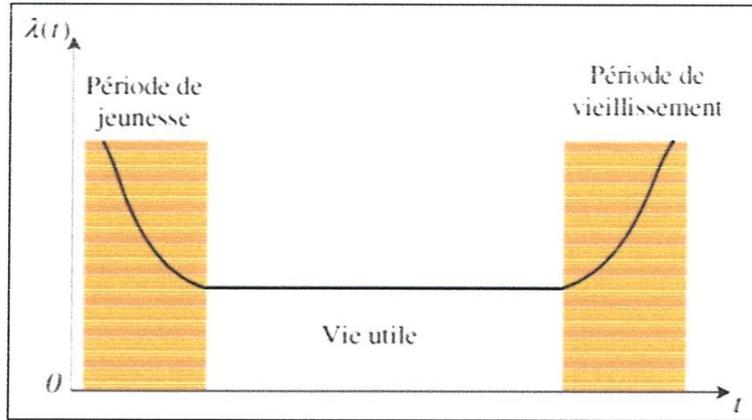
F(t): La fonction de défaillance,

R(t) : La fonction de fiabilité (non défaillance), exprimé en général par la formule suivante :

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t r(t) dt \right] \quad (50)$$

Où **r(t)**: Est une fonction de risque ou une fonction du taux de défaillance, il est ainsi possible de déduire les fonctions de défaillance et de fiabilité correspondant à différentes fonctions de densité de probabilité. Il est connu de même que les taux de défaillances sont élevés en période initiale de fonctionnement, puis diminues à une valeur constante à un "fonctionnement en régime permanent", et aussi se développe dans la dernière période du

cycle de vie (courbe en baignoire), en général pour les procédés continus, au stade de la conception.



Donc il est commode de supposer un taux de défaillance constant, et de simplifier considérablement le problème. En fait, si on suppose une fonction avec un taux de défaillance constant $r(t) = \lambda$, on obtient la fonction exponentielle connue pour la fiabilité $R(t)$. L'avantage de ce facteur est d'une grande simplification, car il est possible de parvenir à des relations très simples entre les principaux paramètres décrivant la fiabilité et la disponibilité du système.

En fait, le MTBF peut être obtenu de la manière suivante, dont la distribution exponentielle est indépendante du temps

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (51)$$

Où :

$$\lambda = \frac{\text{nombre de défaillances}}{\text{temps cumulé de fonctionnement}}$$

Par ailleurs, on définit l'équation de maintenabilité $M(t)$ comme une mesure de la rapidité avec laquelle un équipement peut être restauré à l'état de fonctionnement suite à une panne ou une abstraction de l'exploitation pour l'entretien.

La maintenabilité peut être définie comme la probabilité d'un équipement à être maintenu dans un état opérationnel ou restauré à cette condition dans un délai donné selon un calendrier d'entretien préétabli, et un environnement opérationnel défini.

Il est à noter que la maintenabilité est souvent confondue avec l'entretien, ce dernier qui est une série de mesures spécifiques prises pour restaurer l'état d'une machine en plein régime de fonctionnement. Ces actions peuvent inclure l'entretien, l'inspection, le réglage, la

lubrification, l'enlèvement ou le remplacement ou la réparation sur place. Tandis que la maintenance préventive est les mesures prises pour conserver l'équipement à un niveau de performance donné, alors que la maintenance corrective est les mesures prises pour restaurer un équipement à l'état de fonctionnement, suite par exemple à une défaillance.

Les mêmes relations utilisées pour la fiabilité peuvent être introduites pour les fonctions de maintenabilité.

Si on suppose un taux de maintenabilité (ou taux de réparation) constant $\mu(t) = m$, et en utilisant maintenant les mêmes définitions et les procédures décrites ci-dessus pour la fonction de fiabilité, on obtient:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

Avec :

$$MTTR = 1/\mu \quad (52)$$

La disponibilité du procédé ou du système (A_{sis}) doit être calculée en fonction de la disponibilité (A_i) de chaque équipement(i), selon l'arrangement des équipements, qui est capturé par le modèle de disponibilité du procédé (en tenant compte de la conception et la structure du système: parallèle, série et niveaux de redondance, etc.).

Donc, dans ce sens, nous devons introduire à ce stade, les relations précédentes décrivant le procédé équations (18) - (33) et la superstructure adéquate (logique) représentant l'allocation des équipements pour calculer la disponibilité du système. (Ici on prend en compte les équipements les plus importants pour le fonctionnement de l'unité).

Selon la **Figure V.1**, notre procédé peut être représenté par une combinaison de système en série-parallèle sous forme de bloc diagramme de fiabilité constitué d'un ensemble de blocs constitué de même type d'équipements (les pompes).

