

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université M'hamed BOUGARA Boumerdes
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport Et Equipement Des Hydrocarbures

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Génie Mécanique : Transport et Distribution des Hydrocarbures

THEME

Evaluation et améliorations des performances du système de chargement du terminal marin de Bejaia

Réalisé par :

- AISSANI Mustapha
- BEGHADAD Lamia

Devant le jury :

- Mr. BENMOUNAH Amar
- Mr. BOUHAFS Smail
- Mr. BOUZID Rachid

Président
Examineur
Examineur

Encadré par :

Pr BENMOUNAH Amar

Résumé

Dans cette étude, on utilise deux approches pour l'évaluation des performances du système de chargement, la première est les chaînes de Markov et la seconde est la théorie des files d'attente.

Ces deux approches consistent en une évaluation probabiliste, et les modèles utilisés sont basés principalement sur le processus de Markov.

Ensuite, on analysera les résultats issus des deux approches pour localiser d'éventuels problèmes ainsi que leurs origines.

Enfin, on propose plusieurs solutions pouvant chacune donner un résultat satisfaisant.

Mots-clés : système de chargement, chaînes de Markov, file d'attente, processus de Markov

Abstract

In this study, we used two approaches to assessing the performance of the loading system, the first is the Markov chains and the second is the theory of queues.

These two approaches consist of a probabilistic assessment, and the models used are mainly based on Markov processes.

Then we analyze the results from the two approaches to locate potential problems and their origins.

Finally, we offer several solutions, each one can give a satisfactory result.

Keywords: loading system, Markov chains, queues, Markov processes

Remerciements

Nous remercions le bon dieu de nous avoir donné la santé, la force et la patience d'aller jusqu'au bout de nos objectifs.

Nos remerciements s'adressent à :

Notre encadreur M^r BENMOUNAH AMAR qui a été toujours à nos côtés, pour sa présence, sa patience, sa bonne humeur à chaque fois que nous avons besoin de son aide, et pour son orientation et son encouragement.

Tous les enseignants, plus particulièrement, M^r YOUNSI KARIM, pour son aide et pour le temps qu'il nous a accordé afin de répondre à toutes nos questions.

Notre profonde gratitude et nos remerciements vont également à tout le personnel de SONATRACH de Bejaïa, car chacun d'entre eux a pu trouver un peu de temps pour nous aider durant la période de stage, mais aussi pour les informations et les documents qu'ils nous ont fournis.

Dédicace

A mes précieux parents qui m'ont toujours encouragé et à qui je dois tout dans ma vie

A ma très chère sœur Soumia

A mes deux frères Farid et Amar

*A ma tante favorite Nacima qui m'a toujours accueilli chaleureusement en sa demeure
ainsi que son adorable famille*

A toute la famille AISSANI et BRAHIMI

A mes chers amis Yanis, Djaber, Lyes, Fahem, Said, Bob, Hichem, Mohamed, Fatah

A mes frères d'arme Elws, Sou, Roussi, Bibi, Aki, Youyou

A mes meilleures amies Amel, Nadine, Lydia

A ma précieuse dulcinée, confidente et binôme Lamia et sa famille

A tout le groupe MATH 11

A tous ceux avec qui j'ai partagé ma vie d'étudiant

Je dédie ce travail.

Mus.

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail à :
Celle que j'aime le plus au monde, ma mère,
Mon père qui m'a guidé vers les voies de la
réussite,

Mes chères sœurs Narimane et Norhane,

Mes frères adorés Sofiane et Nassim,

Mon adorable neveu Islam,

A toute la famille Beghdad,

A mon binôme Mustapha et sa famille,

A toutes mes amies avec lesquelles j'ai partagé
les meilleurs moments,

A tout le groupe M7H11

Lamia

Table des matières

Introduction	1
Pose de problème	2
Chapitre I Description des principales installations	3
1. Descriptions des principales installations	3
1.1. Les bacs de stockage	3
1.2. Le manifold	5
1.3. La gare racleur	6
1.4. Soupapes principales	6
1.5. Unité de pompage	6
1.6. Section Opération	7
1.7. Le port pétrolier	8
1.7.1. Poste N°3	8
1.7.2. Le poste N° 2	8
1.7.3. Caractéristiques techniques de ces deux postes	8
1.7.4. Description des bras de chargement	9
1.7.5. Principe de fonctionnement	9
1.7.6. La station de déballastage	10
1.8. Le laboratoire	10
1.9. Système de chargement offshore (SPM)	10
1.9.1. Description du projet	10
1.9.2. Base de conception	10
1.9.3. Description du sea-line	10
1.9.3.1. La station de pompage	11
1.9.3.2. L'unité de comptage	11
1.9.4. BOUEE CALM (Catenary Anchor Leg Mooring)	12
1.9.4.1. Description générale	12
2. Perspectives à venir concernant le développement du port	15
3. La procédure de chargement d'un navire	16
4. L'état actuel des installations du port pétrolier	18
4.1. Situation du parc de stockage	18
4.1.1. Parc Nord	18
4.1.2. Parc sud	19
4.2. Situation du port pétrolier	19
4.3. Situation de la bouée (SPM)	19
Chapitre II Théorie des files d'attente	20
1. La station de service élémentaire	20
2. Processus des arrivées	21
2.1. Processus de renouvellement	21
2.2. Processus de Poisson	22
3. Processus des services	23
3.1. Le temps de service résiduel	23
3.2. La loi exponentielle	23
3.3. La loi d'erlang	24
4. Notion de trafic	24
5. Processus de naissance et de mort	25

5.1. La notion d'état	25
5.2. Chaîne de Markov	25
5.3. Processus de naissance et de mort	26
6. Les files d'attente classiques	28
6.1. La notation de Kendall	28
6.2. La file M/M/1	29
6.3. File M/M/s	31
6.4. Modèle à capacité limitée	33
6.5. Modèle M/M/R/R (modèle d'erlang)	34
Chapitre III Théorie de fiabilité et de disponibilité des installations	35
1. Définitions	35
1.1. Fiabilité	35
1.2. Disponibilité	36
1.3. Défaillance	36
1.4. Maintenabilité	36
1.5. Redondance	37
2. Systèmes en série	37
3. Systèmes en parallèles	38
4. Fiabilité et disponibilité des systèmes réparables en utilisant les chaînes de Markov..	38
4.1. Graphe d'état	38
4.2. Equations générales d'état	39
4.3. Application à la fiabilité	40
4.4. Application à la disponibilité	40
4.5. Fiabilité des systèmes à taux de défaillance et de réparation constants	41
4.5.1. Système à redondance active totale	41
4.5.2. Système à redondance active partielle	41
4.5.3. Redondance séquentielle totale	42
4.5.4. Redondance séquentielle partielle	42
4.6. Disponibilité des systèmes à taux de défaillance et de réparation constants	43
4.6.1. Disponibilité non stationnaire	43
4.6.2. Disponibilité stationnaire	44
Chapitre IV Calcul des files d'attente	45
1. Notion sur les calculs statistiques	45
1.1. Variables aléatoires	45
1.2. Variable aléatoire discrète	45
1.3. Variable aléatoire continue	45
1.4. Probabilité statistique	45
1.5. Fonction de répartition	45
1.5.1. Densité de la fonction de répartition	45
2. Les lois statistiques	46
2.1. Modèles discrets	46
2.1.1. Loi de POISSON	46
2.2. Modèles continues	46
2.2.1. Loi normale	46
2.2.2. Loi exponentielle	47
3. Critère de PEARSON	47
4. Test de KOLMOGOROV-SMIRNOV	48

5. Application à l'année 2013	55
5.1. Détermination de la loi de répartition des arrivées	55
5.1.1. Port Pétrolier	55
5.1.2. Bouée (SPM)	56
5.2. Détermination de la loi de service	58
5.2.1. Port pétrolier	58
5.2.2. Bouée (SPM)	59
5.3. Calcul des attentes	61
5.3.1. Port pétrolier	61
5.3.2. Bouée (SPM)	62
6. Application à l'année 2014	63
6.1. Détermination de la loi de répartition des arrivées	63
6.1.1. Port Pétrolier	63
6.1.2. Bouée (SPM)	64
6.2. Détermination de la loi de service	66
6.2.1. Port pétrolier	66
6.2.2. Bouée (SPM)	67
6.3. Calcul des attentes	69
6.3.1. Port pétrolier	69
6.3.2. Bouée (SPM)	70
7. Application à l'année 2015	71
7.1. Détermination de la loi de répartition des arrivées	71
7.1.1. Port Pétrolier	71
7.2. Détermination de la loi de service	72
7.2.1. Port pétrolier	72
7.3. Calcul des attentes	74
7.3.1. Port pétrolier	74
8. Interprétation des résultats	78
Chapitre V Application au calcul de la fiabilité et de la disponibilité des installations	79
1. Application à la disponibilité	79
1.1. Disponibilité du système de chargement on shore	79
1.1.1. Application de la théorie des chaînes de Markov aux pompes d'exportation	79
1.1.1.1. Détermination du taux de défaillance	81
1.1.1.2. Détermination du taux de réparation	83
1.1.1.3. Calcul de la disponibilité par le graphe des états de Markov	85
1.1.2. Application de la théorie des chaînes de Markov aux bras de chargements	87
1.1.2.1. Détermination du taux de défaillance	88
1.1.2.2. Détermination du taux de réparation	90
1.1.2.3. Calcul de la disponibilité par le graphe des états de Markov	92
1.1.2.4. Calcul de la disponibilité totale du système bras de chargement	93
1.1.3. Calcul de la disponibilité des bacs de stockage	94
1.1.4. Calcul de la disponibilité totale du système de chargement on-shore	95
1.2. Disponibilité du système de chargement offshore	95
1.2.1. Disponibilité des pompes sea-line par le graphe des états de Markov	95
1.2.1.1. Détermination du taux de défaillance	96
1.2.1.2. Détermination du taux de réparation	98
2. Application à la fiabilité	101
2.1. Description du programme Markov Process	101

2.2. Application de la théorie des chaînes de Markov aux pompes d'exportation du système de chargement on-shore	102
2.3. Application de la théorie des chaînes de Markov aux bras de chargement du poste N°3	103
2.4. Application de la théorie des chaînes de Markov aux pompes d'exportation du système de chargement off-shore	104
3. Interprétation des résultats	106
Conclusion	107
Recherche de solutions possibles	108

Liste des figures

Figure 1.1 Schéma de comptage et d'étalonnage	10
Figure 1.2 Schéma de PLEM	11
Figure 1.3 Schéma de la bouée et ses composants	12
Figure 2.1 La station de service de base	21
Figure 2.2 Graphe de transition d'un processus de naissance et de mort	27
Figure 2.3 Graphe d'état d'un système de file d'attente de type M/M/1	30
Figure 3.1 Schéma bloc d'un système en série	37
Figure 3.2 Schéma bloc d'un système en parallèle	38
Figure 3.3 Graphe d'état d'un système non réparable	39
Figure 3.4 Graphe d'état d'un système réparable	39
Figure 3.5 Représentation générale d'une chaîne de Markov	39
Figure 3.6 Graphe d'état d'un système à redondance séquentielle totale avec 1 seul réparateur	42
Figure 3.7 Graphe d'état d'un système à redondance séquentielle partielle à 1 seul réparateur	42
Figure 3.8 Chaîne de Markov pour la disponibilité d'un système (2+0) à 1 seul réparateur	43
Figure 4.1 Histogramme des arrivées au port en 2013	55
Figure 4.2 Histogramme des arrivées à SPM en 2013	57
Figure 4.3 Histogramme des durées de service au port en 2013	58
Figure 4.4 Histogramme des durées de service à SPM en 2013	60
Figure 4.5 Histogramme des arrivées au port en 2014	63
Figure 4.6 Histogramme des arrivées à SPM en 2014	65
Figure 4.7 Histogramme des durées de service au port en 2014	66
Figure 4.8 Histogramme des durées de service à SPM en 2014	68
Figure 4.9 Histogramme des arrivées au port en 2015	71
Figure 4.10 Histogramme des probabilités de durée de service au port en 2015	73

Figure 5.1 Diagramme de fiabilité du système de chargement on-shore (phase 1)	79
Figure 5.2 Histogramme des TBF des pompes d'exportation (port pétrolier)	82
Figure 5.3 Histogramme des TTR des pompes d'exportation (port pétrolier)	84
Figure 5.4 Histogramme des TBF des bras de chargement du poste N°3	89
Figure 5.5 Histogramme des TTR des bras de chargement du poste N°3	91
Figure 5.6 Diagramme de fiabilité du système de chargement on-shore (phase 2)	95
Figure 5.7 Histogramme des TBF des pompes sea-line	97
Figure 5.8 Histogramme des TTR des pompes sea-line	99
Figure 5.9 Fenêtre « <i>New problem</i> » du logiciel Markov Process	101
Figure 5.10 Ecriture de la matrice sur Markov Process	101
Figure 5.11 Résultat de la résolution de la matrice sur Markov Process	102
Figure 5.12 Résultats de la fiabilité des pompes d'exportation du port pétrolier	103
Figure 5.13 Résultats de la fiabilité des bras de chargement du poste N°3	104
Figure 5.14 Résultats de la fiabilité des pompes sea-line	105

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Caractéristiques des pompes du terminal nord	6
Tableau 1.2 Caractéristiques des pompes du terminal sud	7
Tableau 1.3 Caractéristiques techniques des postes de chargement	8
Tableau 1.4 Liste des améliorations futures prévues pour le poste N°3	15
Tableau 1.5 Etat des bacs de stockage du terminal nord	18
Tableau 1.6 Etat des bacs de stockage du terminal sud	19
Tableau 2.1 Nomenclature de Kendall	28
Tableau 4.1 Liste des arrivées par mois au port en 2013	49
Tableau 4.2 Liste des arrivées par mois à SPM en 2013	49
Tableau 4.3 Temps d'occupation par navire des postes du port en 2013	50
Tableau 4.4 Temps d'occupation par navire de la bouée en 2013	50
Tableau 4.5 Liste des arrivées par mois au port en 2014	51
Tableau 4.6 Liste des arrivées par mois à SPM en 2014	51
Tableau 4.7 Temps d'occupation par navire des postes du port en 2014	52
Tableau 4.8 Temps d'occupation par navire de la bouée en 2014	52
Tableau 4.9 Liste des arrivées par mois au port en 2015	53
Tableau 4.10 Temps d'occupation par navire des postes du port en 2015	54
Tableau 4.11 Probabilités des arrivées au port en 2013	55
Tableau 4.12 Test de khi deux des arrivées au port en 2013	56
Tableau 4.13 Probabilités des arrivées à SPM en 2013	56
Tableau 4.14 Test de khi deux des arrivées à SPM en 2013	57
Tableau 4.15 Probabilités des durées de service au port en 2013	58
Tableau 4.16 Test de khi deux des durées de service au port en 2013	59
Tableau 4.17 Probabilités des durées de service à SPM en 2013	59
Tableau 4.18 Test de khi deux des durées de service à SPM en 2013	60
Tableau 4.19 Probabilités des arrivées au port en 2014	63

Tableau 4.20 Test de khi deux des arrivées au port en 2014	64
Tableau 4.21 Probabilités des arrivées à SPM en 2014	64
Tableau 4.22 Test de khi deux des arrivées à SPM en 2014	65
Tableau 4.23 Probabilités des durées de service au port en 2014	66
Tableau 4.24 Test de khi deux des durées de service au port en 2014	67
Tableau 4.25 Probabilités des durées de service à SPM en 2014	67
Tableau 4.26 Test de khi deux des durées de service à SPM en 2014	68
Tableau 4.27 Probabilités des arrivées au port en 2015	71
Tableau 4.28 Test de khi deux des arrivées au port en 2015	72
Tableau 4.29 Probabilités des durées de service au port en 2015	72
Tableau 4.30 Test de khi deux des durées de service au port en 2015	73
Tableau 5.1 Données statistiques des pompes d'exportation (port pétrolier)	80
Tableau 5.2 TBF des pompes d'exportation (port pétrolier)	81
Tableau 5.3 Probabilités de panne des pompes d'exportation (port pétrolier)	81
Tableau 5.4 Test de Kolmogorov pour les TBF des pompes d'exportation (port pétrolier)	82
Tableau 5.5 TTR des pompes d'exportation (port pétrolier)	83
Tableau 5.6 Probabilités de réparation des pompes d'exportation (port pétrolier)	83
Tableau 5.7 Test de Kolmogorov pour les TTR des pompes d'exportation (port pétrolier)	84
Tableau 5.8 Données statistiques des bras de chargements du poste N°3	88
Tableau 5.9 TBF des bras de chargement du poste N°3	88
Tableau 5.10 Probabilité de panne des bras de chargement du poste N°3	89
Tableau 5.11 Test de Kolmogorov pour les TBF des bras de chargement du poste N° 3	90
Tableau 5.12 TTR des bras de chargement du poste N°3	90
Tableau 5.13 Probabilités de réparation des bras de chargement du poste N°3	91
Tableau 5.14 Test de Kolmogorov pour les TTR des bras de chargement du poste N°3	92
Tableau 5.15 Capacités réelles et théoriques des bacs de stockage	94
Tableau 5.16 Données statistiques des pompes sea-line	96

Tableau 5.17 TBF des pompes sea-line	96
Tableau 5.18 Probabilités de panne des pompes sea-line	97
Tableau 5.19 Test de Kolmogorov pour les TBR des pompes sea-line	97
Tableau 5.20 TTR des pompes sea-line	98
Tableau 5.21 Probabilités de réparation des pompes sea-line	98
Tableau 5.22 Test de Kolmogorov pour les TTR des pompes sea-line	99

Liste des abréviations

TM : Terminal marin

API: American Petroleum Institute

DWT: Dead Wight Tones

VLCC: Very Large Crude Carriers

ULCC: Ultra Large Crude Carriers

QC/DC: Quick Connect / Disconnect Couplers

PMS: Position Monitoring System

ERS: Emergency Release System

TVR: Tension de Vapeur Reid

BSW: Basic Sediment and Water

SONATRACH: Société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures

NAFTAL: Société de la commercialisation et la distribution des produits pétroliers

CALM: Catenary Anchor Leg Mooring

PDV: Pressure Differential Valve

ESDV: Emergency Shut Down Valve

SPM: Single point Mooring

PLEM: Pipeline End Manifold

SH/COM: Sonatrach commerciale

EPB: Entreprise Portuaire de Bejaia

STH: Société de gestion et d'exploitation des terminaux marins à hydrocarbures

ASTM: American Society of Testing Material

GEP: Groupe Eléctro-Pompe

MTBF: Mean Time Between failures

MTTR: Mean Time To Repair

Introduction

Une fois découvert, collecté, traité et stocké dans les terminaux de chargement, le brut doit être transporté par un moyen quelconque vers les lieux de consommation.

Pour se faire on a recours le plus souvent à des réseaux d'oléoducs. Or un autre moyen de transport du brut est celui du transport maritime.

Avec la forte croissance presque exponentielle de la consommation du brut plus particulièrement la chine et l'inde devenus les principaux ateliers du monde, d'intenses trafics maritimes s'effectuent à destination de cette région du globe afin de satisfaire la demande.

Trois ports pétroliers sont fonctionnels en Algérie : Arzew, Bejaïa et Skikda. Ces derniers disposent d'infrastructures portuaires suffisamment adéquates (quais, postes de chargement, parc de stockage ...) permettant la réalisation des opérations commerciales de chargements des navires.

L'arrivée des navires se fait d'une façon aléatoire, et lorsque plusieurs d'entre eux réclament simultanément d'être servis, certains doivent patienter formant ainsi une file d'attente. Le temps à passer dans cette dernière dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- La fréquence des arrivées ;
- Le nombre de poste de chargement ;
- Les temps d'occupations des postes ;
- Les conditions météorologiques (intempéries et ressac).

Afin d'assurer le bon déroulement des procédures de chargement, il est primordial de maintenir en bons états l'ensemble des installations du terminal marin, tel que : les pompes d'exportation, les bras de chargement et les bacs de stockage.

Dans le but de repérer l'origine des différents problèmes et perturbations rencontrés lors du chargement des navires, notre étude sera basée sur l'évaluation des performances du port de Bejaïa en traitant des données statistique fournies par TRC.

Pose du problème :

Le chargement des navires au niveau du port de Bejaïa s'effectue via deux systèmes de chargement on shore (postes du port pétrolier) et offshore (bouée CALM en haute mer).

Pour satisfaire les clients, on se doit de livrer la cargaison demandée dans les délais prévus. Chaque retard engendre des coûts de pénalisation.

Ces retards peuvent être causés par :

- Les consignations du port ou de la bouée pour intempéries ou ressac;
- L'indisponibilité ou les pannes d'une ou plusieurs installations du système ;
- Une cargaison non prête.

L'étude se basera sur :

- La fiabilité et la disponibilité des différentes installations qui composent le système de chargement ;
- Une modélisation du fonctionnement du terminal par la théorie des files d'attente.

Recherche des solutions possibles

Une solution peut sembler évidente, à savoir : l'utilisation des deux postes de chargement du port en même temps pour effectuer les opérations de chargement.

Cela a pour effet de réduire le temps moyen d'attente de 14,2 h à 0,78 h, mais c'est une procédure dangereuse vu l'ancienneté des tuyauteries du manifold (construite en 1959), le chargement via deux postes en même temps impliquerait l'utilisation d'au moins six (6) pompes sur sept (7) alors que le manifold ne peut supporter la charge de plus de quatre (4) pompes en marche.

Ce qui nous a amené à proposer les solutions suivantes pour surmonter ce problème :

- Réhabilitation des quatre (4) pompes d'exportation du terminal sud

Cela permettrait l'utilisation du terminal nord pour expédier le produit vers l'un des deux postes et du terminal sud vers l'autre poste.

- Rénovation de la tuyauterie du manifold nord

Dans ce cas, la mise en marche de plus de quatre (4) pompes en même temps ne serait plus un problème.

A part l'exploitation des deux (2) postes en même temps, on peut proposer des solutions alternatives comme :

- La remise en service de la bouée de chargement

De ce fait, le nombre de navire arrivant au port serait considérablement réduit, on a vu au cours du chapitre IV que les arrivées avaient une influence directe sur le temps d'attente.

- La mise à niveau du poste N°3

Ses performances seraient améliorées au plus haut point, c'est-à-dire moins de pannes, disponibilité et fiabilité accrues et donc temps de service réduit (amélioré).

- Réhabilitation ou construction de nouvelles lignes d'exportation

Cela permettrait de travailler avec de bon débits et du coup améliorer grandement la qualité du service (temps de chargement réduit).

1. Description des principales installations

Introduction

Le terminal marin est la dernière unité de la chaîne de transport des hydrocarbures liquides avant l'expédition.

Il est toujours muni d'un parc de stockage, ce dernier a un rôle principal dans la cadence de fonctionnement du terminal marin, il joue le rôle d'un élément régulateur entre les opérations de réception du produit et l'expédition, il assure un fonctionnement sans perturbation du système (terminal marin), il empêche le risque de rupture de stock et le risque de surstock.

Les réservoirs cylindriques verticaux aériens de grandes dimensions sont les éléments essentiels constituant un parc de stockage.

Le terminal de Bejaïa est composé de :

- Un terminal marin nord ;
- Un terminal marin sud ;
- Un port pétrolier.

Ses principales fonctions sont :

- Réception et stockage des produits pétroliers arrivant par le pipeline ;
- Traitement de ses produits ;
- Assurer l'entretien des installations ;
- Mesure et enregistrement ;
- Chargement des pétroliers.

1.1. Les bacs de stockage

a. Terminal nord

On y trouve :

- 12 bacs à toits flottants, d'une capacité de 35 000m³, d'un volume utile de 27 500m³ et un stock mort de 5000m³ chacun, de diamètre nominal 56m, de hauteur cylindrique totale 14,4m.
- 01 bac de purge à toit fixe de 2900m³ pour recevoir les résidus de la gare racleur arrivée et les décharges des soupapes de sécurité, il sert également à récupérer les purges des collecteurs et du manifold.

b. Terminal sud

Contient 4 bacs de stockage, à toit flottants d'une capacité de 50 000m³, d'un volume utile de 41 000m³ et un stock mort de 5000m³ chacun, de diamètre nominal 66,75m, et de hauteur totale 14,650m.

Les réservoirs subissent des opérations de transfert d'un bac à un autre de la même unité ou d'une autre unité, les purges d'eau, le jaugeage, la prise de température...etc.

❖ Généralités sur les bacs

Le bac est un réservoir cylindrique vertical, constitué de viroles alternées, qui sont soudées et forment la partie principale du bac qui est la robe.

Le deuxième élément principal du bac est le toit:

En général, on emploie les réservoirs à toit flottants lorsqu'on veut réduire au maximum les pertes par évaporation et le risque d'incendie. C'est un toit à « Double-Deck », qui assure une haute flottabilité. En effet, un toit flottant étant toujours en contact direct avec le produit stocké, donne les avantages suivants :

- Il réduit au maximum les pertes par évaporation causées par les variations de température ;
- Au cours du remplissage d'un réservoir, il n'y a pas de pertes par évaporation, parce qu'il n'existe pas d'espace vide entre le toit et le niveau du liquide où les vapeurs s'accumulent ;
- Les hydrocarbures ne peuvent pas prendre feu, parce qu'ils ne sont pas en contact avec l'air ;
- Le manque d'espace entre le toit et le niveau du liquide empêche la formation de mélange détonant [3].

❖ Les accessoires des bacs de Bejaïa

a) Sur la robe :

- 2 trous d'homme ;
- 1 agitateur ;
- 1 tubulure de purge ;
- 1 échelle ;
- 1 porte d'homme ;
- 1 plateforme ;
- Accessoires d'entrée et de sortie ;
- Tuyauterie d'eau d'incendie.

b) Sur le toit :

On trouve :

- Un trou d'homme ;
- 31 trous d'homme de caisson ;
- 56 supports tubulaires et télescopiques pour repos du toit sur le fond ;
- 1 Soupape automatique, 2 soupapes mécaniques, 1 soupape hydraulique
- Un évent avec couvercle arrête flamme ;
- Trois tubulures de jauge ;
- Une tubulure de trop plein de drainage ;
- Une échelle roulante articulée suivant, le mouvement du toit ;
- Un dispositif de guidage du toit.
- Joint d'étanchéité

❖ Les joints

Les joints utilisés sont :

- Des Joints métalliques pour les bacs du terminal marin Nord ;
- Des Joints souples tubulaires de type Horton pour les bacs du terminal marin sud.

1.2. Le manifold

Il existe, deux manifolds (un au nord et l'autre au sud) au terminal arrivé. Le manifold est un ensemble de canalisations, vannes et accessoires qui constituent le poste d'aiguillage de la station de pompage et qui comprennent les différentes installations annexes, filtration, comptage,...etc.

C'est un système qui est constitué de deux nappes de tuyauteries superposées l'une sur l'autre et orthogonales qui sont reliées entre elles par un nombre de vannes.

Le manifold est destiné à assurer en nombre et en direction tous les mouvements du produit c'est-à-dire :

- Réception par pipeline ;
- Remplissage et vidange sélective des groupes de réservoirs ;
- Transfert d'un groupe de réservoirs à un autre (transvasement).

Tous les collecteurs du manifold ont un diamètre égal à celui de la ligne de réception, d'aspiration et d'expédition.

❖ Dispositif de robinetterie

On a, deux vannes manuelles pour le circuit de transfert à l'arrivée du pipe-line qui sert à évacuer le produit soit vers l'un des bacs du TM Nord (L₂) ou TM Sud (L₄). Dans le manifold on trouve aussi des vannes manuelles de transfert du collecteur K (KA, KB, KC, KD, KE, KF, KM, KN)

Toutes les autres vannes du manifold ou celles des pieds des bacs sont équipées d'un moteur électrique asynchrone à vitesse fixe et elles sont commandées à distance à partir de la tour de contrôle, mais elles peuvent en cas de problème être commandées sur place soit par le moteur électrique ou bien manuellement.

Dans le terminal marin nord, on trouve :

- 06 vannes de ligne et chaque ligne est reliée à deux bacs ;
- 06 vannes pour chaque pompe ;
- 01 vanne pour chaque pied du réservoir.

Dans le terminal marin sud, on trouve :

- 04 vannes de lignes reliées à chaque réservoir ;
- 04 vannes pour chaque pompe ;
- 01 vanne de pied de bac pour chaque réservoir ;

Toutes les vannes sont uniformément de 20" sauf celles qui correspondent aux pompes de petites dimensions qui sont de 15" et 16"

On a aussi un système de protection qui est constitué d'une vanne de sectionnement et des soupapes de décharge qui sont tarées à 14kgf/cm², 27kgf/cm² et 83kgf/cm² qui protègent le système contre les surpressions.

En cas de fausses manœuvres l'écoulement s'effectuera vers le bac de purge (4Y1).

1.3. La gare racleur

La gare racleur arrivée a un diamètre de 32" destinée pour la réception du racleur dans le cas du nettoyage intérieur du pipe ou d'un outil intelligent lors d'une inspection en ligne.

1.4. Soupapes principales

Elles sont destinées pour la sécurité des collecteurs et de la ligne en cas de surpression, elles crachent le produit à l'intérieur d'une conduite qui est reliée à 4Y1.

1.5. Unité de pompage

Le terminal est composé au total de 10 électropompes :

Dans le terminal marin nord on trouve 7 pompes (M, N, O, P, R, S, T) placées en parallèle entraînées par des moteurs électriques dont :

- 04 pompes à grand débit
- 02 pompes à moyen débit
- 01 pompe à faible débit.

Leurs caractéristiques sont données par le tableau suivant [2] :

Désignation	Fournisseur	Caractéristiques					
		Q (m ³ /h)	V (tr/min)	P (cv)	T(v)	I(A)	HMT(m)
1 pompe (R) centrifuge à 3 étages	GUINARD	1250	1470	390	5500	41,5	70
2 pompes (S, T) centrifuges à 2 étages	GUINARD	2200	1480	368	5500	47,5	85
4 pompes (M, N, O, P) centrifuges	GUINARD	2500	1500	750	5500	68	90

Tableau 1.1 caractéristiques des pompes du terminal nord

Dans le terminal marin sud on trouve 3 pompes placées en parallèles entraînées par des moteurs électriques dont :

- 02 pompes à grand débit ;
- 01 pompe à faible débit (en stand-by).

Leurs caractéristiques sont données par le tableau suivant [2] :

Désignation	Fournisseur	Caractéristiques					
		Q (m ³ /h)	V (tr/min)	P (cv)	T(v)	I(A)	HMT(m)
1 pompe (W) centrifuge à 3 étages	GUINARD	1280	1470	390	5500	26	70
2 pompes (Y, Z) centrifuges à 2 étages	GUINARD	3500	985	860	5500	82	90

Tableau 1.2 caractéristiques des pompes du terminal sud

1.6. Section Opération

En d'autres termes la tour de contrôle, qui se trouve à une hauteur de 17m avec télémétrie et télécommande, son rôle principal est :

- Fermeture et ouverture automatique des vannes du manifold Nord et Sud par des moteurs d'entraînement ;
- Etablissement d'itinéraire pour transvasement d'un réservoir à l'autre avec une pompe principale, du même dépôt (Nord-Nord / Sud-Sud) ou bien de dépôts différents (Nord-Sud / Sud-Nord) ;
- Contrôler le débit et la pression à l'arrivée du produit ;
- Le stockage des produits ;
- Télé jaugeage automatique des réservoirs ;
- Faire fonctionner les différentes pompes des deux manifolds, nord et sud ;
- Préparation d'une cargaison. Pour préparer une cargaison l'opérateur (chef de quart) fait appel à l'agent des Douanes et l'inspecteur (qui représente le client) et fait procéder par le jaugeur, en présence de ces deux derniers :
 - Au jaugeage quantité (mesure des hauteurs) ;
 - A la mesure de la température ;
 - A la prise des échantillons destinés au laboratoire ;

Il communique en premier lieu les résultats de ces mesures à l'agent maritime responsable du navire, il établit le certificat de quantité, il annote le journal des côtes de jaugeage relevées et il communique au port les renseignements précédents : densité, température du produit, API.

- Le chargement des pétroliers.

1.7. Le port pétrolier

Le port du terminal marin de Bejaia est structuré comme suit :

On trouve trois postes de chargement, une station de déballastage et deux appontements.

- L'appontement A est relié au poste N°1 et l'appontement B est relié au poste N°2 et N°3.
- Le poste N°1 a été cédé à NAFTAL et les postes N°2 et N°3 sont fonctionnels. L'expédition du produit vers le port se fait par l'intermédiaire de deux canalisations de 32'' qui aboutissent aux postes 2 et 3, et qui sont reliées à leur arrivée aux postes par un circuit appelé circuit canal (circuit bipasse).

1.7.1. Poste N°3

On trouve dans ce poste :

- Quatre bras de chargement d'un diamètre de 12'' commandés à terre à partir de manette et sont conçus d'une manière à pouvoir pivoter jusqu'à une limite de sécurité déclenchant une alarme obligeant le détachement immédiat des bras de chargement et l'évacuation du produit.
- Une citerne de 9m³ relié au poste équipée d'une pompe avec un clapet de non-retour pour la vidange.
- Un puisard pour la récupération des eaux de pluie et de produit récupéré dans les bras de chargement, une fois que le poste est en arrêt.
- Une pompe qui permet d'aspirer le contenu du puisard, pour le refouler par l'intermédiaire d'un circuit de canalisation d'un diamètre de 16'' qui débouche dans le bac 5Y1. Ce circuit a pour fonction principale la récupération du ballast existant dans le réservoir navire.
- De quatre électrovannes et d'un jeu de vannes manœuvrées par les opérateurs avant et après le chargement.

1.7.2. Le poste N° 2

Ce poste est équipé de la même installation que le poste 3 avec une légère différence, trois bras de chargement de 16'' récemment installés et une nouvelle tuyauterie et salle de commande.

Les deux postes sont équipés d'un manomètre de pression qui est en surveillance permanente au cours du chargement, ce dernier ne doit pas dépasser les 8 bars.

1.7.3. Caractéristiques techniques de ces deux postes

désignation	Poste 2	Poste 3
Longueur max du bateau (m)	260	260
Tirant d'eau max (m)	12,5	13
Tonnage max (TM)	85000	90000
Produits exportés	brut	brut

Tableau 1.3 Caractéristiques techniques des postes de chargement

1.7.4. Description des bras de chargement (voir schéma en annexe)

Les bras « marine » constituent un des éléments clé des installations portuaires de chargement/déchargement de produits pétroliers, chimiques et gaz liquéfiés.

Un bras de chargement est un ensemble de tuyauteries articulées équipées de raccords à chemins de roulement interchangeables, de coupleurs hydrauliques de connexion/déconnexion rapide QC/DC (*Quick Connect / Disconnect Couplers*), coupleur manuel Quikcon, système de contrôle par microprocesseur (*PMS: Position Monitoring System*), dispositif de déconnexion d'urgence ERS (*Emergency Release System*), lignes de retour vapeur, etc. Ces équipements assurent une sécurité renforcée de l'installation [3].

Le bras repose sur un ouvrage mécano-soudé appelé embase, celui-ci assure la stabilité du bras et le passage du fluide entre les installations fixes et la tuyauterie articulée. Un ensemble de contrepoids assure l'équilibre de la tuyauterie articulée dans toutes les positions.

Les composants d'un bras de chargement sont :

- Une embase ;
- Un tube interne ;
- Un tube externe ;
- Des raccords articulés Chiksan ;
- Système d'équilibrage : double contrepoids, pantographe et poulies ;
- Système de verrouillage en position repos ;
- Echelle d'accès ;
- Contact de signalisation ;

1.7.5. Principe de fonctionnement

La manœuvre complète du bras Chiksan, dans la zone de débattement prévue est réalisée à l'aide d'un système électro hydraulique. Ce système permet le mouvement vertical des éléments internes et externes et également le mouvement de rotation horizontal de l'ensemble.

Un commutateur de sélection placé sur le pupitre de commande permet la manœuvre individuelle de chaque bras. Avec ce dispositif on manœuvre un seul bras à la fois, afin d'éviter tout incident. Après sélection, chaque levier de commande disposé sur le pupitre permet d'actionner un des trois vérins à double effet, réalisant ainsi tous les mouvements du bras à l'intérieur de la zone de débattement prévue.

Le raccordement du bras au navire étant effectué, l'opérateur met les commandes de ce bras en position « neutre » ce qui a pour effet de mettre en intercommunication les vérins, permettant ainsi le libre mouvement des bras par rapport au navire dans les limites de la zone.

1.7.6. La station de déballastage

Elle est située au côté Est du port et occupe la majorité de la surface de celui-ci et est composée de :

- Trois grandes cuves dont deux d'entre elles, le 5Y1 et 5Y2 d'une capacité de 12000 m³, elles sont destinées à la récupération des eaux de ballast, la troisième cuve (Mory) d'une capacité de 2530m³ allouée par NAFTAL est destinée à la récupération des sloops.
- Deux bassins de décantation B1 et B2 d'une capacité de 2100m³ chacun destinés au traitement des eaux de ballast par décantation naturelle.

1.8. Le laboratoire

Le laboratoire de contrôle de Bejaïa permet d'effectuer tous les tests caractérisant un produit (brut) à commercialiser en fonction des résultats des tests et les exigences du client, pour cela, il contient tout l'appareillage donnant ces résultats.

Les différents tests effectués à la réception et aux expéditions sont les suivants :

Densité, la TVR (tension de vapeur Reid), la teneur en soufre, la teneur en sel, la viscosité, la détermination de la couleur et l'extraction de l'eau par entraînement des éléments légers(BSW).

1.9. Système de chargement offshore (SPM)

La bouée d'amarrage est utilisée dans le cas de la réception d'un navire pétrolier de grande capacité qui le rend impossible à accéder au port pétrolier, elle se trouve à 7 km du rivage.

1.9.1. Description du projet

Dans le cadre de l'augmentation de la capacité d'exportation des hydrocarbures et du condensât, le Maître de l'ouvrage, SONATRACH, a entrepris la construction de cinq postes de chargement en mer situés au niveau de trois zones séparées :

- Deux ouvrages situés à ARZEW
- Un ouvrage situé à BEJAIA
- Deux ouvrages situés à SKIKDA

Le terme "ouvrage" désigne un terminal de chargement en mer avec station de pompage, canalisations aussi bien en mer qu'à terre, système de protection cathodique et toute autre installation nécessaire pour l'exploitation du terminal de chargement, conformément au cahier de charge, aux spécifications techniques contractuelles et aux bonnes pratiques d'ingénierie.

1.9.2. Base de conception

L'installation d'exportation de Bejaia est conçue pour charger un (1) seul pétrolier, amarré à une bouée CALM, à un débit maximum de 10.000 m³/h. Le produit à transférer est du pétrole brut ou du condensât à partir de bacs situés dans les parcs de stockage nord et sud du terminal de Bejaia.

1.9.3. Description du sea-line

Le système de chargement offshore (sea-line) est composé de 03 unités principales.

1.9.3.1. La station de pompage [2]

Les collecteurs de réservoirs à partir de chaque parc de stockage sont reliés à des manifolds d'aspiration de 42'' qui s'étendent jusqu'au collecteur d'aspiration de la station de pompage. Six (6) collecteurs de réservoirs de 28'' sont reliés au manifold d'aspiration du parc de stockage nord. Chaque collecteur du parc de stockage nord est relié à deux Réservoirs. Cinq (5) collecteurs de réservoirs de 32'' sont raccordés au manifold d'aspiration du parc de stockage sud. Quatre (4) collecteurs de réservoirs dans le parc de stockage sud sont chacun reliés à un réservoir. Un nouveau collecteur de 32'' est destiné pour un bac futur.

Des vannes d'isolement sont prévues sur chaque manifold d'aspiration en amont de la ligne d'admission.

la station de pompage se situe au terminal sud avec un collecteur d'aspiration de 42'' Elle est composée :

- de trois (3) lignes d'aspiration de 36'' vers les pompes de chargement d'exportation, des lignes de refoulement de 30'' se regroupent dans un collecteur de refoulement de 42'', une ligne de dérivation du débit minimum de 12'' venant du collecteur de refoulement vers le collecteur d'aspiration, équipée d'un clapet de non-retour et d'une boucle de réglage du débit.

- Trois (3) pompes de chargement verticales avec des filtres d'aspiration et des vannes de refoulement et d'aspiration motorisées ; chaque pompe est entraînée par un moteur électrique et ayant une capacité nominale de 5.000 m³/h.

Le débit maximal de chargement de la bouée est de 10.000m³/h dans ce cas 2 pompes fonctionnent et l'autre est en réserve.

- Une ligne de recyclage de 16'' pour rincer la station de pompage vers le collecteur de pétrole brut à l'admission du parc de stockage nord, isolée par deux (2) vannes motorisées et équipée d'un clapet de non-retour et d'une boucle de réglage de débit.
- Des lignes de drainage venant des composants de la station de pompage et des unités de comptage sont reliées vers le bac de drainage par l'intermédiaire de ses collecteurs. Ce dernier est un réservoir enterré horizontalement doté d'une échelle d'accès et d'un trou d'hommes. Le fond du réservoir est à 5,5 m au-dessous du sol et a une capacité de stockage de 28,4 m³.
- Deux (2) lignes d'exportation de 42'' pour le pétrole brut et le condensat sortant du collecteur de refoulement de la station de pompage dont chacune est composé d'une vanne de pression différentielle PDV et d'une vanne d'arrêt d'urgence ESDV.

A la sortie de la station de pompage et juste à l'entrée en mer se trouvent deux vannes d'isolement motorisées à boisseau sphérique appelées vannes de plage l'une pour le brut et l'autre pour le condensat.

1.9.3.2. L'unité de comptage

Une unité de comptage permet le comptage du pétrole brut ou le condensat sortant vers la bouée de chargement ,elle est composée d'un collecteur d'admission de 42'', de cinq (5)

lignes de comptage de 12'' et d'un collecteur de sortie de 42''. Chaque ligne de comptage est dotée d'un raccordement de 16'' vers une ligne de branchement de l'étalon de 20''. La ligne de branchement de l'étalon arrive jusqu'à la soupape de dérivation à quatre voies de l'étalon. La ligne de retour de l'étalon de 16'' quitte la soupape de dérivation et se relie au collecteur de sortie de 42'' sur l'unité de comptage.

Chaque ligne de comptage a un débit de 2.500 m³/h. Au cours de l'opération d'exportation, quatre (4) lignes de comptage sont opérationnelles à un débit maximum de 10.000 m³/h et l'autre ligne est en réserve. La boucle d'étalonnage a un débit nominal de 2.500 m³/h, égal à une ligne de comptage.

Une ligne de comptage est composée d'une vanne à boisseau sphérique d'isolement de 16''.