Il est à rappeler que la méthode de diagramme de fiabilité (DF) aboutit à une modélisation fonctionnelle d'un système en considérant que les fonctions globales de ce système résultent d'une mise en série et/ ou en parallèle de fonctions. Chaque composant du système, considéré. Comme indépendant, réalise une fonction autonome. L'évaluation de la fiabilité du système est déduite de cette modélisation fonctionnelle. Le DF permet une analyse qualitative en déterminant les chemins qui conduisent à la réussite de la mission du système.

Pour les systèmes en série de N-étages, tous les composants doivent fonctionner pour assurer le fonctionnement du système. Ainsi, le système est indisponible (en panne) lorsque un des N équipements ou une rangée des équipements ne fonctionne pas. Pour un tel système, la disponibilité (A_p) est calculée en fonction de la disponibilité (A_s) de chaque étage par la formule suivante:

$$A_p = \prod_{s=1}^N A_s \quad (53)$$

Pour un arrangement en parallèle, le système est disponible si l'un d'entre eux est disponible. Dans ce cas, la disponibilité du système est calculée en fonction de la relation suivante:

$$A_{par} = \prod_{js=1}^{ms} (1 - A_{js}) \quad (54)$$

Avec :

A_{js} : La disponibilité de chaque équipement en parallèle.

ms: Le nombre d'équipements en parallèle dans chaque étape.

Pour simplifié, on pose comme hypothèse que tout le matériels et équipements dans chaque étage sont identiques, alors l'équation. (54) devient :

$$A_{par} = 1 - (1 - A_p)^{ms} \quad (55)$$

Nous introduisons aussi la redondance des équipements en stand-by.

Les équations ci-dessus sont valables uniquement en supposant une indépendance statistique entre les composants.

- Les équipements qui sont touchés par la maintenance sont désignés dans le chapitre IV (Modèle économique), dans la littérature en choisi les équipements les plus pendulent pour le procédé MSF qui sont de type pompes centrifuges.

Les pompes sont des matériels d'une grande fiabilité, mais aussi d'une grande diffusion. C'est pourquoi, malgré un faible taux de défaillance, elles interviennent de façon notable, voire principale, dans les temps d'indisponibilité des grands ensembles industriels

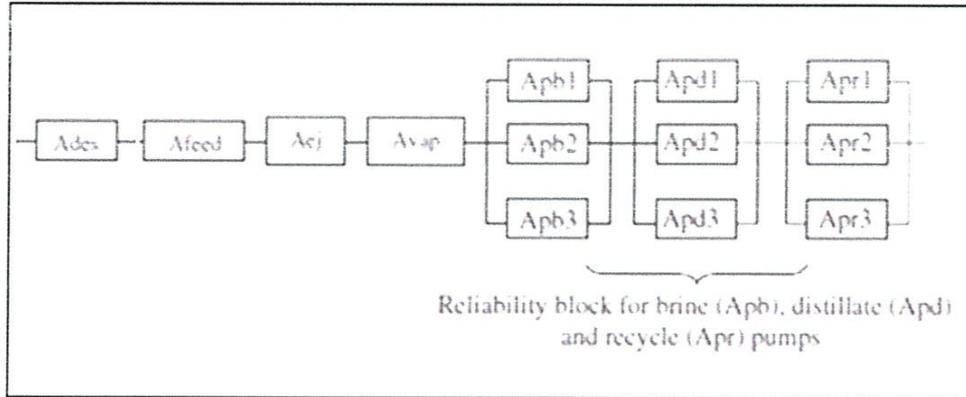


Figure V.1 : Bloc diagramme de fiabilité pour l'optimisation du problème

Où :

A_{des} : Disponibilité de l'eau de mer a dessalée.

A_{feed} : Disponibilité des produits de prétraitement.

A_{ej} : Disponibilité de système d'éjection.

A_{vap} : Disponibilité de la vapeur d'eau.

A_{pbi} : Disponibilité de la saumure.

A_{pdi} : Disponibilité de distillat.

A_{puly} : Disponibilité de la saumure recyclée.

Les équipements en stand-by permanent ont un taux de défaillance (la réponse à la demande) différent à celui des équipements considérés comme partie principale dans le fonctionnement, donc ils ont une dépendance statistique entre eux, et ça disponibilité doit être calculé sous une forme différente que la partie principale l'équation (55).

Ici, nous utilisons cette équation pour simplifier les calculs, et aussi parce que l'erreur introduite est très faible.

V.2.ETUDE DE CAS

Dans cette section, un problème de conception spécifique prend en compte le procédé MSF à **recirculation** sera résolu. Les paramètres de conception sont donnés dans le tableau V.1 [28].

Les données sur les coûts sont données dans le tableau V.2 [28].

Les données sur la disponibilité sont données dans le tableau V.3.