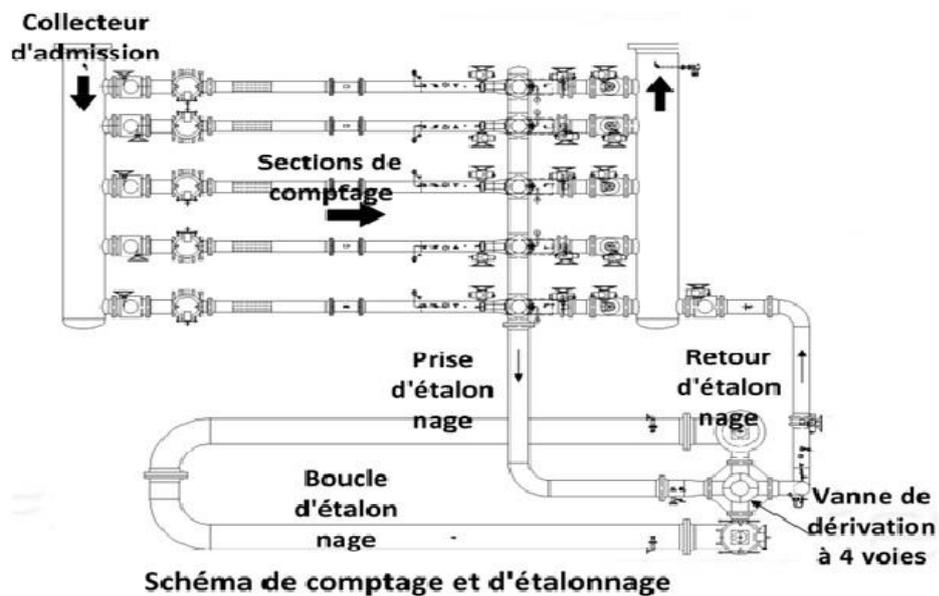


Figure 1.1 Schéma de comptage et d'étalonnage

1.9.4. BOUEE CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*) [2]

1.9.4.1. Description générale

C'est un système à point d'amarrage unique (*Single Point Mooring* - SPM) installé au large, le pétrolier est amarré temporairement à la bouée, ancrée au fond marin grâce à des chaînes d'ancrage. Le fluide est transféré grâce à des lignes de flexibles.

Chaque système de bouée CALM comprend les composants majeurs suivants:

- Système de chaînes d'ancrage
- Ensemble de supports de chaîne
- Ensemble de coque de bouée
- Ensemble de roulement
- Ensemble de plateforme tournante
- Système de tuyauterie produit
- Ensemble de rotation
- Système de contrôle hydraulique

- Systèmes électrique, contrôle télémétrique et de surveillance à distance
- Ensemble d'aussière d'amarrage
- Système de flexibles sous-marins
- Système de flexibles flottants
- Collecteur de fin de canalisation (*Pipeline End Manifold - PLEM*)

A) Description du système offshore de Bejaia

La bouée CALM de Bejaia se trouve à une distance de 7 Km de la cote, elle est relié à la station de pompage du terminal sud via 2 conduites identiques de 42'' une pour le pétrole brut et l'autre pour le condensat, elles comportent 2 vannes de plage motorisées, à l'extrémité se trouve le PLEM.

On appelle PLEM le collecteur de fin de canalisation qui est posé sur le fond marin et conduit le produit des canalisations offshore jusqu'aux flexibles sous-marins, il est constitué de deux conduites de diamètre 42'' pour connexions aux canalisations offshore, chaque conduite possède deux piquages 24'' qui mènent aux flexibles sous-marins, chaque piquage est équipé d'une vanne à boisseau sphérique 24'' opérée hydrauliquement, le contrôle du débit du produit à la bouée CALM est commandé à partir de l'ouverture/la fermeture des vannes PLEM.

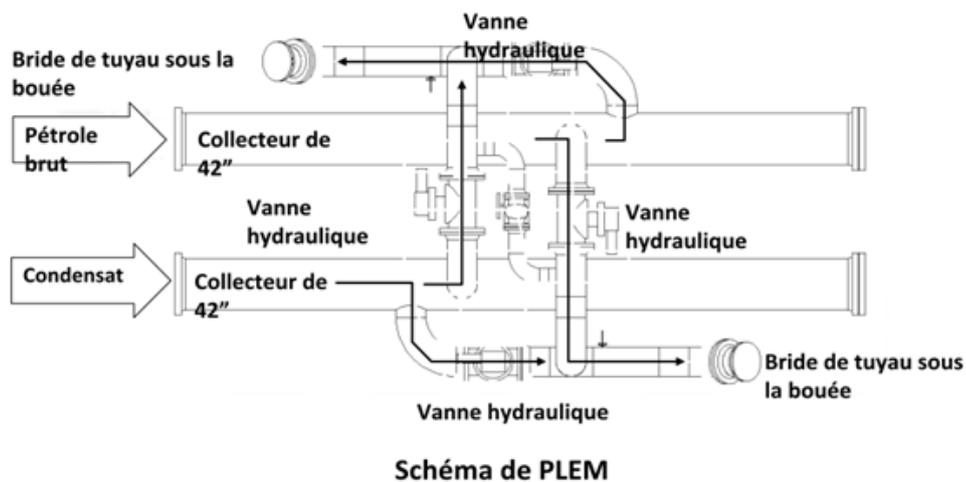


Figure 1.2 schéma de PLEM

Le système des flexibles sous-marins canalise le produit de la fin de la tuyauterie du PLEM jusqu'à l'entrée de la tuyauterie du puits de la bouée à travers deux lignes de flexibles séparées 24''. Chaque bouée possède une configuration unique de flexibles sous-marins.

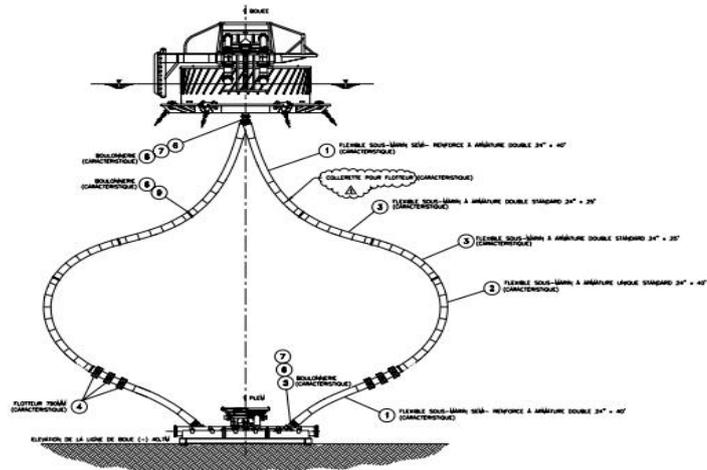


Figure 1.3 schéma de la bouée et ses composants

Une vanne papillon manuelle (vanne du puits central) est installée dans chaque ligne d'admission. Les deux lignes d'admission convergent en un tronçon fixe au fond de la tête d'injection en ligne de 36''. La tête d'injection suit le mouvement de la table tournante à 360°. Elle supporte deux lignes de chargement de 24'' équipées de vannes papillon (vannes de table tournante) afin de permettre la fermeture de la tête d'injection et le rinçage à partir du pétrolier amarré.

Les lignes de chargement s'élargissent à 30'' pour assurer une résistance structurelle et puis se raccordent aux chaînes des flexibles flottants de 24''.

Le système des flexibles flottants canalise le produit de la sortie de la tuyauterie de plateforme tournante sur la bouée jusqu'au manifold du pétrolier à travers deux lignes de flexibles, les chaînes des flexibles flottants aboutissent dans un réducteur concentrique raccordé aux flexibles de rail/extrémité de 16'' à travers un manchon auto-obturant à double fermeture. Ce manchon est prévu pour éviter des dommages aux flexibles et à la bouée en cas de rupture des aussières alors que les flexibles restent toujours raccordés.

2. Perspectives à venir concernant le développement du port

Afin d'améliorer les conditions de déroulement des opérations de chargement à savoir : la sécurité, les communications, la capacité et l'efficacité du chargement, SONATRACH prévoit d'apporter plusieurs améliorations dans les années à venir.

Nous citons ci-dessous quelque unes :

- **Installation on-shore (POSTE N°3) [5]**

IDENTIFICATION	ACTION
Bras de chargement	➤ Fourniture et pose bras de chargement Ø 16'' en tube acier avec tous les accessoires et équipements de contrôle (commande, câbles électriques, centrales hydrauliques (pompes diverses, instruments et appareils de contrôle ...), pièces de rechange et toutes autres sujétions d'essais et de mise en service.
Manifold	➤ Fourniture et pose tuyauteries et accessoires (coudes, clapets, caps ...etc.) du manifold.
Pompes de vidange	➤ Fourniture et Montage de deux (02) pompes de vidange des ballons et d'une électropompe de vidange de la fosse.
Ligne de chargement	➤ Fourniture et de la nouvelle ligne de chargement Ø 32'' (tuyauterie et accessoires), sablage, enrobage, nettoyage et essais hydrostatiques...etc.
Ligne de déballastage	➤ Fourniture et de la nouvelle ligne de déballastage Ø 22'' (tuyauterie et accessoires), sablage, d'enrobage, de nettoyage et d'essais hydrostatiques...etc.
Ballon (cuve en acier de 5m ³)	➤ Fourniture et pose de ballon de 5 m ³ et accessoires y compris toutes sujétions de mise en service.
Fosse de vidange	➤ Remise à neuf de la fosse de récupération des huiles. ➤ Fourniture et pose d'échelles inoxydables dans la fosse.
Travaux de génie civil	➤ Revêtement en béton bitumineux des aires et des passerelles d'accès au niveau de l'appontement B
Pupitre de commande des bras.	➤ Installation d'une technologie plus récente

Tableau 1.4 liste des améliorations futures prévues pour le poste N°3

- **Installation off-shore (Bouée SPM) :**
 - Remplacement des flexibles flottants et immergés et renforcement des aussières bâbord

- **Appontement B :**
 - Fourniture et installation de nouvelles pompes anti-incendie ;
 - Installation d'un nouveau réseau anti-incendie ;
 - Remplacement de différentes installations électriques défectueuses.

- **Installation on-shore (POSTE N°2) :**

Ce poste a été complètement rénové et dispose actuellement des mêmes installations prévu pour la mise à niveau du poste N°3. De ce fait SONATRACH ne prévoit aucun changement futur pour l'instant.

3. La procédure de chargement d'un navire

a) Préparation de la cargaison selon le programme établi par SH/COM

La division commercialisation programme pour chaque port pétrolier (Arzew, Bejaïa, Skikda) des navires pour leurs chargements, en envoyant des plannings dans le but de faire préparer la cargaison par les exploitants du terminal dans de bonnes conditions. Et pour cela, les exploitants doivent suivre les procédures suivantes :

- ✓ Sélectionner les réservoirs destinés à l'exportation ;
- ✓ Décantation et purge de ces réservoirs ;
- ✓ Choix du poste de chargement selon les caractéristiques du navire, disponibilité des installations.

b) Demande de mise à quai du navire citerne

Lorsque toutes les conditions de chargements sont réunies une demande de mise à quai du navire est adressée à l'autorité du port (EPB) par le biais du prestataire de SONATRACH en l'occurrence STH qui procédera à l'amarrage du navire au poste désigné.

c) La constitution douane de la cargaison

Cette opération est effectuée 2 heures au minimum et 48 heures au maximum avant le début du chargement en présence d'un agent des douanes et d'un représentant du client. Elle comprend les étapes suivantes :

- ✓ Prélèvement d'un échantillon représentatif de 9 litres destiné au laboratoire pour la mesure de (la TVR, BSW, densité, salinité, teneur en soufre...) ;
- ✓ Prise de la température moyenne ;
- ✓ Mesure de la hauteur du produit (jauge quantité) ;
- ✓ Recherche d'eau à la pâte détectrice sur les trois trous du toit du réservoir.

Tous ces éléments permettent de calculer le volume à 15° des quantités à expédier en utilisant la table de reconversion ASTM (*American Society of Testing Material*)

d) Communiquer les résultats de ces mesures au service shipping

Le service shipping a pour rôle d'assurer le chargement des tankers et d'établir tous les documents nécessaires.

e) Préparation du dossier de chargement

Le dossier de chargement est composé de :

- ✓ Constitution douane ;
- ✓ Quantité d'eau purgée ;
- ✓ Certificat de quantité ;
- ✓ Mouvement des réservoirs sur N/C ;
- ✓ Rapport de chargement.

f) Préparation de l'installation de chargement avant le lancement des pompes

Avant le lancement du chargement, le responsable du port doit communiquer au chef de quart à la tour de contrôle les informations suivantes :

- ✓ L'heure de début et de fin d'amarrage ;
- ✓ Nombre de bras de chargement branché ;
- ✓ L'heure de fin de branchement ;
- ✓ Début et fin d'inspection des tanks ;
- ✓ Ouverture des vannes de chargement à quai et à bord ;
- ✓ Débit de déplacement de la ligne ;
- ✓ Choix du mode d'arrêt chargement (stop terre ou stop bord)

g) Procéder à la chasse de ligne

La chasse de ligne consiste à évacuer le produit existant déjà dans la ligne à l'intérieur du tanker.

h) Lancement des pompes de chargement

Généralement le chargement s'effectue avec 3 pompes choisies en fonction du débit désiré.

4. L'état actuel des installations du port pétrolier

4.1. Situation du parc de stockage

4.1.1. Parc Nord :

Les bacs

Le tableau suivant résume les différentes anomalies et problèmes liés à l'exploitation des bacs [1] :

Bac (Ref)	Constatations
4A7	Hors exploitation transactionnel depuis le 30/09/2015 suite à l'expiration de la validité du barémage.
4A8	Deck inférieur de tous les compartiments déformé.
4C4	Hors exploitation transactionnel depuis le 31/05/2015 suite à l'expiration de la validité du barémage. Dégradation du joint et manque d'étanchéité sur plusieurs endroits
4C9	Néant
4D3	Hors exploitation transactionnel depuis le 30/09/2015 suite à l'expiration de la validité du baremage. Corrosion avancée sur le deck inférieur des compartiments 11 et 12. Joint déformé, troué, non étanche sur une grande longueur.
4D10	Indisponible (rénovation en cours)
4E1	Corrosion avancée sur le deck supérieur (face interne) des compartiments N°1,16
4E2	Plusieurs surfaces corrodées sur le deck supérieur du toit (les deux faces), deck supérieur (face interne) des compartiments N°15, 25 fortement corrodés
4F5	Néant
4F6	Néant
4B11	Néant
4B12	Néant

Tableau 1.5 état des bacs de stockage du terminal nord

Les pompes

Les GEP M, N, O, P, R, S, T, sont disponibles, la commande de démarrage est réalisée à partir de la nouvelle salle de contrôle.

4.1.2. Parc sud

Les bacs

Le tableau suivant résume les différentes anomalies et problèmes liés à leur exploitation [1] :

Bac (Réf)	Constatations
R13	Hors exploitation depuis le 24/02/2016 suite à l'incident de 16/02/2016 (foudre)
N14	Joint non étanche, Déformation importante entre le déflecteur N°1 et N°3, entre le déflecteur N°5 et N°8, entre le déflecteur N°9 et N°11, N°11 et N°1
P21	Début de corrosion sur l'ensemble des déflecteurs
M20	Corrosion avancée sur la cinquième virole coté escalier, Début de corrosion sur la sixième virole.

Tableau 1.6 état des bacs de stockage du terminal sud

Les pompes

Les GEP W, X, Y, Z sont indisponibles (Projet de rénovation du système de contrôle/commande du TM Sud non achevé).

Les GEP PBA 01, 02, 03 (sea-line) sont disponibles, la commande de démarrage est réalisée à partir de la nouvelle salle de contrôle.

4.2. Situation du port pétrolier

Les postes 2 et 3 sont disponibles, le poste 2 est en très bon état (complètement rénové), par contre le poste 3 dispose de très anciennes installations qui nécessitent une maintenance régulière afin d'assurer son bon fonctionnement [4].

4.3. Situation de la bouée (SPM)

Indisponible depuis l'incident survenu le 16/12/2014.(Déchirure du 1^{er} flexible départ PLEM à une profondeur de 38m)

Introduction

Le modèle général d'un phénomène d'attente, appelé aussi système d'attente, peut être résumé comme suit : des clients arrivent à un certain endroit et réclament un certain service.

Les instants d'arrivés et les durées de services sont généralement des quantités aléatoires.

Si un poste de service est libre, le client qui arrive se dirige immédiatement vers ce poste où il est servi, sinon il prend sa place dans une file d'attente dans laquelle les clients se rangent suivant leur ordre d'arrivées.

Un système d'attente comprend donc un espace de service avec une ou plusieurs stations de services montées en parallèles, et un espace d'attente dans lequel se forme une éventuelle file d'attente.

Une file d'attente est défini par :

- ✓ La suite des instants d'arrivées des clients ;
- ✓ La suite des temps de service des clients ;
- ✓ La discipline de service qui donne l'ordre dans lequel seront servis les clients ;
- ✓ La capacité de la file ;
- ✓ Le nombre de serveurs ;
- ✓ Population totale de clients.

La théorie des systèmes d'attente a comme objectif d'étudier les structures et de calculer des valeurs caractéristiques permettant de décrire les performances d'un tel système en se basant sur les paramètres suivants :

- ✓ Temps moyen d'attente d'un client avant d'être servi.
- ✓ Nombre moyen de clients dans le système
- ✓ Taux d'utilisation moyen d'un serveur

1. La station de service élémentaire

La théorie considère des clients, qui se déplacent dans un réseau de serveurs, qui les traitent. Lorsque plusieurs clients tentent simultanément d'obtenir un service, certains doivent patienter et attendre dans des files d'attente.

La station de service est composée d'une file d'attente, de capacité finie ou non, vidée par un ou plusieurs serveurs, et alimentée par un flux de clients.

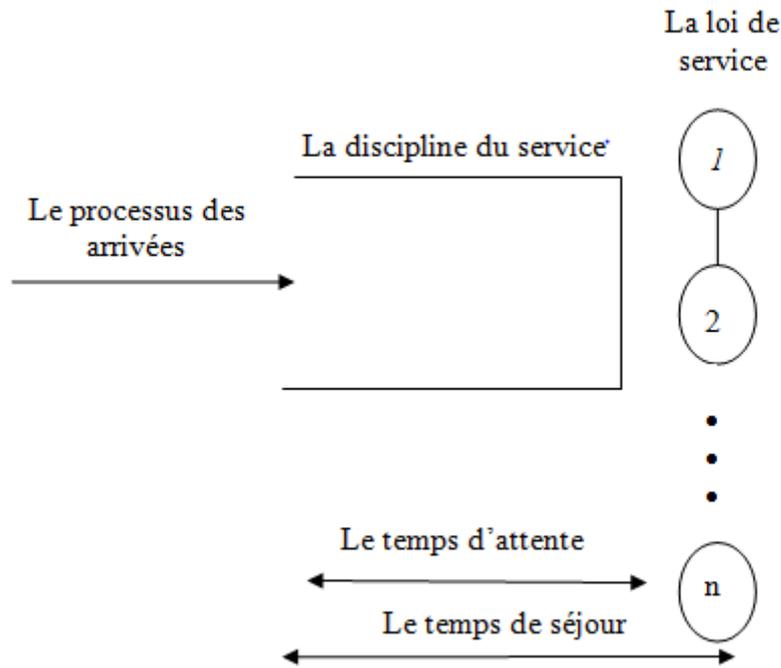


Figure 2.1 La station de service de base

2. Processus des arrivées

Les clients arrivent au sein du système en décrivant un processus déterminé. Ils peuvent par exemple être réguliers et leurs arrivées sont espacées par un temps égal soit à τ (c'est-à-dire chaque τ unités de temps, on a une arrivée); mais ce cas est rare et assez difficile à schématiser mathématiquement.

Le modèle le plus simple et le plus courant est celui des arrivées complètement aléatoires, ce qui est caractérisé par le processus de Poisson.

2.1 Processus de renouvellement [9]

Un processus de comptage dont la suite des inter-arrivées forme une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées s'appelle processus de renouvellement.

Un processus de renouvellement a pour fonction de dénombrer les occurrences d'un phénomène donné, lorsque les délais entre deux occurrences consécutives sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées. Il peut s'agir de compter le nombre de pannes d'un matériel électronique en théorie de la fiabilité (le matériel est alors renouvelé après chaque panne, d'où la dénomination), de dénombrer les arrivées de clients dans une file d'attente, de recenser les occurrences d'un sinistre pour une compagnie d'assurance...

2.2 Processus de Poisson [15]

Dans le formalisme des files d'attente, les arrivées des clients sont caractérisées par l'ensemble des instants ou dates d'arrivée de chaque client. Cette collection des dates d'arrivée s'appelle le processus des arrivées. Lorsque les dates d'arrivées sont imprévisibles, elles sont modélisées par des variables aléatoires (processus de Poisson).

Un processus de Poisson de taux λ est un processus d'arrivées vérifiant :

- La loi du nombre d'arrivées pendant un intervalle de temps de longueur t suit une loi de Poisson tel que :

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (\text{II.1})$$

Cette relation est donc extrêmement importante car elle représente la probabilité d'observer k arrivées dans un intervalle de durée t . Dans la pratique, il faut donc s'assurer avant d'utiliser les relations qui vont suivre que cette distribution soit bien respectée (avec un test du khi-deux typiquement).

- les temps entre arrivées τ sont indépendants et suivent une loi exponentielle de taux λ tel que :

$$A(t) = P(\tau \leq t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{II.2})$$

Nous pouvons aussi introduire la densité de probabilité de la variable aléatoire τ . Nous obtenons ainsi:

$$a(t) = \frac{\partial A(t)}{\partial t} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{II.3})$$

La densité de probabilité permet donc de calculer la durée moyenne entre deux arrivées :

$$E(\tau) = \int_0^{+\infty} t da(t) = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{II.4})$$

3. Processus des services

Le processus de service peut être d'une complexité extrême, mais on se borne le plus souvent à supposer que chaque durée de service est indépendante des autres, et qu'elles obéissent toutes à une même loi de distribution: on parle de variables indépendantes et identiquement distribuées [9]. On décrira cette loi par sa distribution de probabilité :

$$B(x) = P \{ \text{temps de service} \leq x \} \quad (\text{II.5})$$

3.1. Le temps de service résiduel :

Pour les différents types de files d'attente, le calcul de certains paramètres de performance (par exemple, le temps d'attente moyen ou le nombre moyen de clients en attente) devient simple si l'on est capable d'évaluer les temps de service résiduels des clients en cours de service.

Les temps de service résiduels sont définis comme les temps restants pour terminer les services des clients en cours de service au moment où un nouveau client entre dans la file. En général, dans le cas d'une file mono-serveur, on s'intéresse à la valeur moyenne de ces temps résiduels, \mathbf{tr} , appelée le résidu de service, et dans le cas des files multiserveurs, on s'intéresse à la valeur moyenne du plus petit des \mathbf{tr} pour l'ensemble des clients en cours de service, c'est-à-dire au minimum des résidus $\mathbf{min}(\mathbf{tr})$ [14].

3.2 La loi exponentielle [9]

la loi exponentielle est la plus courante dans la modélisation du processus de services dans les files d'attente.

La loi exponentielle est dite sans mémoire, et c'est la seule. Par exemple le temps de séjour ne dépend pas du tout du temps de séjour passé.

A partir de la distribution de Poisson, on peut déduire la fonction de répartition $B(x)$ et la fonction de densité $b(x)$:

$$B(x) = P (\text{temps de service} < x) = 1 - e^{-\mu x} \quad (\text{II.6})$$

$$b(x) = \mu e^{-\mu x} \quad (\text{II.7})$$

Ainsi que les paramètres suivants :

Moyenne de la variable :

$$E(x) = \frac{1}{\mu} \quad (\text{II.8})$$

Variance de la variable :

$$\text{Var}(x) = \frac{1}{\mu^2} \quad (\text{II.9})$$

μ : Taux moyen de service.

3.3 La loi d'erlang [9]

Supposons que le système de service soit composé d'un ensemble de k serveurs élémentaires exponentiels, identiques (c'est à dire, de même paramètre μ), et indépendants les uns des autres. Le temps du service est la somme des temps passés dans chaque serveur.

Supposons $k=2$. Notons X le temps total, X_1 et X_2 les durées des deux temps de services; la distribution $B(X)$ est donnée par la combinaison entre B_1 et B_2 :

$$P\{X \leq x\} = P\{X_1 + X_2 \leq x\} = \int_{\mu=0}^x B_1(x - \mu) \cdot dB_2(\mu) \quad (\text{II.10})$$

Evidemment, B_1 et B_2 sont identiques, et correspondent à une distribution exponentielle.

$$P\{X \leq x\} = \int_{\mu=0}^x [1 - e^{-\mu(x-\mu)}] \cdot \mu e^{-\mu x} d\mu = 1 - e^{-\mu x} - \mu x e^{-\mu x} \quad (\text{II.11})$$

On peut montrer que la mise en service de k serveurs exponentiels de même paramètre μ conduit à une distribution

$$B(x) = P\{X_1 + X_2 + \dots + X_k \leq x\} = 1 - \sum_{j=0}^k \frac{(\mu x)^j}{j!} e^{-\mu x} \quad (\text{II.12})$$

On appelle cette distribution la distribution d'Erlang- k , et la loi de probabilité est la "loi d'Erlang- k ". Puisqu'il s'agit d'une somme de variables aléatoires indépendantes, la moyenne et la variance s'obtiennent facilement :

- Moyenne de la variable : k/μ
- Variance de la variable : k/μ^2
- Le coefficient de variation est : $1/\sqrt{k}$.

4. Notion de trafic [7]

Dans la théorie des files d'attentes la notion de trafic représente le nombre de clients qui apparaissent dans la file sur le nombre de clients en service qui se termine pendant un intervalle de temps (temps moyen de service) ou d'un autre point de vue, l'utilisation moyenne du service(par unité de serveur) dont l'unité est l'**Erlang**.

Le taux de trafic ρ est donné par le rapport λ/μ et doit être strictement positif pour éviter l'engorgement donc :

$$\rho = \lambda/\mu \quad (\text{II.13})$$

λ et μ : Déjà définis dans les paragraphes précédents

5. Processus de naissance et de mort

5.1 La notion d'état

La notion d'état décrit l'état d'un système en donnant la liste des caractéristiques qu'il possède ainsi que les éléments qui permettent de prévoir son évolution.

Il en est de même pour un système stochastique, à la différence que la prévision du futur y prend un caractère probabiliste: on ne saura prévoir l'état exact dans quelques secondes, mais seulement sa distribution de probabilité.

5.2 Chaîne de Markov [13]

Une chaîne de Markov est un cas particulier de processus aléatoire. On appelle markoviens les processus qui remplissent de façon générale la propriété que « le futur ne dépend que du présent mais non du passé », propriété qui s'écrit formellement avec des probabilités conditionnelles. Lorsqu'un processus markovien est à temps discrets et à valeurs discrètes finies ou infinies dénombrables, on l'appelle chaîne de Markov.

Considérons un système pouvant se trouver dans n états E_1, E_2, \dots, E_n . (chaque état est défini par des valeurs particulières que prennent les paramètres définissant le système par exemples, (les caractéristiques d'un système d'attente, degré d'usure d'un matériel, etc...). Nous supposons que ces états possibles sont indépendants et que les transitions qui amènent successivement le système E_1, E_2, \dots, E_n ont lieu à des dates $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$, selon le processus ci-après :

- $P_i(t_k)$ la probabilité pour que le système se trouve dans l'état i à la date t_k ;
- $P_{ij}(t_k)$ la probabilité pour que le système se trouvant dans l'état i à la date t_k se trouve dans l'état j à la date $t_{k+1} \forall k=1,2,\dots, n$;
- $[P](t_k)$ la matrice des $p_{ij}(t_k)$.

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ \vdots & p_{32} & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n1} & \cdots & p_{nn} \end{pmatrix}$$

Nous pouvons écrire entre les éléments $P_{ij}(t_k)$ les relations fondamentales suivantes :

Pour tout i variant de 1 à n :

$$\sum_{j=1}^n P_{ij}(t_k) = 1 \quad (\text{II.14})$$

$$\sum_{i=1}^n P_i(t_{k-1})P_{ij}(t_{k-1}) = P_j(t_k) \quad (\text{II.15})$$

Appelons $\{P\}_k$ la matrice ligne formée des éléments $P_1(t_k), \dots, P_n(t_k)$.

La relation (II.15) s'écrit :

$$\{P\}_{t_k} = \{P\}_{t_{k-1}} \cdot [P]_{t_{k-1}} \quad (\text{II.16})$$

La relation (II.16) définit un processus de passage d'un état dans lequel se trouvait le système à l'instant t_{k-1} à l'état dans lequel il se trouve à l'instant t_k , qui ne dépend que de l'état à l'instant t_{k-1} et non de tous les états antérieurs.

5.3 Les processus de naissance et de mort [15]

Ce processus est la fusion des deux processus suivants : le processus de naissance et le processus de mort.

Un processus de naissance et de mort est un processus qui consiste à faire évoluer un système entre une infinité dénombrable ou non dénombrable (processus continu) d'états, le système étant à chaque instant dans un état et un seul. A titre d'exemple : une file d'attente devant un carrefour à feux, les états du système étant le nombre de voiture dans le lieu de service. L'arrivée des voitures peut être considérée comme une naissance et le départ des voitures peut être considéré comme une mort. Pour analyser le processus de naissance et de mort à espace d'état discret, on fait généralement les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : le système ne se déplace que vers l'un des états voisins : si le système est dans l'état E_n à l'instant t , il ne pourra passer à l'instant $t+\Delta t$ que dans les états E_{n+1} et on appelle ce passage « naissance », l'état E_{n-1} désignant le passage « mort », et enfin l'état de non changement E_n .

Hypothèse 2 : les probabilités de passage d'un état à un autre dépendent de l'état de départ considéré mais non de la date.

Hypothèse 3 : un événement au plus (naissance ou mort) peut survenir en un instant donné.

On doit supposer que pendant l'intervalle des temps élémentaire Δt il ne peut se produire qu'un seul évènement : soit une naissance, soit une mort ; car en réalité, il ne s'agit que d'un seul processus.

Désignons par N_t l'effectif au sein du système à la date t , Les probabilités de transitions doivent vérifier les conditions suivantes:

$$P_{ij}(\Delta t) = P(N_{t+\Delta t} = j / N_t = i) \tag{II.17}$$

$$P_{i,i+1}(\Delta t) = \lambda_i \cdot \Delta t + \theta(\Delta t) \tag{II.18}$$

$$P_{i,i-1}(\Delta t) = \mu_i \cdot \Delta t + \theta(\Delta t) \tag{II.19}$$

$$P_{i,i}(\Delta t) = 1 - (\lambda_i + \mu_i)\Delta t + \theta(\Delta t) \tag{II.20}$$

$$P_{ij}(0) = \sigma_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si } i = j \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \tag{II.21}$$

Les λ_i et μ_i sont strictement positifs, sauf $\mu_0 = 0$, où λ_i est le taux de naissance si i individus existent déjà dans le système, et μ_i est le taux de mort au sein du même système.

Le graphe de transition correspondant à ce système est le suivant :

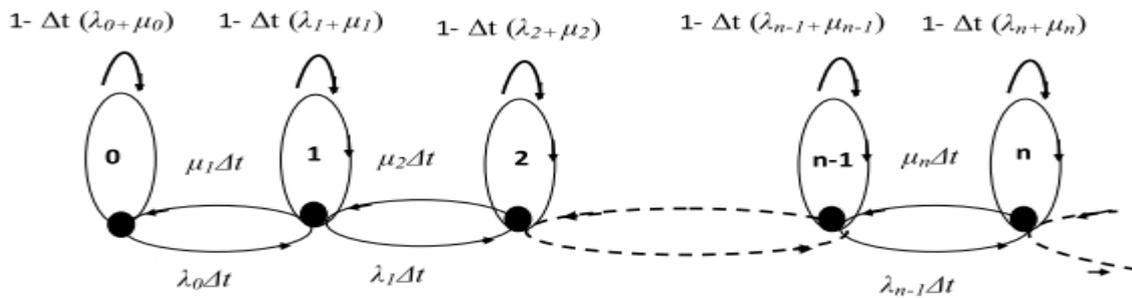


Figure 2.2 Graphe de transition d'un processus de naissance et de mort

❖ Matrice de transition correspondante

	E_0	E_1	E_2	E_3	...	E_n	...
E_0	$1 - \lambda_0 \Delta t$	$\lambda_0 \Delta t$	0	0	...	...	...
E_1	$\mu_1 \Delta t$	$1 - (\mu_1 + \lambda_1) \Delta t$	$\lambda_1 \Delta t$	...	...	...	...
E_2	0	$\mu_2 \Delta t$	$1 - (\mu_2 + \lambda_2) \Delta t$	$\lambda_2 \Delta t$	...	...	...
E_3	\vdots	0	$\mu_3 \Delta t$	\ddots	\vdots	...	...
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	...
E_n	0	0	0	0	$\mu_n \Delta t$	$1 - (\mu_n + \lambda_n) \Delta t$	...
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

6. Les files d'attentes classiques

L'identification des systèmes de files d'attente classiques se base principalement sur trois éléments : le processus stochastique décrivant l'arrivée des clients dans le système, le mécanisme de service (le nombre de serveurs et la loi probabiliste décrivant la durée des services) et enfin la discipline d'attente.

Le processus d'arrivée spécifie les instants auxquels les clients arrivent dans le système. Dans la théorie classique des files d'attente, on fait le plus souvent l'hypothèse que les clients arrivent de manière isolée et indépendamment les uns des autres. Sous ces hypothèses, les intervalles de temps entre deux arrivées successives forment une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées.

6.1 La notation de Kendall [10]

Très souvent les arrivées et les durées de service de chaque client sont imprévisibles. Elles sont donc modélisées par des processus stochastiques, et sont alors caractérisées par les lois marginales du processus.

Une notation, dite notation de Kendall est communément utilisée pour décrire les cinq caractéristiques d'une file d'attente. Elle se présente sous la forme d'un symbole A/S/P/K/D, où chacune des lettres désigne une caractéristique de la file, comme précisée dans le tableau ci-après :

Symbole	Désignation	
A	Loi des inter-arrivées (durée entre deux arrivées successives)	
	M	Distribution exponentielle (M=Markov)
	E_n	Distribution d'erlang a n phases
	D	Distribution déterministe
	U	Distribution uniforme
	G	Distribution quelconque (G=générale)
	GI	Distribution quelconque avec inter-arrivée deux à deux indépendantes
S	Loi des durées de service des clients : classification identique à celle des inter-arrivées	
P	Nombre de serveurs $\in \{1, 2, 3 \dots \infty\}$	
K	Capacité du système, c'est le nombre maximum de clients qui peuvent être présents simultanément dans le système, c'est-à-dire les clients en attente et les clients en service	
D	(Discipline ou politique) de service précisant comment les clients sont servis	

Tableau 2.1 Nomenclature de Kendall

❖ Discipline de service

La discipline de service détermine l'ordre dans lequel les clients sont rangés dans la file et y sont retirés pour recevoir un service. Les disciplines les plus courantes sont :

- **FIFO** (*first in, first out*) ou **FCFS** (*first come first served*) ou **PAPS** (premier arrivé, premier servi) : c'est la file standard dans laquelle les clients sont servis dans leur ordre d'arrivée. Notons que les disciplines FIFO et FCFS ne sont pas équivalentes lorsque la file contient plusieurs serveurs. Dans la première, le premier client arrivé sera le premier à quitter la file alors que dans la deuxième, il sera le premier à commencer son service. Rien n'empêche alors qu'un client qui commence son service après lui, dans un autre serveur, termine avant lui.
- **LIFO** (*last in, first out*) ou **LCFS** (*last come, first served*) ou **DAPS** (dernier arrivé, premier servi). Cela correspond à une file, dans laquelle le dernier client arrivé (donc posé sur la file) sera le premier traité (retiré de la file). A nouveau, les disciplines LIFO et LCFS ne sont pas équivalentes que pour une file mono-serveur.
- **RANDOM** (aléatoire) : Le prochain client qui sera servi est choisi aléatoirement dans la file d'attente.
- **Round-Robin** (cyclique). Tous les clients de la file d'attente entrent en service à tour de rôle, effectuant un quantum Q de leur temps de service et sont replacés dans la file, jusqu'à ce que leur service soit totalement accompli. Cette discipline de service a été introduite afin de modéliser des systèmes informatiques ;
- **PS** (*Processor Sharing*). C'est le cas limite de la distribution Round-Robin lorsque le quantum de temps Q tend vers 0. Tous les clients sont servis en même temps, mais avec une vitesse inversement proportionnelle au nombre de clients simultanément présents.

Si le taux du serveur est égal à μ et qu'à un instant donné il y a n clients à la station, tous les clients sont donc servis simultanément avec un taux μ/n .

6.2 La file M/M/1

En théorie des files d'attente, une file M/M/1 est un type de file d'attente classique. Le terme M/M/1, utilise la notation de Kendall, et signifie que la file possède un seul serveur et que les clients arrivent selon une loi Poissonienne, sont mis en attente dans une file et sont traités dans l'ordre d'arrivée, selon une loi exponentielle. C'est l'une des files d'attente les plus élémentaires [6].

❖ Modélisation [11]

La file M/M/1 est un exemple de processus de Markov à temps continu. Une file M/M/1 peut être vue comme un processus stochastique dont l'espace d'états est le nombre de clients dans le système (en attente ou en train d'être traités).

- Les clients arrivent selon une loi exponentielle de taux λ , changeant l'état du système de i à $i + 1$.
- Le taux de service suit une loi exponentielle de paramètre μ .
- Un serveur traite les clients un par un selon le mode premier arrivé, premier servi. Quand le service est fini, les clients quittent le système et le processus passe de l'état i à l'état $i-1$

❖ **Graphe d'état du système :**

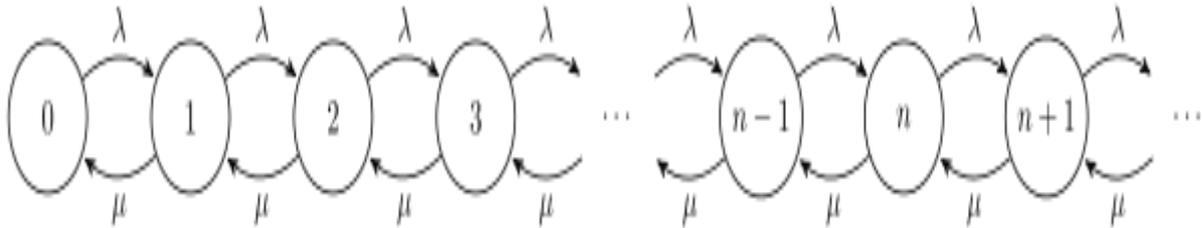


Figure 2.3 graphe d'état d'un système de file d'attente de type M/M/1

Stabilité et régime stationnaire :

La file est stable si et seulement si le taux d'arrivée est strictement plus petit que le taux de départ, c'est-à-dire $\lambda < \mu$. On pose : $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ soit l'intensité du trafic

- Le nombre de clients dans le système pendant le régime stationnaire suit une loi géométrique. Plus précisément, la probabilité d'être dans l'état i , c'est-à-dire d'avoir i client dans le système est :

$$P_i = (1-\rho) \cdot \rho^i \quad (\text{II.22})$$

- L'espérance du nombre de client dans le système:

$$E(i) = \frac{\rho}{1-\rho} = \frac{\lambda}{\mu-\lambda} \quad (\text{II.23})$$

- L'espérance du nombre de client dans la file :

$$n_a = \frac{\rho^2}{1-\rho} \quad (\text{II.24})$$

- L'espérance du nombre de client dans le serveur :

$$n_s = \rho \quad (\text{II.25})$$

- La variance et l'écart type sont respectivement:

$$\text{Var}(i) = \frac{\rho}{(1-\rho)^2} \quad (\text{II.26})$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\rho}}{1-\rho} \quad (\text{II.27})$$

- Le temps d'attente moyen dans la file:

$$E(w) = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)} \quad (\text{II.28})$$

- Le temps de séjours dans la file :

$$E(s) = E(w) + \tau = \frac{1}{\mu-\lambda} \quad (\text{II.29})$$

6.3 File M/M/s [7]

Les files M/M/s sont les plus simples à analyser, puisque le caractère markovien des temps d'arrivée et des temps de service implique que la longueur de la file est un processus Markovien de sauts.

La file M/M/s est un modèle de file d'attente qui possède s serveurs, dont les clients arrivent selon un processus de Poisson de paramètre λ , et dont le temps de service suit une loi exponentielle de paramètre μ .

Remarque : On considère la même modélisation que précédemment

❖ Taux de service :

On distingue deux cas :

1^{er} cas : si $i < s$ alors :

$$\mu_i = \frac{i}{\tau} = \mu \cdot i \quad (\text{II.30})$$

2^{ème} cas : si $i > s$ alors :

$$\mu_i = \frac{s}{\tau} = \mu \cdot s \quad (\text{II.31})$$

Avec :

s : Nombre de serveur

τ : Le temps de service d'un serveur

i : nombre de clients dans le système

❖ **L'équation d'équilibre pour la file M/M/s : [7]**

Désignant par A le trafic offert (total), ce qui implique que le trafic par serveur est :

$$\rho = \frac{A}{s} \quad (\text{II.32})$$

La condition de stabilité sera donc : $\rho < 1$

- La probabilité d'avoir i clients dans le système est :

– Si $i < s$:

$$p(i) = \frac{\frac{A^i}{i!}}{\sum_{i=0}^{s-1} \frac{A^i}{i!} + \frac{s}{s-A} \times \frac{A^s}{s!}} \quad (\text{II.33})$$

– Si $i = s+j > s$:

$$P(c+j) = \frac{A^s}{s!} \frac{\left(\frac{A}{s}\right)^j}{\sum_{i=0}^{s-1} \frac{A^i}{i!} + \frac{s}{s-A} \times \frac{A^s}{s!}} \quad (\text{II.34})$$

- La probabilité d'attente :

$$D = \frac{1}{1 - \frac{A}{s}} P(s) \quad (\text{II.35})$$

- Le nombre moyen de clients en attente :

$$N = \frac{A}{s-A} D \quad (\text{II.36})$$

- Temps d'attente dans la file :

$$E(w) = \frac{\tau}{s - A} D \quad (\text{II. 37})$$

- Temps de séjour :

$$E(s) = E(w) + \tau \quad (\text{II. 38})$$

6.4 Modèle à capacité limitée [7]

Un système M/M/1/m est un système dont la loi d'arrivée des clients est Markovienne (Poissonienne) et la loi de traitement est Markovienne (Exponentielle), qui possède un seul serveur, et dont la file d'attente est limitée à \mathbf{m} , où \mathbf{m} est un entier qui représente la taille limitée de la file.

- La probabilité d'avoir i clients dans le système :

- Si $\rho \neq 1$:

$$P(i) = \frac{\rho^i (1 - \rho)}{1 - \rho^{m+1}} \quad (\text{II. 39})$$

- Si $\rho = 1$:

$$P(i) = \frac{1}{1 + m} \quad (\text{II. 40})$$

- La probabilité de rejet ou probabilité pour qu'un client arrivant soit perdu

- Si $\rho \neq 1$:

$$P_m = \frac{\rho^m (1 - \rho)}{1 - \rho^{m+1}} \quad (\text{II. 41})$$

- Si $\rho = 1$:

$$P_m = \frac{1}{1 + m} \quad (\text{II. 42})$$

6.5 Modèle M/M/R/R (modèle d'erlang) [7]

Un système M/M/R/R est un système dont la loi d'arrivée des clients est Markovienne (Poissonienne) et dont la loi de traitement est Markovienne (Exponentielle), qui possède **R** serveurs, et dont la file d'attente est limitée à **R** donc la file est vide, tout nouveau client est servi immédiatement ou repart si aucun serveur n'est libre. On appelle ce modèle à perte.