Voici toutes les restrictions que nous avons utilisées dans la formulation du problème:

$$A_{min} \leq A_{sys}$$

Dans chaque étage, nous permettons au plus une pompe principale et deux pompes en stand-by connectés en parallèles. Donc ms est limité par : $1 \leq ms \leq 3$

Pour les étages dans lequel les unités en stand – by sont attribuées, ms est défini comme variable du problème (ms est le nombre de pompes pour chaque type d'alimentation de pompes pour chaque étage).

Si les pompes en stand- by sont identiques, l'équation (54) devient :

$$A_{pstby} = 1 - (1 - A_{punit})^{ms}$$

En raison que ms est un exponentiel entier, le problème est résolu en introduisant des variables binaires à travers l'ensemble des restrictions suivantes [28] selon la figure V.1.

Pour le distillat

$$A_{pstby} = apdes_1 \times x_1 + apdes_2 \times x_2 + apdes_3 \times x_3$$

$$apdes_1 = 1 - (1 - A_{punit})$$

$$apdes_2 = 1 - (1 - A_{punit})^2$$

$$apdes_3 = 1 - (1 - A_{punit})^3$$

$$x_1 = y_1, x_2 = y_2, x_3 = y_3$$

$$y_1 + y_2 + y_3 \geq 1$$

Où :

A_{punit} : La disponibilité de chaque pompe, calculée en utilisant l'équation (49)

x_i : Variables continus et réels

y_i : Variables binaires

x_i, y_i : Sont des variables auxiliaires servant à décider le nombre de pompes (ms) à allouer. Cet ensemble d'équations doit être introduit pour chaque stand by étage dans le bloc diagramme de fiabilité (Fig. V.1), et pour chaque type d'alimentation des pompes : le distillat(des), la saumure(bri), la saumâtre recyclée. Les équations ci-dessus concernent le distillat.

Pour la saumure

$$A_{pstby} = apdes_1 \times x_1 + apdes_2 \times x_2 + apdes_3 \times x_3$$

$$apbri_1 = 1 - (1 - A_{punit})$$

$$apbri_2 = 1 - (1 - A_{punit})^2$$

$$apbri_3 = 1 - (1 - A_{punit})^3$$

$$x_1 = y_1, x_2 = y_2, x_3 = y_3$$

$$y_1 + y_2 + y_3 \geq 1$$

Pour la saumâtre recyclée

$$A_{pstby} = apdes_1 \times x_1 + apdes_2 \times x_2 + apdes_3 \times x_3$$

$$aprecy_1 = 1 - (1 - A_{punit})$$

$$aprecy_2 = 1 - (1 - A_{punit})^2$$

$$aprecy_3 = 1 - (1 - A_{punit})^3$$

$$x_1 = y_1, x_2 = y_2, x_3 = y_3$$

$$y_1 + y_2 + y_3 \geq 1$$

Chapitre VI

Résultat et discussion

Sachant que la disponibilité du procédé est liée au cout d'investissement annuel total pour obtenir une production annuelle totale PROD et qui, ce dernier est aussi fonction des conditions de fonctionnement, tel que la taille de l'unité, les caractéristiques physiques de l'eau, la source d'énergie disponible, et l'environnement de fonctionnement, et l'état des équipements.

Donc le problème qui se pose est de trouver un cout optimal d'investissement pour une disponibilité de l'unité qui prend en compte une bonne maintenabilité ; fiabilité...

Dans ce chapitre on va analyser les différents résultats obtenus par l'utilisation des données (**tableau VI.1**) [28] du modèle proposé.

Cette solution peut être envisagée, par l'amélioration de la disponibilité du procédé, tout en minimisant le cout d'investissement annuel total pour la production de l'eau dessalée envisagée (PROD).

Tableau VI.1 : Les valeurs des paramètres et données sur les coûts pour le problème d'optimisation

| paramètres | valeurs |
|---|---------|
| C_p (capacité thermique) (kcal/ kg. k^{-1}) | 1.3 |
| U (coefficient de transfert de chaleur) (kcal/m ² hr ⁻¹ k ⁻¹) | 2200 |
| chaleur latente [Kcal / Kg] | 570 |
| T_{max} (température maximale) [K] | 393 |
| Température d'alimentation T_F [K] | 298 |
| Production (PROD) [tn / hr] | 1000 |
| F facteur | 20 |
| DT (diamètre du tube) [m] | 0,030 |
| C_A (coût de surface de transfert de chaleur) [\$ / m ²] | 50 |
| CQ^{Des} (Hot utility cost) [\$ / 106 Btu] | 0,252 |
| A_{vap} | 0,99090 |
| A_{int} | 0,98138 |
| A_{des} | 0,97808 |
| A_{feed} | 0,9788 |
| A_{op} | 0,9785 |
| $\lambda_{bri} \text{ année}^{-1}$ | 1.445 |
| $\mu_{bri} \text{ année}^{-1}$ | 700 |
| $\lambda_{des} \text{ année}^{-1}$ | 1.0 |
| $\mu_{des} \text{ année}^{-1}$ | 800 |
| $\lambda_{recycle} \text{ année}^{-1}$ | 1.234 |
| $\mu_{recycle} \text{ année}^{-1}$ | 800 |

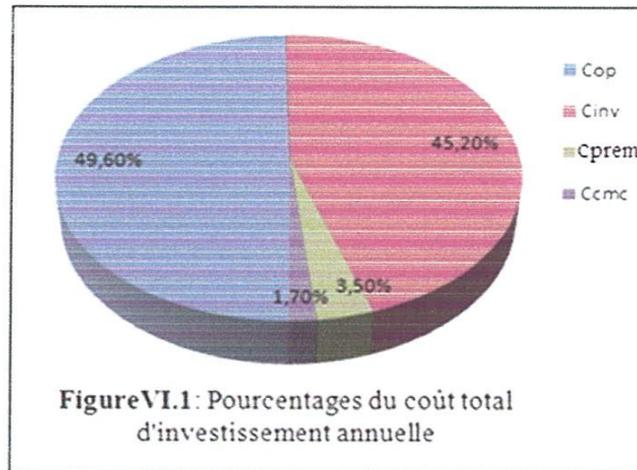
A partir des valeurs de données présentées dans le tableau (VI.1), on peut calculer les différentes valeurs optimales pour un TAC minimal tels que la chaleur consommée, la production (PROD), la production(RPROD), la saumâtre recyclée(W_R), la surface d'échange de chaleur (A_{tot}), la surface de chaque étage(A_S), la disponibilité opérationnel (A_{sys}), le temps d'arrêts pour maintenance non planifié (A_{sis}), le temps d'arrêts pour maintenance planifié (A_{sch}) ainsi que les pourcentages des couts...etc. (pour plus de détail voir le **tableau VI.2**).

Tableau VI.2: Les valeurs optimales obtenues en minimisant TAC (disponibilité sans pris en considération.

| Variable | Valeurs |
|--|----------|
| Q^{Des} [Gcal / hr] | 80,079 |
| N_t | 2494 |
| NS | 33 |
| Vel [m / s] | 1.305 |
| Δtc [K] | 8.207 |
| V_{bri} [m / s] | 3.000 |
| WR [tn / h] | 5.708 |
| Δt_f [K] | 2.585 |
| Δt_e [K] | 10,793 |
| A_t [m ²] | 38658,34 |
| A_s [m ²] | 33129,10 |
| L [m] | 56. 743 |
| A_{sys} | 0,897 |
| A_{sis} | 0,916 |
| A_{sch} | 0,978 |
| Pompe de Recyclage | 1 |
| Pompe de saumure | 1 |
| Pompe de distillat | 1 |
| TAC [avec la disponibilité, 10 ⁶ \$ / an] | 1.212 |
| TAC [sans disponibilité, 10 ⁶ \$ / an] | 1.3267 |
| H [m] | 2.742 |
| Htu [m] | 1.742 |
| $RPROD$ [tn / hr] | 1113. 5 |
| $PROD$ [tn/ hr] | 1000 |
| % coût d'utilités | 49,6 |
| % coût de surface | 45,2 |
| % coût d'amortissement | 3,5 |
| % coûts de maintenance corrective | 1,7 |

Après calcul, le tableau 02 résume Les résultats ainsi trouvés :

- 49.6 % → coûts utilités (électricité, vapeur, fuel...)(C_{OP})
- 45.2 % → coûts de surface (C_{inv})
- 3.5 % → coûts d'amortissement (C_{prem})
- 1.7 % → coûts de maintenance corrective (C_{CMC})



On remarque de cette répartition de coût des étages que les coûts les plus importants sont les coûts des utilités et de surface tandis que les coûts à savoir (les coûts de pompage et de maintenance corrective ne présentent pas de proportions importantes mais reste toujours comme facteurs influant sur le bon fonctionnement de l'unité pour assurer la production désirée.

Sachant que les restrictions déjà discutés dans le chapitre V, concernant le max et la min des pompes utilisées, on peut déduire le TAC minimal correspondant à le nombre minimal qui est de 1 (pompage du saumure, distillats ; et recyclage de l'eau de mer) a chaque étage. Cette situation peut être présentée dans le tableau IV.3.

Il est rappelé que le but est de minimiser le cout total d'investissement annuel pour notre production annuel ($1000 \text{ m}^3 / \text{hr}$).

Selon la formule : $TAC = C_{OP} + C_{inv} + C_{prem} + C_{CMC}$

Où :

C_{OP} : Le coût d'exploitation $C_{OP} = C_{heat} + C_{pump} + C_{feed}$

C_{inv} : Le coût d'investissement annuel. $C_{inv} = C_A \times A_{tot} + \sum ms \times C_{ps} \times Q_S$

C_{prem} : Le coût d'amortissement.