- La probabilité d'avoir i clients dans le système :

$$P_i = \frac{\frac{A^i}{i!}}{1 + A + \frac{A^2}{2!} + \dots + \frac{A^R}{R!}} \quad (\text{II. 43})$$

- La probabilité pour que tous les serveurs soient occupés est donnée par la formule suivante dite d'Erlang-B:

$$P_R = \frac{\frac{A^R}{R!}}{\sum_{i=0}^R \frac{A^i}{i!}} \quad (\text{II. 44})$$

1. Définitions

1.1. Fiabilité [17]

La fiabilité d'un dispositif est définie comme étant sa probabilité de fonctionner correctement pendant une durée donnée ou, ce qui revient au même, la probabilité qu'aucune défaillance ne se produise pendant cette durée.

Afin de pouvoir traiter mathématiquement le concept de fiabilité, nous associons à chaque dispositif sa durée de vie ou durée de bon fonctionnement T ; Celle-ci peut être considérée comme une variable aléatoire continue et non négative. Si on admet que le dispositif a été mis en service à l'instant zéro, T représente également son instant de défaillance.

Pour décrire la distribution de la durée de vie T d'un dispositif, on fait appel aux fonctions suivantes :

- La fiabilité d'un dispositif à l'instant t est $R(t)$ tel que:

$$R(t) = P(T > t) = P \quad \text{(III.1)}$$

- La fonction de répartition de la variable aléatoire T :

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

- La densité de probabilité de T :

$$f(T) = F'(t) = -R'(t) \quad \text{(III.3)}$$

Indicateur de fiabilité λ et MTBF :

λ et la MTBF sont les deux principaux indicateurs de la fiabilité utilisés industriellement.

- λ représente le taux de défaillance ou le taux d'avarie. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps.

$$\lambda = \frac{\text{Nombre total de défaillances pendant le service}}{\text{Durée total de bon fonctionnement}}$$

- La durée de bon fonctionnement = la durée totale en service – la durée des défaillances
- Les unités utilisées sont : le nombre de défaillances par heures, le pourcentage de défaillances pour 1000 heures, etc...
- La MTBF (qui vient de l'anglais *Mean Time Between Failure*) représente la moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances d'un système réparable ou le temps moyen entre défaillances.

$$MTBF = \frac{\text{Somme des temps de bon fonctionnement entre } n \text{ défaillances}}{\text{Nombre des temps de bon fonctionnement}}$$

Si λ est constant :

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

1.2. Disponibilité [8]

La fiabilité seule ne suffit pas pour définir l'efficacité d'un système, il faut en mesurer la disponibilité lorsque le système est multi-composant et réparable.

La disponibilité est l'aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée. Les moyens autres que la logistique de maintenance (personnel, documentation, pièce de rechange ,etc.) n'affectent pas la disponibilité d'un bien.

La disponibilité se traduit par « *availability* » et se note souvent $A(t)$.

1.3. Défaillance

Il y a deux types importants de défaillances, les défaillances catalectiques (complètes, soudaines, à taux de défaillance souvent constant) et les défaillances de dérive (usure, fatigue) qui provoquent des baisses de performances.

1.4. Maintenabilité [17]

Dans des conditions données d'utilisation, la maintenabilité est l'aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir sa fonction requise, lorsque la maintenance est effectuée dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits.

Le terme « maintenabilité » est aussi défini comme une caractéristique indiquant une probabilité pour que le dispositif soit réparé dans un intervalle de temps donné.

Indicateur de maintenabilité μ et MTTR :

- μ représente le taux de réparation. Il caractérise la vitesse d'intervention au cours du temps.
- La MTTR (qui vient de l'anglais *Mean Time To Repair*) représente la moyenne des temps de réparation d'un système réparable.

$$MTTR = \frac{\text{somme des temps d'interventions pour } n \text{ pannes}}{\text{nombre de panne}}$$

Si μ est constant alors :

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (\text{III.5})$$

1.5. Redondance [19]

La redondance consiste à employer plus de composants qu'il n'en faut pour remplir une fonction. On distingue :

- La redondance active totale : les n composants sont constamment en service.
- La redondance active partielle (k parmi n) : l'ensemble est considéré défaillant si au moins k composants parmi n sont défaillants.
- Redondance à commutation : un seul composant est en service à un instant donné. Un organe auxiliaire détecte les défaillances de ce composant et connecte un nouveau composant pour assurer le service.
- Redondance à fonctionnement permanent : les composants de réserve fonctionnent en permanence, même s'ils ne sont pas en service.
- Redondance séquentielle : les composants de réserve ne fonctionnent pas.

2. Systèmes en série [17]

La défaillance d'un élément entraîne la défaillance de l'ensemble du système. On dit qu'un système est un système série d'un point de vue fiabilité, si le système tombe en panne lorsqu'un seul de ses éléments tombe en panne.

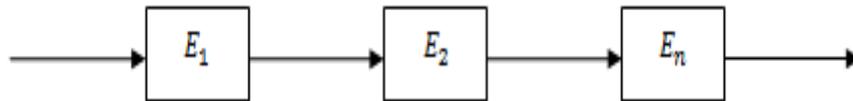


Figure 3.1 schéma bloc d'un système en série

- La disponibilité A_S du système est le produit de la disponibilité A_i des différents éléments :

$$A_S = \prod_{i=1}^n A_i \quad (\text{III. 6})$$

- La fiabilité R_S du système est le produit de la fiabilité de chaque élément :

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \quad (\text{III. 7})$$

3. Systèmes en parallèles [17]

On dit qu'un système est un système parallèle d'un point de vue fiabilité, lorsque le système ne tombe en panne que si tous ses composants tombent en panne.

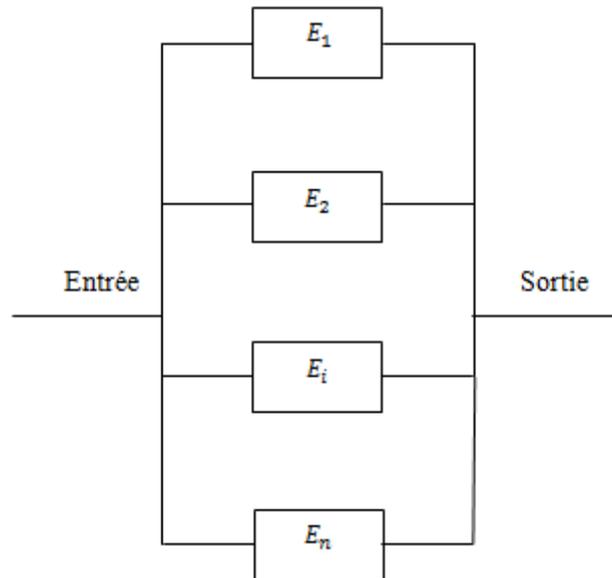


Figure 3.2 schéma bloc d'un système en parallèle

La disponibilité et la fiabilité d'un tel système sont données respectivement par les formules suivantes :

$$A_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i) \quad (\text{III. 8})$$

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (\text{III. 9})$$

4. Fiabilité et disponibilité des systèmes réparables en utilisant les chaînes de Markov [18]

4.1. Graphe d'état

Un système redondant constitué de n composants se trouve à un instant donné dans l'un des $(n + 1)$ états E_i caractérisés par le nombre i de composants en état de marche. E_n est l'état pour lequel tous les composants sont Fiables, E_0 l'état pour lequel tous les composants sont défectueux.

Dans un système non réparable, l'état du système ne peut évoluer que dans le sens d'une décroissance d'indice, tandis que dans un système réparable l'indice de l'état décroît lors d'une défaillance, mais croît lors d'une réparation.

L'évolution des états d'un système peut être représentée par un graphe orienté des états. Les nœuds constituent les états et les arcs représentent les transitions entre états.

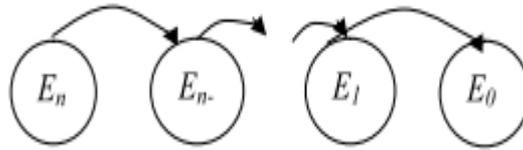


Figure 3.3 graphe d'état d'un système non réparable

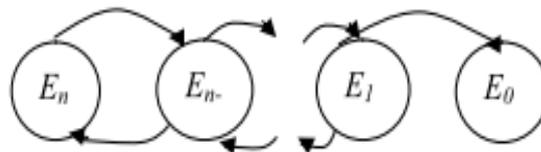


Figure 3.4 graphe d'état d'un système réparable

4.2. Equations générales d'état

On désignera par $P_i(t)$ la probabilité d'être dans l'état E_i à l'instant t , par $d_i(t)$ de la probabilité de passer de l'état E_i à l'état E_{i-1} entre les instants t et $t + dt$ (défaillance d'un composant) et par $r_i(t)$ de la probabilité de passer de l'état E_i à l'état E_{i+1} entre les instants t et $t + dt$ (réparation d'un composant).

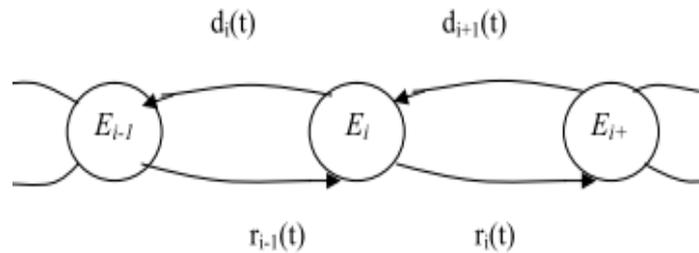


Figure 3.5 représentation générale d'une chaîne de Markov

En négligeant les termes du 2^e ordre, la probabilité d'être dans l'état E_i à l'instant $t + dt$ est :

$$P_i(t + dt) = P_{i+1}(t)d_{i+1}(t)dt + P_i(t)[1 - d_i(t)dt - r_i(t)dt] + P_{i-1}(t)r_{i-1}(t)dt \quad \text{(III. 10)}$$

La forme différentielle de cette équation est :

$$\frac{d}{dt}P_i(t) = P_{i+1}(t)d_{i+1}(t) - P_i(t)[d_i(t) + r_i(t)] + P_{i-1}(t)r_{i-1}(t) \quad \text{(III. 11)}$$

Les deux équations aux limites étant :

$$\frac{d}{dt}P_n(t) = -P_n(t)d_n(t) + P_{n-1}(t)r_{n-1}(t) \quad \text{(III. 12)}$$

$$\frac{d}{dt}P_0(t) = P_1(t)d_1(t) - P_0(t)r_0(t) \quad (\text{III. 13})$$

Cela implique :

$$\sum_{i=0}^n P_i(t) = 1 \quad (\text{III. 14})$$

4.3. Application à la fiabilité

À l'origine des temps, on suppose généralement que tous les composants sont bons, d'où :

$$P_n(0) = 1; P_i(0) = 0, \forall i \neq n \quad (\text{III. 15})$$

Si par contre on démarre d'un état où seuls k composants sont bons, on devra avoir comme conditions initiales :

$$P_k(0) = 1; P_i(0) = 0, \forall i \neq k \quad (\text{III. 16})$$

Pour calculer la fiabilité d'un système, on recherche l'état E_d d'indice le plus élevé qui entraîne la défaillance du système (**état absorbant**) et l'on a :

$$R(t) = \sum_{i=d+1}^n P_i(t) = 1 - \sum_{i=0}^d P_i(t) \quad (\text{III. 17})$$

Tel que :

$$r_j(t) = 0, \forall j \leq k \quad (\text{III. 18})$$

4.4. Application à la disponibilité

On détermine, comme pour la fiabilité, l'état E_d d'indice le plus élevé entraînant la défaillance du système, mais on conserve dans le système d'équations tous les termes $r_i(t)$.

La disponibilité est alors :

$$A(t) = \sum_{i=d+1}^n P_i(t) = 1 - \sum_{i=0}^d P_i(t) \quad (\text{III. 19})$$

4.5. Fiabilité des systèmes à taux de défaillance et de réparation constants

4.5.1. Système à redondance active totale

Dans l'état E_i , il y a i composants en fonctionnement, donc $d_i(t) = i\lambda$. Soit $MTTR$ la moyenne des temps de réparation et $\mu = \frac{1}{MTTR}$ le taux de réparation. Si un réparateur est toujours disponible, on aura : $r_i(t) = \mu$.

Les équations d'état pour la redondance active totale sont alors :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}P_n(t) = -n\lambda P_n(t) + \mu P_{n-1}(t) & \text{(III. 20)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}P_i(t) = P_{i+1}(t)(i+1)\lambda - (i\lambda + \mu)P_i(t) + \mu P_{i-1}(t) & \text{(III. 21)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}P_0(t) = \lambda P_1(t) & \text{(III. 22)} \end{cases}$$

❖ L'équation matricielle :

$$\begin{bmatrix} 1 - n\lambda & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n\lambda & 1 - [\mu + (n-1)\lambda] & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (i+1)\lambda & 1 - [\mu + i\lambda] & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\lambda & 1 - (\lambda + \mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 1 \end{bmatrix} \times \begin{cases} P_n(t)dt \\ P_{n-1}(t)dt \\ \dots \\ P_i(t)dt \\ \dots \\ P_1(t)dt \\ P_0(t)dt \end{cases}$$

$$= \begin{cases} P_n(t + dt) \\ P_{n-1}(t + dt) \\ \dots \\ P_i(t + dt) \\ \dots \\ P_1(t + dt) \\ P_0(t + dt) \end{cases}$$

D'où la fiabilité du système est :

$$R(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) = 1 - P_0 \quad \text{(III. 23)}$$

4.5.2. Système à redondance active partielle

Le même principe que la redondance active totale, sauf que l'état absorbant (défaillance du système) correspondra à l'état E_{k-1} et la fiabilité sera :

$$R_{k/n}(t) = \sum_{i=k}^n P_i(t) = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} P_i(t) \quad \text{(III. 24)}$$

4.5.3. Redondance séquentielle totale

Dans un état E_i , il n'y a qu'un seul composant en service, dont le taux de défaillance est λ_1 et $(i - 1)$ composants en réserve dont le taux de défaillance est λ_0 (λ_0 pouvant être nul).

Le graphe des états autour de l'état E_i est représenté par la figure ci-dessous, si μ est le taux de réparation des composants en réserve et qu'une seule réparation est faite à la fois.

L'état absorbant du système est l'état E_0

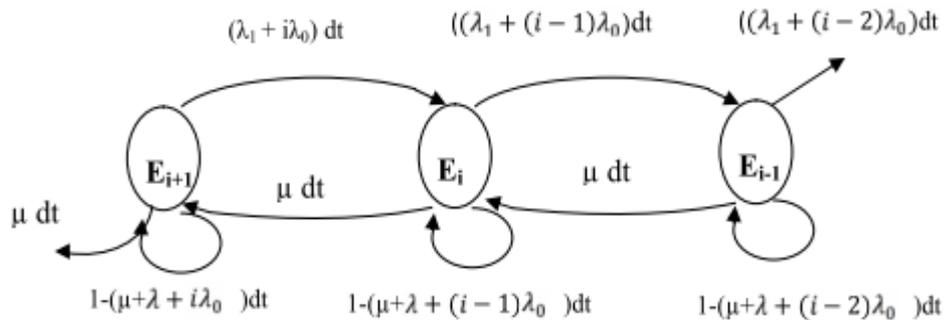


Figure 3.6 graphe d'état d'un système à redondance séquentielle totale avec 1 seul réparateur

4.5.4. Redondance séquentielle partielle

Le système nécessite k composants actifs et dans l'état initial E_n on dispose de $(n - k)$ composants de réserve. Dans l'état E_i , il y aura k composants actifs dont le taux de défaillance est λ_1 et $(i - k)$ composants en réserve, de taux de défaillance λ_0 .

L'état absorbant du système est l'état E_{k-1} . Le graphe des états autour de l'état E_i est représenté par la figure ci-dessous :

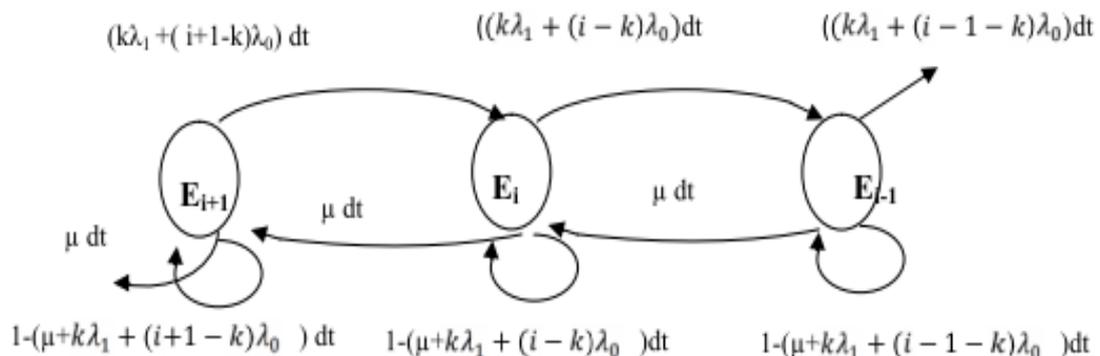


Figure 3.7 graphe d'état d'un système à redondance séquentielle partielle avec 1 seul réparateur

4.6. Disponibilité des systèmes à taux de défaillance et de réparation constants

4.6.1. Disponibilité non stationnaire

Comme nous l'avons dit précédemment, la disponibilité du système est déterminée de la même manière que la fiabilité sauf que pour la disponibilité, on prend en considération les termes $r_i(t)$ même après avoir atteint l'état absorbant.

Prenons par exemple le cas d'un système constitué de deux (2) composants en redondance active totale avec un seul réparateur. Le graphe des états est donné par la figure ci-dessous :

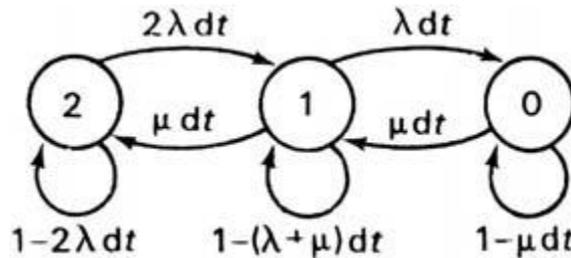


Figure 3.8 chaîne de Markov pour la disponibilité d'un système (2+0) à 1 seul réparateur

D'où l'on tire la matrice de transition :

$$\begin{bmatrix} 1 - 2\lambda\Delta t & 2\lambda\Delta t & 0 \\ 1 - (\lambda + \mu)\Delta t & \mu\Delta t & \lambda\Delta t \\ 0 & \mu\Delta t & 1 - \mu\Delta t \end{bmatrix}$$

Le système d'équations différentielles :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P_2(t) = -2\lambda P_2(t) + \mu P_1(t) & \text{(III. 25)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P_1(t) = 2\lambda P_2(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_0(t) & \text{(III. 26)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P_0(t) = \lambda P_1(t) - \mu P_0(t) & \text{(III. 27)} \end{cases}$$

Et le système d'équation transformée de Laplace :

$$\begin{cases} sP_2(s) - 1 = -2\lambda P_2(s) + \mu P_1(s) & \text{(III. 28)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} sP_1(s) = 2\lambda P_2(s) - (\lambda + \mu)P_1(s) + \mu P_0(s) & \text{(III. 28)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} sP_0(s) = \lambda P_1(s) - \mu P_0(s) & \text{(III. 30)} \end{cases}$$

La disponibilité non stationnaire est donc :

$$A(t) = 1 - P_0(t) \quad \text{(III. 31)}$$

4.6.2. Disponibilité stationnaire

Lorsque le temps croît indéfiniment, la disponibilité tend vers une valeur d'équilibre qui peut être obtenue directement à partir des équations transformées dont on annule les premiers membres :

Quand $t \rightarrow \infty$, $P_i(t) \rightarrow P(\infty) = P_i = cst$ donc $\frac{d}{dt}P_i(t) = 0 \forall i \in [0, n]$

Reprenons le même exemple que la disponibilité non stationnaire.