C_{CMC} : Le coût de maintenance corrective. $C_{CMC} = ms \times \sum C_{cms} (1 - A_S)$

On remarque que tous les rubriques de cette équation sont fixes (constant) à part le coût de la maintenance corrective C_{CMC} .

Le TAC peut varier uniquement en fonction de la variation de C_{CMC} , donc abaisser le coût C_{CMC} , abaissera le coût TAC.

De plus la minimisation du coût d'investissement total TAC peut être assurée par la diminution de la disponibilité opérationnelle du système A_{sys} , qui est donnée par la relation suivante, en rappel :

$$A_{sys} = A_{sis} \times A_{sch}$$

Où :

A_{sch} : Correspond le temps d'arrêt de l'unité pour maintenance planifiée est supposée constant.

A_{sis} : (Période d'indisponibilité) qui sera diminuée pour assurer la diminution de la disponibilité opérationnelle A_{sys} .

D'autre part, on sait que la capacité annuelle réelle est donnée par la formule suivante :

$$RPROD = \frac{PROD}{A_{sis}}$$

On sait bien que RPROD est inversement proportionnelle à A_{sis} .

A_{sis} Diminue, Ce qui augmente la production réelle RPROD pour satisfaire la production désirée.

C'est-à-dire que si A_{sis} diminue, RPROD augmente et vice versa, Avec : $RPROD > PROD$

Les résultats obtenues pour un coût min sont : $TAC = 1.3267 \times 10^6 \text{ \$/an}$ avec une disponibilité $A_{sys} = 0.8987$ et un nombre de pompe égale à un (01) pour chaque opération a chaque étage, et $RPROD = 1113.5 \text{ tn/hr}$

Le tableau VI.3 montre l'importance de l'utilisation de 03 pompes par rapport à 01 pompe et sont impact sur A_{sys} , A_{sis} , (A_{sch} est toujours constant).

Si nous résolvons maintenant le problème $A_{sys}max$ (par l'ajout d'un nombre d'équipements par exemple, ici 03 pompes liées en parallèles dans chaque étage), en utilisant le même modèle ci-dessus, la disponibilité maximale pour le processus est atteint, ce qui augmente évidemment le cout d'investissement total pour la production PROD.

La disponibilité $A_{sys} = 0.901$, $TAC = 1.4821 \times 10^6 \text{ \$/an}$, la production annuelle $RPROD = 1100 \text{ tn/an}$.

Contre une disponibilité de $A_{sys} = 0.8987$ en minimisant le coût.

Tableau VI.3 : Les valeurs optimales obtenues en maximisant la disponibilité du procédé (TAC gratuit)

| Variable | Maximiser A_{sys} | Minimiser TAC |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| A_{sys} | 0,901 | 0,8987 |
| A_{sis} | 0,921 | 0,919 |
| TAC [\$ / an] | $1,4821 \times 10^6$ | $1,3267 \times 10^6$ |
| A_{sch} | 0,978 | 0,978 |
| Pompes de saumure | 3 | 1 |
| Pompes de distillat | 3 | 1 |
| Pompes de Recyclage | 3 | 1 |
| $RPROD$ (tn/hr) | 1100,0 | 1113,5 |

D'après ces résultats On constate qu'il faut choisir entre ces deux solutions pour l'optimisation du procédé MSF, selon qu'on veut :

- ✓ Soit en choisir a minimisé le cout d'investissement en gardons la disponibilité A_{sys} libre.
- ✓ Soit en maximisent la disponibilité opérationnelle du système A_{sys} et donc augmentant le coût d'investissement total.

Conclusion

Conclusion

La méthodologie d'optimisation du procédé MSF que nous avons proposée tient compte du facteur disponibilité de ce procédé de dessalement de l'eau de mer opérant dans les conditions de fonctionnement optimales.

Pour illustrer cette modélisation, un bloc diagramme de fiabilité a été établi, où la fiabilité du procédé est montrée en relation avec l'allocation des équipements (dans notre cas posés essentiellement pompes) qui sont en stand – by soit en séries ou en parallèles. Le but est d'obtenir une expression de cette disponibilité qui permettra l'obtention d'un modèle adéquat et répondant aux exigences avec le coût de la maintenance corrective dans les limites ou restrictions imposés par le constructeur ($A_{\min} \ll A_s \leq 1$).

Il est à rappeler que la disponibilité du procédé dépend de son bon fonctionnement, qui dépend à son tour de la politique de maintenance envisagée (concernant la conception des équipements, les méthodes de maintenance, le stock de pièces de rechange et aussi le personnel qualifié) ainsi que la fiabilité de chaque équipement.

Pour notre modèle imposé, une optimisation doit prendre en considération les différents valeurs de la production désirée (PROD), la température d'alimentation de l'eau de mer, la température d'entrée au premier étage, la chaleur spécifique, le coefficient de transfert de chaleur, le coût de chaleur et les différentes valeurs des disponibilités.

La connaissance de ces paramètres permet d'évaluer toutes les valeurs optimales du procédé tels que la chaleur consommée, la production souhaitée (PROD), la production réelle (RPROD), la saumure recyclée (W_R), la surface d'échange de chaleur (A_{tot}), la surface de chaque étage (A_S), la disponibilité (A_{sys}), la disponibilité (A_{sis}), la disponibilité (A_{sch}) ainsi que les pourcentages des coûts...etc.

Les calculs, nous permettent de trouver ces valeurs pour un coût total annuel minimal pour une production annuelle (PROD), et où la disponibilité du procédé A_{sys} doit être maximal.

Les résultats ainsi obtenus sont satisfaisants puisque avec l'amélioration de la disponibilité A_{sys} on doit dépense et investir plus c.à.d. le coût d'investissement (TAC) augmente pour améliorer le procédé et sa disponibilité pour une meilleure efficacité de production. Notre modèle est rigoureux et flexible.

Comme nous l'avons dit précédemment, le modèle proposé permet de résoudre la minimisation du coût total (TAC), ou l'agrandissement de la disponibilité du procédé.

Conclusion

En outre, on peut introduire des restrictions naturelles à notre modèle pour satisfaire l'agrandissement de la disponibilité du procédé ou son minimisation dans les conditions de fonctionnement adaptées au deux cas extrêmes.

Plusieurs points restent à étudier pour les travaux futur, d'une par l'utilisation d'un modèle de procédé plus rigoureux non seulement pour le **MSF a recirculation** mais aussi pour le **MSF once through**.

D'autre part, l'introduction des meilleurs modèles de disponibilité basés sur des relations concernant le temps de réparation et le cout de la maintenance corrective, ainsi que la maintenance préventive.

De plus, l'utilisation d'un ensemble d'équations rigoureux pour calculer la disponibilité des équipements en stand- by.

Annexe

ANNEXE

Tableau An 1.1 : Principaux paramètres de design des procédés de dessalement de l'eau de mer par MSF [30]

(Capacité 1000 m³/jours)

| Types d'unité | MSF once through | MSF à recirculation |
|--|------------------|---------------------|
| Débit distillat par flux m ³ / jours | 1000 | 1000 |
| TDS maximal du distillat (ppm) | 3 | 3 |
| Facteur de récupération d'eau (m ³ de distillat/ m ³ d'eau de mer) | 8.1 | 7.6 |
| Température de l'eau de mer (°C) | 15-26 | 22-40 |
| Fourniture, énergie et produits chimiques | | |
| 1. Vapeur (tonnes/hr) | 8.30 | 7.21 |
| 2. Energie électrique (kwh) | 164.0 | 126.1 |
| 3. Eau de mer (m ³ /hr) | 513.6 | 550.0 |
| 4. Air comprimé (STP) (m ³ /hr) | 25 | 80 |
| 5. Anti-scale (belgard EV) (kg/hr) | 0.594 | 0.15 |
| 6. Anti-foam (belite M8) (kg/hr) | 0 | .01 |
| 7. Bisulphite de Na (kg/hr) | 0 | 1.070 |

Tableau An1.2: Coûts unitaires, débits unitaire, débit d'énergie, et W_n [30]

| N° rubrique | Rubrique | C_n | W_n |
|----------------|--|---------------------------------|------------------------------|
| 1. | Vapeur | 1.64\$/tonne | kg/hr |
| 2. | Electricité | 0.014\$/kwh | kw |
| 3. | Eau de mer | 0.009\$/kwh | m ³ /hr |
| 4. | Air comprimé | 0.003\$/kwh | m ³ /hr à STP |
| 5. | Anti-scale (Belgrad-EV) | 2.62\$/kg | kg/hr |
| 6. | Anti-foam (belite-M8) | 21.71\$/kg | kg/hr |
| 7. | Acide sulfurique H ₂ SO ₄ | 0.74\$/kg | kg/hr |
| 8. | Acide sulfamique H ₃ NSO ₃ | 1.20\$/kg | kg/hr |
| 9. | Soude caustique | 0.48\$/kg | kg/hr |
| 10. | Bisulphhte de Na | 2.10\$/kg | kg/hr |
| 11. | Hexametaphosphate de Na | 1.50\$/kg | kg/hr |
| 12. | Alum | 1.33\$/kg | kg/hr |
| 13. | Polyelectrolyte | 14.75\$/kg | kg/hr |
| 14. | Filtre | 0.06\$/m ³ distillat | m ³ /hr distillat |
| 15. | Membrane | 0.20\$/m ³ distillat | m ³ /hr distillat |
| 16. | Résine | 0.51\$/m ³ distillat | m ³ /hr distillat |