Les équations différentielles précédentes deviennent :

$$\begin{cases} 0 = -2\lambda P_2 + \mu P_1 & \text{(III. 32)} \\ 0 = 2\lambda P_2 - (\lambda + \mu)P_1 + \mu P_0 & \text{(III. 33)} \\ 0 = \lambda P_1 - \mu P_0 & \text{(III. 34)} \end{cases}$$

La résolution de ce système d'équation nous donne la disponibilité stationnaire :

$$A = 1 - P_0 = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2} \quad \text{(III. 35)}$$

Les données statistiques :

- Année 2013

Les arrivées des tankers par mois (Port pétrolier) :

Mois	Nombre de tankers
Janvier	1
Février	2
Mars	5
Avril	2
Mai	2
Juin	3
Juillet	4
Août	3
Septembre	5
Octobre	4
Novembre	2
Décembre	6

Tableau 4.1 Liste des arrivées par mois au port en 2013**Les arrivées des tankers par mois (SPM) :**

Mois	Nombre de tankers
Janvier	2
Février	5
Mars	2
Avril	4
Mai	4
Juin	2
Juillet	3
Août	2
Septembre	3
Octobre	3
Novembre	2
Décembre	1

Tableau 4.2 Liste des arrivées par mois à SPM en 2013

Occupation des postes (Port pétrolier) :

Navire N°	(h)	Navire N°	(h)	Navire N°	(h)
1	34,6	14	31,1	27	33,9
2	22,4	15	27,9	28	34,2
3	22,6	16	27,3	29	26,2
4	31,6	17	28,6	30	26,1
5	23,1	18	27	31	35
6	23,9	19	22,5	32	23,1
7	27,1	20	27,1	33	23,2
8	28,3	21	22	34	33,1
9	25,4	22	30,4	35	22,9
10	30,4	23	25,3	36	23,4
11	36	24	30,1	37	24,7
12	22,1	25	26,6	38	21,9
13	31,6	26	26,1	39	36,4

Tableau 4.3 Temps d'occupation par navire des postes du port en 2013**Occupation de la bouée (SPM) :**

Navire N°	(h)	Navire N°	(h)	Navire N°	(h)
1	26,6	12	26,1	23	34,9
2	26,6	13	21,1	24	50,3
3	33,2	14	48,1	25	44,9
4	26,9	15	55,1	26	33,1
5	34,1	16	29,7	27	24,6
6	41,4	17	33,3	28	34,6
7	25,1	18	29,6	29	52,4
8	40,3	19	50,8	30	27,2
9	26,4	20	29,1	31	28,3
10	25,2	21	23,9	32	29,9
11	30,6	22	42,1	33	24,7

Tableau 4.4 Temps d'occupation par navire de la bouée en 2013

- **Année 2014**

Les arrivées des tankers par mois (Port pétrolier) :

Mois	Nombre de tankers
Janvier	3
Février	4
Mars	5
Avril	4
Mai	3
Juin	4
Juillet	6
Août	7
Septembre	6
Octobre	4
Novembre	2
Décembre	5

Tableau 4.5 Liste des arrivées par mois au port en 2014

Les arrivées des tankers par mois (SPM) :

Mois	Nombre de tankers
Janvier	4
Février	3
Mars	1
Avril	5
Mai	3
Juin	5
Juillet	2
Août	3
Septembre	2
Octobre	2
Novembre	4
Décembre	2

Tableau 4.6 Liste des arrivées par mois à SPM en 2014

Occupation des postes (Port pétrolier) :

Navire N°	(h)	Navire N°	(h)	Navire N°	(h)
1	26,7	19	30,2	37	37,25
2	31,2	20	28,4	38	26,4
3	34,5	21	41,2	39	26,5
4	30,3	22	38,3	40	42
5	24,7	23	29,2	41	33,5
6	27,7	24	28,3	42	26
7	31,4	25	27,2	43	23,9
8	29,05	26	24,6	44	24
9	34,3	27	34,6	45	46,7
10	40,6	28	44,05	46	27,4
11	30,2	29	33,2	47	25,7
12	30,2	30	52,1	48	40,1
13	29,4	31	46,9	49	45,7
14	30,2	32	35,5	50	39,25
15	25,7	33	23	51	26,9
16	35,45	34	26,9	52	26,9
17	40,6	35	26,2	53	48,2
18	27,7	36	34,25		

Tableau 4.7 Temps d'occupation par navire des postes du port en 2014**Occupation de la bouée (SPM) :**

Navire N°	(h)	Navire N°	(h)	Navire N°	(h)
1	25,2	13	31,8	25	32
2	25,2	14	28,8	26	37,7
3	40,5	15	42,4	27	25,4
4	31,1	16	26,8	28	31,3
5	48,6	17	28,2	29	50,3
6	26,3	18	36,1	30	35,2
7	29,4	19	33,2	31	58,6
8	30,1	20	26	32	43,2
9	27,7	21	29,1	33	38,1
10	29,8	22	37,3	34	32,8
11	30,2	23	34,3	35	51,8
12	27,8	24	37,6	36	46,1

Tableau 4.8 Temps d'occupation par navire de la bouée en 2014

- **Année 2015**

Durant toute cette année la bouée de chargement en haute mer était indisponible, ce qui explique le nombre important de chargement au niveau du port pétrolier.

Les arrivées des tankers par mois (Port pétrolier) :

Mois	Nombre de tankers
Janvier	7
Février	8
Mars	10
Avril	8
Mai	8
Juin	10
Juillet	6
Août	9
Septembre	7
Octobre	8
Novembre	7
Décembre	9

Tableau 4.9 Liste des arrivées par mois au port en 2015

Occupation des postes (Port pétrolier) :

Navire N°	(h)	Navire N°	(h)	Navire N°	(h)
1	25,25	34	25,75	67	27,6
2	25,3	35	23,9	68	29,9
3	25,6	36	33,2	69	31,7
4	23,8	37	34,75	70	28
5	38	38	24,15	71	26,7
6	23,8	39	23,25	72	29,65
7	24,8	40	25,8	73	27,3
8	32	41	23,4	74	29,3
9	33	42	23,8	75	26,8
10	22,6	43	25,6	76	30,9
11	43	44	23,4	77	26,1
12	25	45	23,15	78	40
13	40,75	46	42	79	27,25
14	25,3	47	25	80	20,6
15	21	48	23,5	81	44
16	35,2	49	35,9	82	29,5
17	24,5	50	24,8	83	27,9
18	25	51	25,8	84	25,3
19	25,9	52	50,4	85	43,5
20	24,9	53	39	86	27,05
21	22,9	54	32,5	87	39,9
22	32,4	55	36,3	88	26,6
23	33,8	56	36,6	89	28,7
24	22,3	57	32,9	90	28,4
25	36	58	33,3	91	30,25
26	24	59	34,9	92	27,8
27	25,7	60	28,1	93	22,1
28	25,2	61	29,2	94	27,1
29	25,4	62	27,9	95	27,2
30	24,9	63	26,75	96	22,7
31	23,2	64	35	97	45
32	22,3	65	29,9		
33	32,4	66	29,25		

Tableau 4.10 Temps d'occupation par navire des postes du port en 2015

5. Application à l'année 2013 :

5.1. Détermination de la loi de répartition des arrivées :

5.1.1. Port Pétrolier :

Après avoir partagé les différentes valeurs tel que :

i : N° de la classe ;

x_i : nombre de tankers ;

n_i : nombre de mois correspondant à l'arrivée de x_i tankers ;

P_i : probabilité que x_i tankers arrivent par mois.

On obtient le tableau suivant :

i	x_i	n_i	P_i
1	1	1	0,0833
2	2	4	0,3333
3	3	2	0,1667
4	4	2	0,1667
5	5	2	0,1667
6	6	1	0,0833
Somme	/	12	1,0000

Tableau 4.11 Probabilités des arrivées au port en 2013

On peut émettre une hypothèse suivant la forme de l'histogramme.

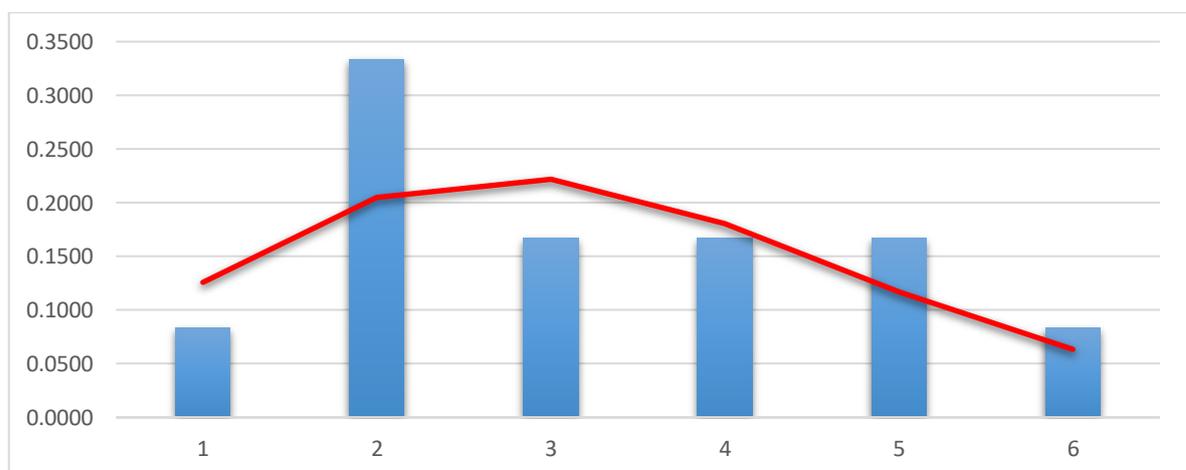


Figure 4.1 Histogramme des arrivées au port en 2013

Hypothèse : les arrivées suivent une loi de Poisson.

Calcul de la moyenne :

$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot P_i$$

$$m = 3,25$$

Test de khi deux χ^2 :

x_i	n_i	P_i^*	$N \cdot P_i^*$	$n_i - N \cdot P_i^*$	$(n_i - N \cdot P_i^*)^2 / N \cdot p_i^*$
1	1	0,1260	1,5122	-0,5122	0,1735
2	4	0,2048	2,4573	1,5427	0,9685
3	2	0,2218	2,6621	-0,6621	0,1647
4	2	0,1802	2,1629	-0,1629	0,0123
5	2	0,1172	1,4059	0,5941	0,2510
6	1	0,0635	0,7615	0,2385	0,0747
Somme	12	0,8500		Khi2	1,6446

Tableau 4.12 Test de khi deux des arrivées au port en 2013

$$\chi^2 = 1,6446 < \chi_{0,05,5}^2 = 11,0705$$

Hypothèse admise.

Calcul du taux d'arrivée :

$$\lambda = m = 3,25 \text{ Navire/mois}$$

$$\lambda = 0,0045 \text{ Navire/h}$$

5.1.2. Bouée (SPM) :

Après avoir partagé les différentes valeurs on obtient le tableau suivant :

i	x_i	n_i	P_i
1	1	1	0,0833
2	2	5	0,4167
3	3	3	0,2500
4	4	2	0,1667
5	5	1	0,0833
6	6	0	0,0000
Somme	/	12	1,0000

Tableau 4.13 Probabilités des arrivées à SPM en 2013

On peut émettre une hypothèse suivant la forme de l'histogramme.

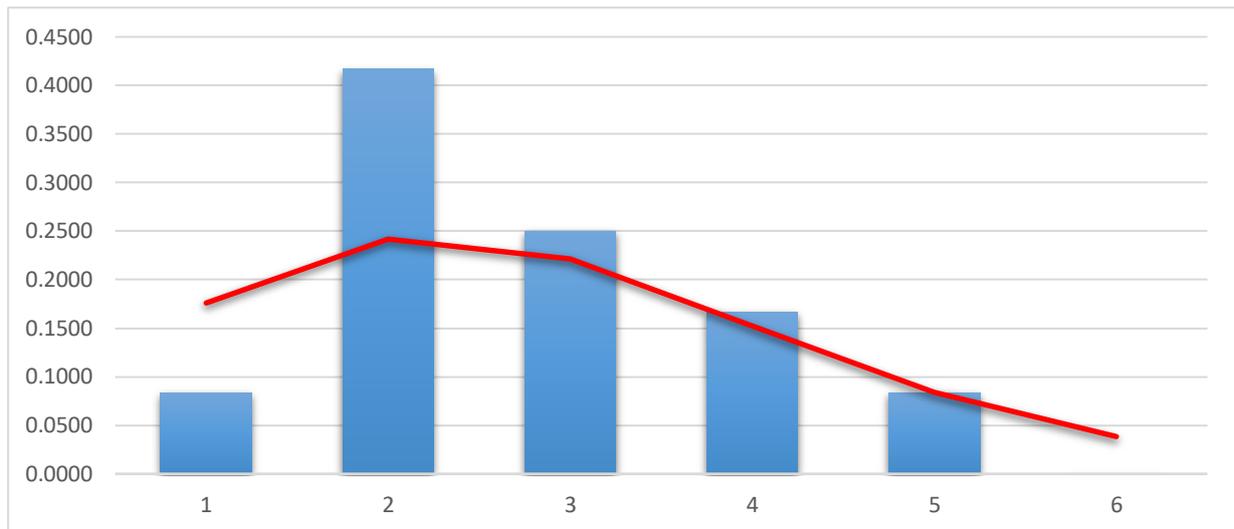


Figure 4.2 Histogramme des arrivées à SPM en 2013

Hypothèse : les arrivées suivent une loi de Poisson.

Calcul de la moyenne :

$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot P_i$$

K : nombre de classe ;

$$m = 2,75$$

Test de khi deux χ^2 :

x_i	n_i	P_i^*	$N \cdot P_i^*$	$n_i - N \cdot P_i^*$	$(n_i - N \cdot P_i^*)^2 / N \cdot P_i^*$
1	1	0,1758	2,1096	-1,1096	0,5836
2	5	0,2417	2,9007	2,0993	1,5193
3	3	0,2216	2,6590	0,3410	0,0437
4	2	0,1523	1,8281	0,1719	0,0162
5	1	0,0838	1,0054	-0,0054	0,0000
6	0	0,0384	0,4608	-0,4608	0,4608
Somme	12	0,9136	/	Khi2	2,6237

Tableau 4.14 Test de khi deux des arrivées à SPM en 2013

$$\chi^2 = 2,6237 < \chi_{0,05,5}^2 = 11,0705$$

Hypothèse admise.

Calcul du taux d'arrivée :

$$\lambda = m = 2,75 \text{ Navire/mois}$$

$$\lambda = 0,0038 \text{ Navire/h}$$

5.2. Détermination de la loi de service :

5.2.1. Port pétrolier :

Après avoir réparti les différentes valeurs en classes tel que :

i : N° de la classe ;

I_i : durée du service ou chargement (en heure) ;

n_i : nombre de tankers correspondant à la durée de service ;

P_i : probabilité que la durée de service soit comprise dans l'intervalle I_i .

On obtient le tableau suivant :

i	I_i	n_i	P_i
1	21-24	12	0,3077
2	24-27	8	0,2051
3	27-30	7	0,1795
4	30-33	6	0,1538
5	33-36	4	0,1026
6	36-39	2	0,0513
Somme		39	1

Tableau 4.15 Probabilités des durées de service au port en 2013

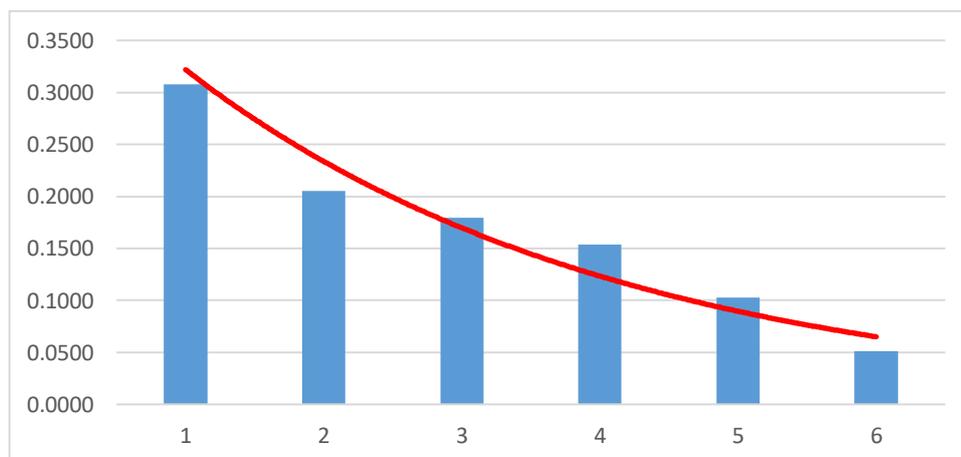


Figure 4.3 Histogramme des durées de service au port en 2013

Hypothèse : les durées de service suivent une loi exponentielle

Calcul de la moyenne :

$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot P_i$$

K : nombre de classes

x_i : centre de la classe

$$m = 27,5769$$

Test de khi deux χ^2 :

i	I _i	n _i	P _i *	N.P _i *	n _i -N.p _i *	(n _i -N.p _i *) ² /N.P _i *
1	0-3	12	0,3663	14,2847	-2,2847	0,3654
2	3-6	8	0,2321	9,0526	-1,0526	0,1224
3	6-9	7	0,1471	5,7369	1,2631	0,2781
4	9-12	6	0,0932	3,6356	2,3644	1,5377
5	12-15	4	0,0591	2,3040	1,6960	1,2485
6	15-∞	2	0,1022	3,9863	-1,9863	0,9897
Somme	/	39	1,0000	39,0000	Khi 2	4,5419

Tableau 4.16 Test de khi deux des durées de service au port en 2013

$$\chi^2 = 4,5419 < \chi_{0,05,5}^2 = 11,0705$$

Hypothèse admise.

Calcul du taux de service :

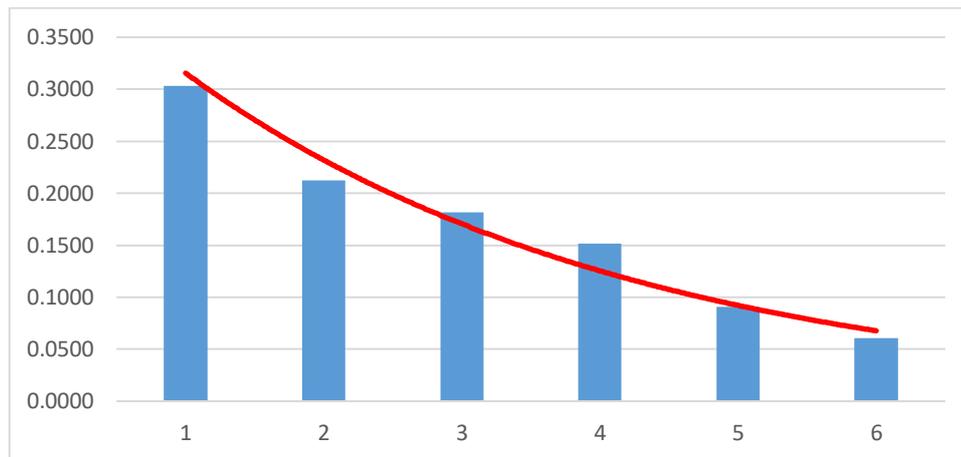
$$\mu = \frac{1}{m} = 0,0363 \text{ Navire/h}$$

5.2.2. Bouée (SPM) :

Après avoir réparti les valeurs en classes on obtient le tableau suivant :

i	I _i	n _i	P _i
1	21-27	10	0,3030
2	27-33	7	0,2121
3	33-39	6	0,1818
4	39-45	5	0,1515
5	45-51	3	0,0909
6	51-57	2	0,0606
Somme	/	33	1

Tableau 4.17 Probabilités des durées de service à SPM en 2013

Histogramme :**Figure 4.4** Histogramme des durées de service à SPM en 2013

Hypothèse : les durées de service suivent une loi exponentielle

Calcul de la moyenne :

$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot P_i$$

$$m = 34,1818$$

Test de khi deux χ^2 :

i	I _i	n _i	P _i *	N.P _i *	n _i -N.P _i *	(n _i -N.P _i *) ² /N.P _i *
1	0-6	10	0,3657	12,0668	-2,0668	0,3540
2	6-12	7	0,2320	7,6545	-0,6545	0,0560
3	12-18	6	0,1471	4,8555	1,1445	0,2698
4	18-24	5	0,0933	3,0800	1,9200	1,1968
5	24-30	3	0,0592	1,9538	1,0462	0,5602
6	30-∞	2	0,1027	3,3894	-1,3894	0,5695
Somme	/	33	1,0000	33,0000	Khi 2	3,0063

Tableau 4.18 Test de khi deux des durées de service à SPM en 2013

$$\chi^2 = 3,0063 < \chi_{0,05,5}^2 = 11,0705$$

Hypothèse admise.

Calcul du taux de service :

$$\mu = \frac{1}{m} = 0,0293 \text{ Navire/h}$$

5.3. Calcul des attentes :

Rappel du modèle mathématique M/M/S :

a) Probabilité d'avoir 0 client dans le système :

$$P_0(t) = \frac{1}{\frac{\psi^S}{S!(1-\frac{\psi}{S})} + \sum_{i=0}^{S-1} \frac{\psi^i}{i!}} \quad (\text{IV.15})$$

S : nombre de serveurs (postes de chargements)

b) Probabilité d'avoir n clients dans le système :

$$P_n(t) = \frac{\psi^n}{n!} P_0(t) \quad 1 \leq n < S \quad (\text{IV.16})$$

$$P_n(t) = \frac{\psi^n}{S^{n-S} S!} P_0(t) \quad n \geq S \quad (\text{IV.17})$$

c) Le nombre moyen de client dans la file d'attente :

$$N = \frac{\psi \cdot S}{(S-\psi)^2} P_S(t) \quad (\text{IV.18})$$

d) Durée d'attente moyenne du client dans une file :

$$t_f = \frac{\psi^S}{\left(1-\frac{\psi}{S}\right)^2 \cdot \mu \cdot S \cdot S!} P_0(t) \quad (\text{IV.19})$$

e) Temps de séjour dans le système :

$$T = t_f + \tau \quad (\text{IV.20})$$

5.3.1. Port pétrolier :

- Densité de trafic :

$$\psi = \frac{\lambda}{\mu} = 0,1243$$

- Application du modèle M/M/S :

On a S = 2 (2 postes de chargement).

Probabilité d'avoir 0 client dans le système :

$$P_0 = 0,8829$$

Probabilité d'avoir 1 client dans le système :

$$P_1 = 0,1098$$

Probabilité d'avoir 2 clients dans le système :

$$P_2 = 0,0068$$

Probabilité d'avoir plus de 2 clients dans le système :

$$P(n > 2) = 0,0005$$

Nombre moyen de clients dans la file :

$$N = 0,00048 \text{ navire}$$

Durée d'attente moyenne du client dans la file :

$$t_f = 0,1070 \text{ h/navire}$$

Temps moyen de séjour dans le système :

$$T = 27,6839 \text{ h/navire}$$

5.3.2. Bouée (SPM) :

- Densité de trafic :

$$\Psi = \frac{\lambda}{\mu} = 0,1304$$

- Application du modèle M/M/S :

On a $S = 1$ (1 poste de chargement).