**Référence
bibliographique**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. Bensaada, M.T. Bouziane, F. Mohammedi, D. Felliachi, la disponibilité et les concepts F.M.D en maintenance industrielle, courrier du Savoir – N°13, université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, p28, Avril 2012.
- [2] M. Sallak, C. Simon, J.F. Aubry, conception optimale des systèmes instrumentés de sécurité: une approche par les blocs diagrammes de fiabilité ,7^{ème} conférence internationale de modélisation, optimisation et simulation des systèmes, MOSIM 08, Paris, France, p 04, Mars 2008.
- [3] Sûreté de fonctionnement, cours de maintenance, France.
- [4] BTS ATI2, organisation industrielle S115 - organisation et suivi de la maintenance – chapitre 02, fiabilité – maintenabilité - disponibilité, p 03 disponible sur : http://www.graczyk.fr/lycee/IMG/pdf/09-10_ATI2_OI_Cours_Maintenance_CH2.pdf
- [5] C. Dumont, ITIL pour un service informatique optimal Groupe Eyrolles, 2006.
- [6] A. Bellaouar, S. Beleulmi, fiabilité maintenabilité disponibilité FMD, faculté des sciences de la technologie département Génie des Transports, université Constantine1, p109, 2014.
- [7] P. Benoît, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres: les techniques d'hier et d'aujourd'hui, contexte économique et perspectives, février 1998.
- [8] R. Tripathi, G.N. Tiwari, performance evaluation of a solar still by using the concept of solar fractionation/ desalination (169), p 69- 80, 2004.
- [9] Smith, M. Sidem, production d'eau douce par dessalement, Paris, p 43.
- [10] L. Rizzuti, H. Mehoney, desalinisation, university à Dipalermo, Italy, p 400, 2006, Available electronically at <http://WWW.Springer.com>.
- [11] A. Maurel, desalination of sea water and brackish water, Saint Paul Lez Durance, CEA, p14, May 1990.
- [12] Dessalement eau de mer, le magazine de la chronique scientifique No 4, juillet- Août 2005.

- [13] A. Sadi, Le Dessalement Solaire: Considérations Techniques, Rev. Energ. Ren. : Chemss, p 91-97, 2000.
- [14] A. Maurel, dessalement par energies renouvelables, le middle east desalination reaserch center MEDRC, Février 2004.
- [15] Sidem, fresh water through desalination, Paris, p 27, mai 1997.
- [16] V. Renaudin, bibliographie le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, Université Henri Poincaré et chercheur au LSGC (Laboratoire des Sciences du Génie Chimique), CNRS, Nancy).
- [17] O. Halloufi, étude de la performance d'un distillateur solaire par un système de préchauffage solaire de l'eau saumâtre, thèse du Magister, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [18] N. Nouah, M. Brahim, evaluations des flux de masse et de chaleur d'une installation de dessalement MSF équipée par un capteur solaire à concentration cylindro-parabolique, Mémoire de Master, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, p 22, Juin 2011.
- [19] Dessalement d'eau, dossier informatif Rencontre hispano-marocaine 25,26 et 27 septembre 2006.
- [20] M. Darwish, N.M. Al Najem, Energie consumption and costs of different desalting systems, 1987
- [21] N.P. Perrault, ressources pédagogiques / la planète bleue a soif (doc. annexés) / les techniques de désalinisation Mise à jour le 25/03/2008.
- [22] Le dessalement de l'eau de mer en Espagne disponible sur : <http://tpebdmw.e-monsite.com/pages/ii-les-atouts-et-les-limites/la-distillation.html>
- [23] J. Rodier, l'analyse chimique et physicochimique de l'eau, Editions Dunod, 1971.
- [24] Sitayeb Chograni, mémoire Etude de phénomène d'encrassement de l'échangeur EDM/MEA de la section de décarbonatation du complexe GL1/Z.
- [25] Entartrages des installations-technique d'ingénieur, doc j.2800-2.

[26] H. Elfil, contribution à l'étude des Eaux Géothermales du Sud tunisien : Etude des mécanismes et de la prévention des phénomènes d'entartrage. Thèse Doctorat., I.N.S.A. Toulouse, N°507; France (1999).

[27] Siet et Syprodeau, syndicats membres de l'UIE, Union Nationale des Industries et Entreprises de l'Eau et de l'Environnement, association professionnelle adhérente à la Fédération Nationale des Travaux Publics, Traitement d'eau des tours Aéroréfrigérantes, novembre 2014.

[28] N. Scennaa, S. Mussatib, MSF design taken into account availability; European Desalination Society and Center for Research and Technology Hellas (CERTH), Volume 222, Issues 1-3, 1 March 2008, P 673-681.

[29] M. Bessenasse, dessalement d'eau de mer étude de trois stations du littoral Algérois, Water management and soil conservation in semi-arid environments, 14th international soil conservation organization conference, Marrakech, Morocco, May 14-19, 2006 (ISCO 2006).

[30] S. Frioui, étude technico – économique des procédés de dessalement et élaboration d'un programme de simulation du procédé MSF, thèse du Magister, centre universitaire Guelma, 1997.

Résumés

RESUME

Cette étude vise à l'élaboration d'un modèle de maintenance en fonction des facteurs influents afin de minimiser les coûts de maintenance et augmenter la production. L'étude concerne les chapitres suivants:

La modélisation du procédé MSF, qui a permis l'application des concepts des facteurs de la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité en fonction des bilans massiques et énergétiques. Elle a montré que la disponibilité du procédé MSF dépend exclusivement de la disponibilité de chaque étage qui est aussi dépendante des pompes installées dans chaque étage et la manière (parallèle, série).

L'étude technique donne un aperçu sur les facteurs fiabilité, maintenabilité et leurs rôle dans :

- La stratégie de maintenance appliquée pour maintenir les équipements en état de bon de fonctionnement (c'est-à-dire atteindre le zéro panne, le zéro défaillance).
- La redondance des équipements en séries et/ou parallèles, sous forme de bloc diagramme de fiabilité.
- L'introduction des équipements en stand-by.

Enfin le modèle économique qui concerne la maintenance proposée au procédé MSF, est basé sur l'estimation des coûts d'investissements, des coûts d'exploitation et des coûts de maintenance corrective en fonction des paramètres de disponibilité.

L'objectif de cette étude est d'obtenir une production annuelle désirée avec un cout d'exploitation minimal (c.-à-d réduire le cout annuel d'exploitation en maximisant la disponibilité du procédé MSF). Et par conséquent trouver un meilleur compromis (fiabilité / prix) pour satisfaire un bon fonctionnement du procédé MSF pour une durée de vie la plus longue possible tout en maîtrisant une meilleure maintenance dotée de paramètres scientifiques rigoureux et performants.

Mots clés : Procédé MSF à recirculation, disponibilité, maintenabilité, modèle.

ABSTRACT

This study aims to develop a service model based on the influential factors to minimize maintenance costs and increase production. The study covers the following chapters:

The modeling of MSF process, which allowed the application of the concepts of the factors of reliability, maintainability and availability, based on mass and energy balances. It showed that the availability of the MSF process depends solely on the availability of each stage which is also dependent on the pumps installed in each stage and how they are placed (parallel, serial).

The technical study provides an overview on the reliability, maintainability factors and their role in:

- The maintenance strategy applied to maintain the equipment in good operating condition (that is to say achieve zero down, zero failure).

- The duplication of equipment in series and / or parallel, as a block diagram of reliability.

- The introduction of equipment on stand-by.

Finally the economic model regarding maintenance proposed MSF is based on estimates of investment costs, operating costs and corrective maintenance costs based on availability parameters.

The objective of this study is to achieve a desired annual production with a minimal operating cost (to reduce annual operating costs by maximizing the availability of the MSF process). And therefore find a better compromise (reliability / price) to satisfy a proper functioning of MSF process for the longest possible life while mastering with better maintenance of rigorous and efficient scientific parameters.

Key words: MSF recirculation processes, Availability, maintenance, model.

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى إنجاز نموذج للصيانة بدلالة العوامل المؤثرة من أجل تخفيف التكاليف و زيادة الإنتاج وتغطي الدراسة النقاط التالية:

- إنجاز النموذج الخاص بوحدة تقطير ماء البحر المعروف باسم MSF a recirculation و الذي يسمح بتطبيق المفاهيم التالية : ضمان سير الوحدة ، السرعة و السهولة في إنجاز أشغال الصيانة، بدلالة معادلات الكتلة و الطاقة و قد بين هذا العمل أن استمرارية عمل الوحدة مرتبط باستمرارية العمل لكل وحدة إنتاج على حدى و التي بدورها مرتبطة بعمل المضخات و طريقة ربطها سواء على التسلسل أو التوازي.

- الدراسة التقنية تعطي نظرة على المفاهيم السابقة و دورها في:

إستراتيجية الصيانة.

توضع الأجهزة على التسلسل او التوازي.

التناوب في استعمال الأجهزة.

- و أخيرا النموذج الاقتصادي الخاص بالصيانة المبرمجة لهذا التصميم و المرتكز أساسا على تكلفة الاستثمار ،تكلفة الإنتاج و تكلفة الصيانة التصحيحية.

الهدف من إنجاز هذا النموذج هو زيادة الإنتاج السنوي بتكلفة إنتاج منخفضة مع رفع الزمن الفعلي لعمل المنشأة لضمان سيرها لأطول فترة ممكنة بإنجاز أشغال الصيانة وفق المقاييس العلمية.

كلمات مفتاحية: وحدة تقطير ماء البحر ، ضمان سير الوحدة، الصيانة، نموذج.