Probabilité d'avoir 0 client dans le système :

$$P_0 = 0,8696$$

Probabilité d'avoir 1 client dans le système :

$$P_1 = 0,1134$$

Probabilité d'avoir 2 clients dans le système :

$$P_2 = 0,0148$$

Probabilité d'avoir plus de 2 clients dans le système :

$$P(n > 2) = 0,0022$$

Nombre moyen de clients dans la file :

$$N = 0,01954 \text{ navire}$$

Durée d'attente moyenne du client dans la file :

$$t_f = 5,1237 \text{ h/navire}$$

Temps moyen de séjour dans le système :

$$T = 39,3055 \text{ h/navire}$$

6. Application à l'année 2014 :

6.1. Détermination de la loi de répartition des arrivées :

6.1.1. Port Pétrolier :

Après avoir partagé les différentes valeurs On obtient le tableau suivant :

i	x_i	n_i	p_i
1	2	1	0,0833
2	3	2	0,1667
3	4	4	0,3333
4	5	2	0,1667
5	6	2	0,1667
6	7	1	0,0833
Somme	/	12	1,0000

Tableau 4.19 Probabilités des arrivées au port en 2014

On peut émettre une hypothèse suivant la forme de l'histogramme.

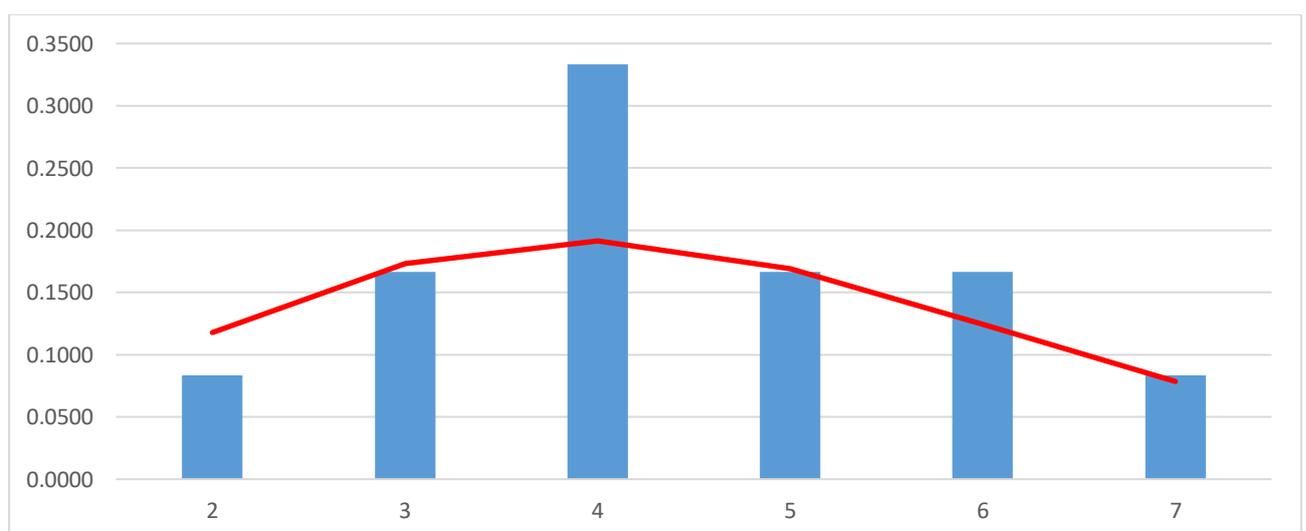


Figure 4.5 Histogramme des arrivées au port en 2014

Hypothèse : les arrivées suivent une loi de Poisson.

Calcul de la moyenne :

$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot P_i$$

$$m = 4,4167$$

Test de khi deux χ^2 :

xi	ni	pi*	N.pi*	ni-N.pi*	(ni-N.pi*) ² /N.pi*
2	1	0,1178	1,4132	-0,4132	0,1208
3	2	0,1734	2,0806	-0,0806	0,0031
4	4	0,1914	2,2973	1,7027	1,2620
5	2	0,1691	2,0293	-0,0293	0,0004
6	2	0,1245	1,4938	0,5062	0,1716
7	1	0,0785	0,9425	0,0575	0,0035
/	12	0,8547		khi2	1,5615

Tableau 4.20 Test de khi deux des arrivées au port en 2014

$$\chi^2 = 1,5615 < \chi_{0,05,5}^2 = 11,0705$$

Hypothèse admise.

Calcul du taux d'arrivée :

$$\lambda = m = 4,4167 \text{ Navire/mois}$$

$$\lambda = 0,0061 \text{ Navire/h}$$

6.1.2. Bouée (SPM) :

Après avoir partagé les différentes valeurs on obtient le tableau suivant :

i	xi	ni	pi
1	1	1	0,0833
2	2	4	0,3333
3	3	3	0,2500
4	4	2	0,1667
5	5	2	0,1667
6	6	0	0,0000
Somme	/	12	1,0000

Tableau 4.21 Probabilités des arrivées à SPM en 2014

On peut émettre une hypothèse suivant la forme de l'histogramme.

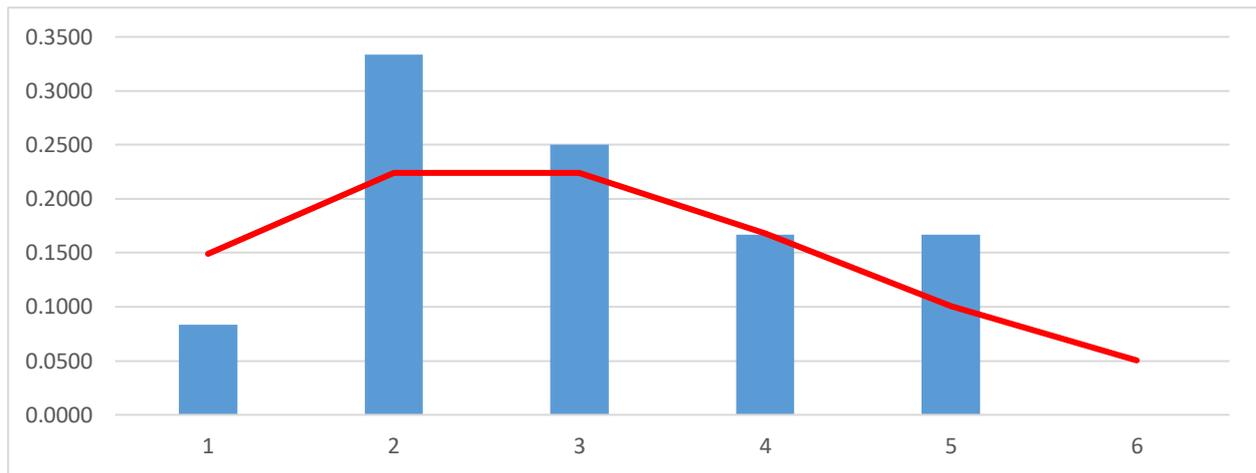


Figure 4.6 Histogramme des arrivées à SPM en 2014

Hypothèse : les arrivées suivent une loi de Poisson.

Calcul de la moyenne :

$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot P_i$$

$$m = 3$$

Test de khi deux χ^2 :

xi	ni	pi*	N.pi*	ni-N.pi*	(ni-N.pi*) ² /N.pi*
1	1	0,1494	1,7923	-0,7923	0,3503
2	4	0,2240	2,6885	1,3115	0,6398
3	3	0,2240	2,6885	0,3115	0,0361
4	2	0,1680	2,0164	-0,0164	0,0001
5	2	0,1008	1,2098	0,7902	0,5161
6	0	0,0504	0,6049	-0,6049	0,6049
Somme	12	0,9167		khi2	2,1473

Tableau 4.22 Test de khi deux des arrivées à SPM en 2014

$$\chi^2 = 2,1473 < \chi_{0,05,5}^2 = 11,0705$$

Hypothèse admise.

Calcul du taux d'arrivée :

$$\lambda = m = 3 \text{ Navire/mois}$$

$$\lambda = 0,0042 \text{ Navire/h}$$

6.2. Détermination de la loi de service :

6.2.1. Port pétrolier :

Après avoir réparti les différentes valeurs en classes on obtient le tableau suivant :

i	li	ni	pi
1	23-28	19	0,3585
2	28-33	12	0,2264
3	33-38	9	0,1698
4	38-43	6	0,1132
5	43-48	5	0,0943
6	48-53	2	0,0377
Somme	/	53	1

Tableau 4.23 Probabilités des durées de service au port en 2014

Histogramme :

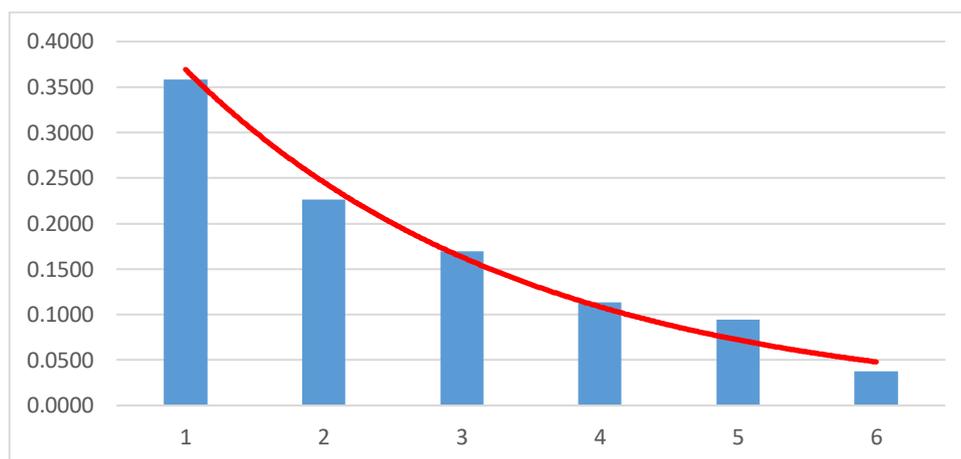


Figure 4.7 Histogramme des durées de service au port en 2014

Hypothèse : les durées de service suivent une loi exponentielle

Calcul de la moyenne :

$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot P_i$$

$$m = 32,8585$$

Test de khi deux χ^2 :

li	xi	ni	Pi*	N.Pi*	ni-N.pi*	(ni-N.pi*) ² /N.Pi*
0-5	2,5	19	0,3978	21,0838	-2,0838	0,2059
5-10	7,5	12	0,2396	12,6965	-0,6965	0,0382
10-15	12,5	9	0,1443	7,6457	1,3543	0,2399
15-20	17,5	6	0,0869	4,6042	1,3958	0,4231
20-25	22,5	5	0,0523	2,7726	2,2274	1,7893
25-∞	27,5	2	0,0792	4,1972	-2,1972	1,1502
Somme	/	53	1,0000	53,0000	Khi 2	3,8467

Tableau 4.24 Test de khi deux des durées de service au port en 2014

$$\chi^2 = 3,8467 < \chi_{0,05,5}^2 = 11,0705$$

Hypothèse admise.

Calcul du taux de service :

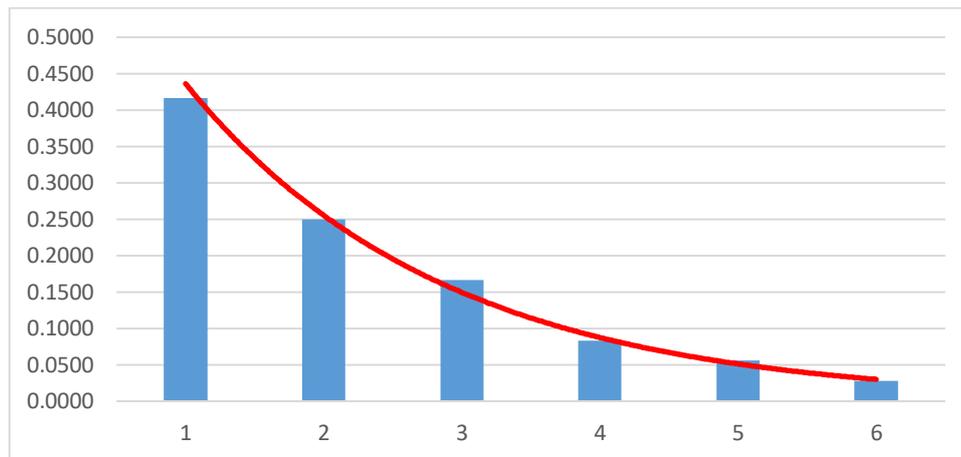
$$\mu = \frac{1}{m} = 0,0304 \text{ Navire/h}$$

6.2.2. Bouée (SPM) :

Après avoir réparti les valeurs en classes on obtient le tableau suivant :

i	li	ni	pi
1	25-31	15	0,4167
2	31-37	9	0,2500
3	37-43	6	0,1667
4	43-49	3	0,0833
5	49-55	2	0,0556
6	55-61	1	0,0278
Somme	/	36	1

Tableau 4.25 Probabilités des durées de service à SPM en 2014

Histogramme :**Figure 4.8** Histogramme des durées de service à SPM en 2014

Hypothèse : les durées de service suivent une loi exponentielle

Calcul de la moyenne :

$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot P_i$$

$$m = 35,1667$$

Test de khi deux χ^2 :

li	xi	ni	Pi*	N.Pi*	ni-N.pi*	(ni-N.pi*) ² /N.Pi*
0-6	3	15	0,4458	16,0475	-1,0475	0,0684
6-12	9	9	0,2471	8,8941	0,1059	0,0013
12-18	15	6	0,1369	4,9294	1,0706	0,2325
18-24	21	3	0,0759	2,7321	0,2679	0,0263
24-30	27	2	0,0421	1,5142	0,4858	0,1558
30-∞	33	1	0,0523	1,8827	-0,8827	0,4138
		36	1,0000	36,0000	Khi 2	0,8981

Tableau 4.26 Test de khi deux des durées de service à SPM en 2014

$$\chi^2 = 0,8981 < \chi_{0,05,5}^2 = 11,0705$$

Hypothèse admise.

Calcul du taux de service :

$$\mu = \frac{1}{m} = 0,0284 \text{ Navire/h}$$

6.3. Calcul des attentes :

6.3.1. Port pétrolier :

- Densité de trafic :

$$\Psi = \frac{\lambda}{\mu} = 0,2018$$

- Application du modèle M/M/S :

On a $S = 1$ (1 poste de chargement).

Probabilité d'avoir 0 client dans le système :

$$P_0 = 0,7982$$

Probabilité d'avoir 1 client dans le système :

$$P_1 = 0,1611$$

Probabilité d'avoir 2 clients dans le système :

$$P_2 = 0,0325$$

Probabilité d'avoir plus de 2 clients dans le système :

$$P(n > 2) = 0,0082$$

Nombre moyen de clients dans la file :

$$N = 0,05101 \text{ navire}$$

Durée d'attente moyenne du client dans une file :

$$t_f = 8,3065 \text{ h/navire}$$

Temps moyen de séjour dans le système :

$$T = 41,1650 \text{ h/navire}$$

6.3.2. Bouée (SPM) :

- Densité de trafic :

$$\Psi = \frac{\lambda}{\mu} = 0,1467$$

- Application du modèle M/M/S :

On a $S = 1$ (1 poste de chargement).

Probabilité d'avoir 0 client dans le système :

$$P_0 = 0,8533$$

Probabilité d'avoir 1 client dans le système :

$$P_1 = 0,1252$$

Probabilité d'avoir 2 clients dans le système :

$$P_2 = 0,0184$$

Probabilité d'avoir plus de 2 clients dans le système :

$$P(n > 2) = 0,0032$$

Nombre moyen de clients dans la file :

$$N = 0,02523 \text{ navire}$$

Durée d'attente moyenne du client dans la file :

$$t_f = 6,0465 \text{ h/navire}$$

Temps moyen de séjour dans le système :

$$T = 41,2132 \text{ h/navire}$$

7. Application à l'année 2015 :

7.1. Détermination de la loi de répartition des arrivées :

7.1.1. Port Pétrolier :

Après avoir partagé les différentes valeurs On obtient le tableau suivant :

i	x _i	n _i	p _i
1	6	1	0,0833
2	7	3	0,2500
3	8	4	0,3333
4	9	2	0,1667
5	10	2	0,1667
6	11	0	0,0000
Somme	/	12	1,0000

Tableau 4.27 Probabilités des arrivées au port en 2015

On peut émettre une hypothèse suivant la forme de l'histogramme.

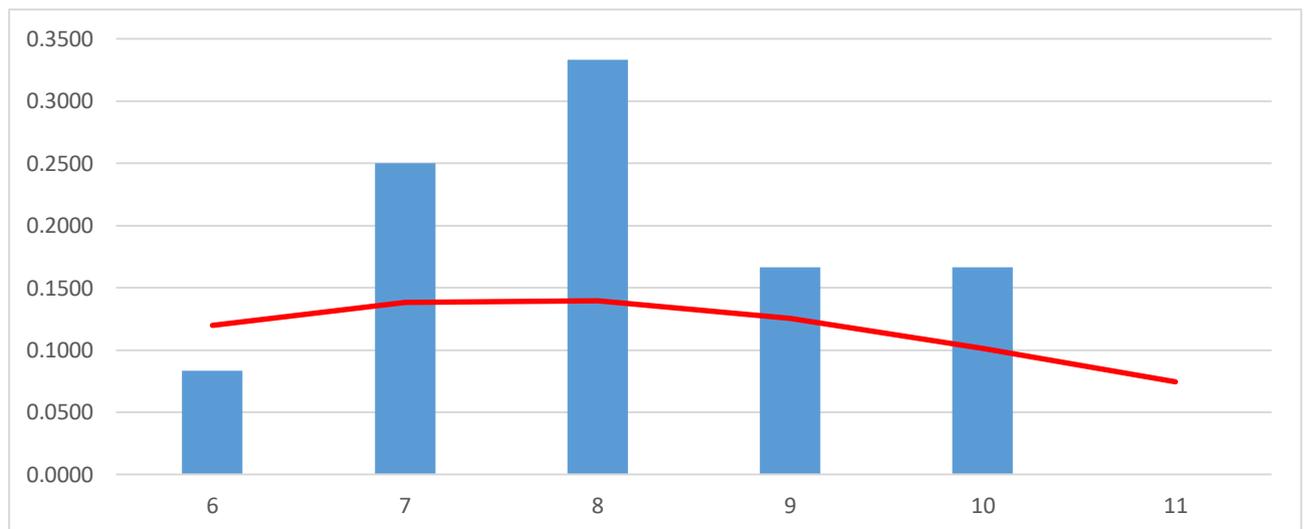


Figure 4.9 Histogramme des arrivées au port en 2015

Hypothèse : les arrivées suivent une loi de Poisson.

Calcul de la moyenne :

$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot P_i$$

$$m = 8,0833$$

Test de khi deux χ^2 :

xi	ni	pi*	N.pi*	ni-N.pi*	(ni-N.pi*) ² /N.pi*
6	1	0,1196	1,4350	-0,4350	0,1319
7	3	0,1381	1,6571	1,3429	1,0884
8	4	0,1395	1,6743	2,3257	3,2305
9	2	0,1253	1,5038	0,4962	0,1637
10	2	0,1013	1,2156	0,7844	0,5062
11	0	0,0744	0,8933	-0,8933	0,8933
Somme	12	0,6982		khi2	6,0139

Tableau 4.28 Test de khi deux des arrivées au port en 2015

$$\chi^2 = 6,0139 < \chi_{0,05,5}^2 = 11,0705$$

Hypothèse admise.

Calcul du taux d'arrivée :

$$\lambda = m = 8,0833 \text{ Navire/mois}$$

$$\lambda = 0,0112 \text{ Navire/h}$$

7.2. Détermination de la loi de service :

7.2.1. Port pétrolier :

Après avoir réparti les différentes valeurs en classes on obtient le tableau suivant :

i	li	ni	pi
1	20-26	41	0,4227
2	26-32	28	0,2887
3	32-38	17	0,1753
4	38-44	7	0,0722
5	44-50	3	0,0309
6	50-56	1	0,0103
total	/	97	1

Tableau 4.29 Probabilités des durées de service au port en 2015

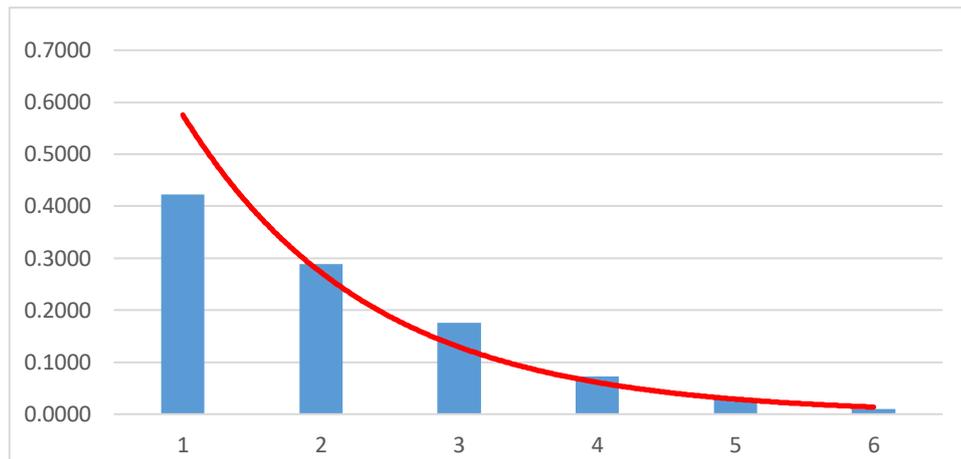


Figure 4.10 Histogramme des probabilités de durée de service au port en 2015

Hypothèse : les durées de service suivent une loi exponentielle

Calcul de la moyenne :

$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot P_i$$

$$m = 29,1856$$

Test de khi deux χ^2 :

li	xi	ni	Pi*	N.Pi*	ni-N.pi*	(ni-N.pi*) ² /N.Pi*
0-6	3	41	0,4796	46,5233	-5,5233	0,6557
6-12	9	28	0,2496	24,2097	3,7903	0,5934
12-18	15	17	0,1299	12,5982	4,4018	1,5380
18-24	21	7	0,0676	6,5558	0,4442	0,0301
24-30	27	3	0,0352	3,4115	-0,4115	0,0496
30-∞	33	1	0,0382	3,7014	-2,7014	1,9716
		97	1,0000	97,0000	Khi 2	4,8384

Tableau 4.30 Test de khi deux des durées de service au port en 2015

$$\chi^2 = 4,8384 < \chi_{0,05,5}^2 = 11,0705$$

Hypothèse admise.

Calcul du taux de service :

$$\mu = \frac{1}{m} = 0,0343 \text{ Navire/h}$$

7.3. Calcul des attentes :

7.3.1. Port pétrolier :

- Densité de trafic :

$$\Psi = \frac{\lambda}{\mu} = 0,3273$$

- Application du modèle M/M/S :

On a $S = 1$ (1 poste de chargement).

Probabilité d'avoir 0 client dans le système :

$$P_0 = 0,6727$$

Probabilité d'avoir 1 client dans le système :

$$P_1 = 0,2202$$

Probabilité d'avoir 2 clients dans le système :

$$P_2 = 0,0721$$

Probabilité d'avoir plus de 2 clients dans le système :

$$P(n > 2) = 0,0351$$

Nombre moyen de clients dans la file :

$$N = 0,15926 \text{ navire}$$

Durée d'attente moyenne du client dans une file :

$$t_f = 14,2009 \text{ h/navire}$$

Temps moyen de séjour dans le système :

$$T = 43,3865 \text{ h/navire}$$

Résultats de la file d'attente :

- **Année 2013**

- a) **Port pétrolier :**

Nombre de tankers	39
Les arrivées suivent une loi de Poisson	-
Taux d'arrivée λ	3,25 navire / mois
Les durées de service suivent une loi exponentielle	-
Taux de service μ	0,0363 navire / h
Taux de trafic Ψ	0,1243
Nombre de postes disponibles	2
Probabilité d'avoir 0 tanker	0,8829
Probabilité d'avoir 1 tanker	0,1098
Probabilité d'avoir 2 tankers	0,0068
Probabilité d'avoir plus de 2 tankers	0,0005
Temps moyen d'attente dans la file	0,1070 h
Temps moyen d'attente dans le système	27,6839 h
Nombre moyen de navires dans la file	0,00048

- b) **Bouée SPM :**

Nombre de tankers	33
Les arrivées suivent une loi de Poisson	-
Taux d'arrivée λ	2,75 navire / mois
Les durées de service suivent une loi exponentielle	-
Taux de service μ	0,0293 navire / h
Taux de trafic Ψ	0,1304
Nombre de postes disponibles	1
Probabilité d'avoir 0 tanker	0,8696
Probabilité d'avoir 1 tanker	0,1134
Probabilité d'avoir 2 tankers	0,0148
Probabilité d'avoir plus de 2 tankers	0,0022
Temps moyen d'attente dans la file	5,1237 h
Temps moyen d'attente dans le système	39,3055 h
Nombre moyen de navires dans la file	0,01954

- **Année 2014**

a) Port pétrolier :

Nombre de tankers	53
Les arrivées suivent une loi de Poisson	-
Taux d'arrivée λ	4,4167 navires / mois
Les durées de service suivent une loi exponentielle	-
Taux de service μ	0,0304 navire / h
Taux de trafic Ψ	0,2018
Nombre de postes disponibles	1
Probabilité d'avoir 0 tanker	0,7982
Probabilité d'avoir 1 tanker	0,1611
Probabilité d'avoir 2 tankers	0,0325
Probabilité d'avoir plus de 2 tankers	0,0082
Temps moyen d'attente dans la file	8,3065 h
Temps moyen d'attente dans le système	41,165 h
Nombre moyen de navires dans la file	0,051

b) Bouée SPM :

Nombre de tankers	36
Les arrivées suivent une loi de Poisson	-
Taux d'arrivée λ	3 navire / mois
Les durées de service suivent une loi exponentielle	-
Taux de service μ	0,0284 navire / h
Taux de trafic Ψ	0,1467
Nombre de postes disponibles	1
Probabilité d'avoir 0 tanker	0,8533
Probabilité d'avoir 1 tanker	0,1252
Probabilité d'avoir 2 tankers	0,0184
Probabilité d'avoir plus de 2 tankers	0,0032
Temps moyen d'attente dans la file	6,0465 h
Temps moyen d'attente dans le système	41,2132 h
Nombre moyen de navires dans la file	0,02523

- **Année 2015**

Port pétrolier :

Nombre de tankers	97
Les arrivées suivent une loi de Poisson	-
Taux d'arrivée λ	8,08 navire / mois
Les durées de service suivent une loi exponentielle	-
Taux de service μ	0,0343 navire / h
Taux de trafic Ψ	0,3273
Nombre de postes disponibles	2
Probabilité d'avoir 0 tanker	0,6727
Probabilité d'avoir 1 tanker	0,2202
Probabilité d'avoir 2 tankers	0,0721
Probabilité d'avoir plus de 2 tankers	0,0351
Temps moyen d'attente dans la file	14,2009 h
Temps moyen d'attente dans le système	43,3865 h
Nombre moyen de navires dans la file	0,15926

8. Interprétation des résultats

- **Port pétrolier**

D'après les résultats obtenus on constate une hausse du temps moyen d'attente à chaque année.

Concernant l'année 2014, cette hausse est essentiellement due à l'augmentation du temps de service. Durant le long de cette année un seul poste de chargement était disponible, le poste N°3, ce dernier étant ancien et nécessitant une maintenance régulière, altère le déroulement des opérations de chargement, ce qui explique l'augmentation du temps de chargement.

Durant l'année 2015 on constate une augmentation encore plus importante et ce malgré la remise en service du poste N°2, on remarque aussi que les arrivées ont presque doublé, ce qui a influencé directement sur le temps d'attente, en effet plus il y'a de clients plus on attend pour être servis.

L'indisponibilité de la bouée de chargement durant le long de toute cette année a contraint SONATRACH à évacuer tout le brut par le biais du port, cela explique cette hausse d'arrivées au port.

- **Bouée SPM**

On voit bien qu'il n'y a presque pas de différence entre les deux années, les temps d'attente obtenus sont dus au temps de chargement important (très grand).

On rappelle qu'on charge des navires d'une capacité allant jusqu'à 350 000 m³.

1. Notion sur les calculs statistiques [12]

1.1. Variables aléatoires

On appelle variable aléatoire X une variable telle qu'à chaque valeur x de la variable X on puisse associer une probabilité $P(x)$.

1.2. Variable aléatoire discrète

On dit qu'une variable X est discrète lorsque ses différentes valeurs possibles sont en nombre fini ou infini dénombrable.

1.3. Variable aléatoire continue

Une variable aléatoire X est continue lorsque son ensemble de définition s'agit d'un intervalle.

1.4. Probabilité statistique

On appelle probabilité statistique d'un événement quelconque X , le nombre d'observation de ce dernier, soit n_i sur le nombre total d'observation, soit N .

1.5. Fonction de répartition

La fonction de répartition de la variable X est définie comme suit :

$F(X) = P\{X < x\}$ Dans le cas continu ;

$F(X) = \sum_{i=0}^n \{X < x_i\}$ Dans le cas discret.

1.5.1. Densité de la fonction de répartition

Si la fonction $F(x)$ est continue et admet une dérivée $f(x)$, on dit que la variable aléatoire X est absolument continue et $f(x)$ est la densité de la fonction de répartition.

$$f(x) = \frac{dF(X)}{dX} \quad (\text{IV. 1})$$

$$P(a \leq x < b) = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a) \quad (\text{IV. 2})$$

2. Les lois statistiques [19]

2.1. Modèles discrets

2.1.1. Loi de POISSON

La loi de Poisson convient à la description des événements dont les chances de réalisation sont faibles. Il est nécessaire pour que la loi s'applique que la probabilité de réalisation reste constante.

La variable aléatoire de Poisson prend les valeurs entières dont la probabilité est définie comme suit :

$$P(x) = p(X = x) = \frac{e^{-m}}{x!} \cdot m^x \quad (\text{IV. 3})$$

Avec :

m : l'espérance mathématique

$$m = \sum_{i=1}^n x_i \cdot P(x_i) \quad (\text{IV. 4})$$

2.2. Modèles continus

2.2.1. Loi normale

La loi normale est une distribution que l'on rencontre le plus souvent en pratique. C'est en effet, la loi qui s'applique à une variable statistique qui est le résultat de la combinaison d'un grand nombre de paramètres indépendants, dont les effets s'additionnent et aucun n'est prépondérant.

Sa densité de probabilité est la suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x - m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{IV. 5})$$

Et sa fonction de répartition :

$$F(x) = P(X < x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x - m}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (\text{IV. 6})$$

Avec :

m : L'espérance mathématique

σ : L'écart type $\sigma = \sqrt{Dx}$

Dx : la variance mathématique donnée par la loi suivante :

$$Dx = \sum_{i=1}^n [(x_i - m)^2 \cdot P_{xi}] \quad (\text{IV. 7})$$

n : nombre d'observations

2.2.2. Loi exponentielle

La loi exponentielle est définie pour une variable aléatoire continue et dont :

La densité

$$F(x) = \frac{1}{m} \cdot e^{-\frac{1}{m}x} \quad (\text{IV. 8})$$

Avec : m est l'espérance mathématique

La fonction de répartition :

$$F(x) = \int f(x) \cdot dx \quad (\text{IV. 9})$$

suivant la forme de l'histogramme qui donne les probabilités statistiques en fonction des nombres d'événements réalisés, on peut mettre l'hypothèse sur la loi que suit la variable aléatoire, mais l'hypothèse doit être vérifiée par les critères de conformité (KOLMOGOROV ou PEARSON), et dans ce cas la probabilité s'appelle probabilité théorique.

3. Critère de PEARSON [16]

Le test est appliqué pour vérifier si la loi obtenue d'après les statistiques correspond à la loi théorique supposée.

Ce test consiste à calculer les différences carrées entre les fréquences théoriques de la loi à vérifier et les fréquences observées, puis à diviser chacun de ces carrés par la fréquence théorique de la classe à laquelle les fréquences sont relatives.

La loi de χ^2 a un seuil de signification α , un degré de liberté $k-1$ et une densité de probabilité $f(x)$.

$$\left\{ \begin{array}{l} f(x) = \frac{1}{\left(2^{\frac{\alpha}{2}} \cdot \Gamma(\alpha/2)\right)} \cdot x^{\frac{\alpha}{2}-1} \cdot e^{-\frac{x}{2}} \\ f(x) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{IV. 10})$$

L'estimateur de Pearson est donnée par :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(n_i - n \cdot P_i^*)^2}{n \cdot P_i^*} \quad (\text{IV. 11})$$

Tel que P_i^* les fréquences théoriques.

$$P_i^* = F(x_{i-1}) - F(x_i) = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) \cdot dx \quad (\text{IV. 12})$$

Ou encore :

$$P_i^* = f(x_i) \cdot \Delta \quad (\text{IV. 13})$$

Tel que :

Δ : L'étendu de la classe.

x_i : Le centre de la classe.

Une fois calculé la valeur de χ^2 , on doit la comparer avec une valeur critique relevée d'une dite de STUDENT.

Si $\chi^2 \leq \chi_{cr}$ L'hypothèse est admise et dans le cas contraire, l'hypothèse est rejetée.

4. Test de KOLMOGOROV-SMIRNOV

Le test de Kolmogorov-Smirnov pour un échantillon compare la fonction de distribution cumulée observée d'une variable avec une distribution théorique spécifiée, qui peut être normale, uniforme, exponentielle ou autre.

Principe du test :

On détermine l'écart maximal en valeur absolue existant entre la fonction de répartition empirique et la fonction de répartition théorique.

On établit alors, sur un n-échantillon, la fonction de répartition empirique, et l'on calcule la quantité :

$$D = \text{Sup}_{i=1,n} |F^*(x_i) - F(x_i)| \quad (\text{IV. 14})$$

Et enfin on compare cette valeur maximale à une autre valeur tabulée D_{cr} .

Si $D < D_{cr}$, l'hypothèse sera admise et dans le cas contraire, rejetée

1. Application à la disponibilité

1.1. Disponibilité du système de chargement on shore

❖ Diagramme de fiabilité du système :

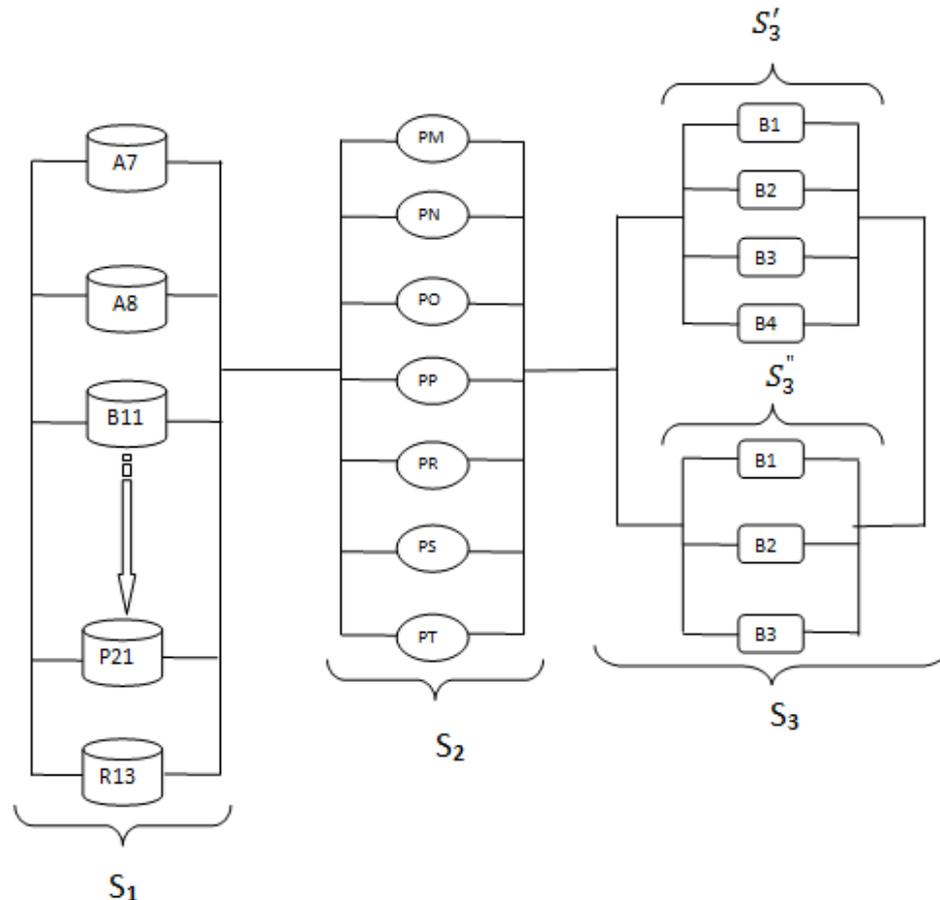


Figure 5.1 Diagramme de fiabilité du système de chargement on-shore (phase 1)

1.1.1. Application de la théorie des chaînes de Markov aux pompes d'exportation :

Rappelons que le terminal marin de Bejaia dispose de deux parcs (Nord et Sud), munies, respectivement de 7 et 4 électropompes. Cependant, durant les opérations de chargements seules les pompes du terminal nord sont utilisées.

Le système pompes de chargement dont quatre (4) en fonction et trois (3) en réserve est modélisé par un système à redondance séquentielle partielle.

❖ Données statistiques :

Numéro de panne	Pompe M			Pompe N			Pompe O		
	Cumule de marche	TBF	TTR	Cumule de marche	TBF	TTR	Cumule de marche	TBF	TTR
1	303,3	303,3	16,38	55,2	55,2	133,15	501,7	501,7	155,1
2	458,3	155	259,18	365,4	310,2	31,6	525,9	24,2	115,13
3	2277,5	1819,2	2,1	1668,9	1303,5	12,2	1827,6	1301,7	29,2
4	5736,5	3459	28,2	2182,4	513,5	3,8	3238,62	1411,02	32,09
5	5987,3	250,8	78,1	4112,9	1930,5	107,08	7258,69	4020,07	67,17
6	6907,2	919,9	128,31	4126,3	13,4	341,71	10528,69	3270	53,88
7	8009,1	1101,9	59,08	6437,1	2310,8	62,1	11739,39	1210,7	127,35
8	/	/	/	8270,5	1833,4	50,4	14341,19	2601,8	58,11

Numéro de panne	Pompe P			Pompe R			Pompe S		
	Cumule de marche	TBF	TTR	Cumule de marche	TBF	TTR	Cumule de marche	TBF	TTR
1	618,6	618,6	35,8	4001,3	4001,3	89,1	3122,5	3122,5	218,11
2	1633,3	1014,7	5,1	6104,28	2102,98	106,09	4726,1	1603,6	50,08
3	2846,39	1213,09	67,11	6116,68	12,4	11,21	6259,7	1533,6	6,58
4	5608,19	2761,8	59,19	6160,91	44,23	6,02	6325,1	65,4	241,12
5	6798,52	1190,33	123,6	6664,67	503,76	93,1	9159,8	2834,7	181,2
6	9196,95	2398,43	119,09	7385,8	721,13	178,78	9373,89	214,09	13,4
7	9997,95	801	41,08	10595,8	3210	161,19	10180,92	807,03	81,3
8	/	/	/	13139,23	2543,43	28,4	11359,76	1178,84	143,1

Numéro de panne	Pompe T		
	Cumule de marche	TBF	TTR
1	1506,25	1506,25	42,3
2	5411,48	3905,23	102,2
3	5913,98	502,5	9,81
4	6814,76	900,78	53,4
5	7469,26	654,5	55,75
6	8811,8	1342,54	205,13
7	9819,45	1007,65	81,03
8	12436,25	2616,8	155,83

Tableau 5.1 Données statistiques des pompes d'exportation (port pétrolier)

1.1.1.1. Détermination du taux de défaillance :

❖ Regroupement des heures de bon fonctionnement :

Pompe M	Pompe N	Pompe O	Pompe P	Pompe R	Pompe S	Pompe T
155	13.4	24.2	618.6	12.4	65.4	502.5
250.8	55.2	501.7	801	44.2	214.09	654.5
303.3	310.2	1210.7	1014.7	503.76	807.03	900.78
919.9	513.5	1301.7	1190.33	721.13	1178.84	1007.65
1101.9	1303.5	1411.02	1213.09	2102.98	1533.6	1342.54
1819.2	1833.4	2601.8	2398.43	2543.43	1603.6	1506.25
3459	1930.5	3270	2761.8	3210	2834.7	2834.7
	2310.8	4020.07		4001.3	3122,5	2616.8

Tableau 5.2 TBF des pompes d'exportation (port pétrolier)

Tableau de probabilités des pannes :

i	classe	n _i	x _i	p _i
1	<600	15	300	0,2778
2	600-1200	12	900	0,2222
3	1200-1800	9	1500	0,1667
4	1800-2400	6	2100	0,1111
5	2400-3000	5	2700	0,0926
6	3000-3600	4	3300	0,0741
7	3600-4200	3	3900	0,0556
Somme	/	54	/	1

Tableau5.3 Probabilités de panne des pompes d'exportation (port pétrolier)

La moyenne des temps de bon fonctionnement est donnée par la formule suivante:

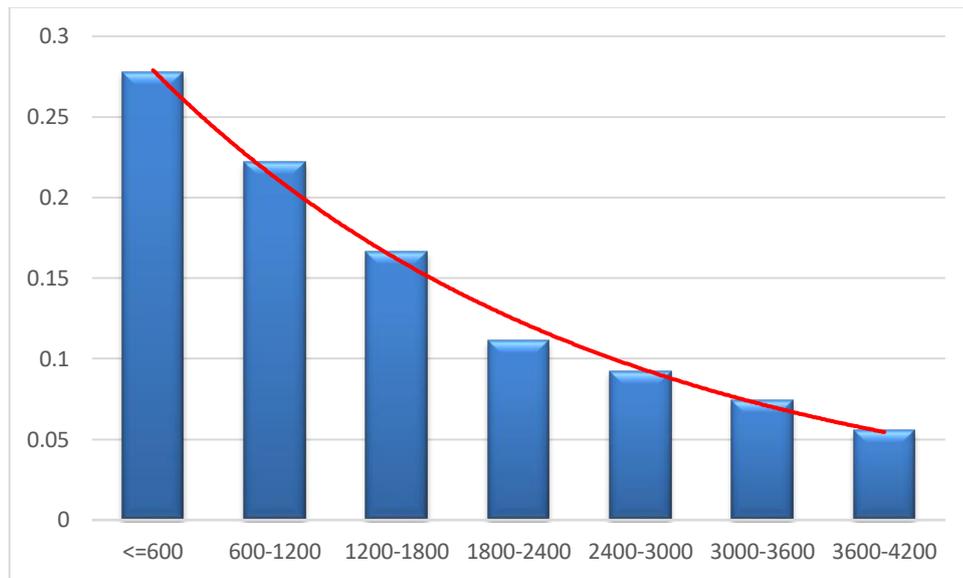
$$m = \sum_{i=1}^k x_i \cdot p_i$$

Avec :

P_i : la probabilité.

x_i : Le centre de la classe i.

$$m = 1477,7778 \text{ h}$$

Histogramme des TBF :**Figure 5.2** Histogramme des TBF des pompes d'exportation (port pétrolier)

D'après l'histogramme, on peut émettre l'hypothèse suivante :

La loi de distribution des TBF suit une loi exponentielle.

❖ **Vérification de l'hypothèse émise par le test de Kolmogorov:**

Classe	n_i	n_i/N	b	$F^*(b)=\sum n_i/N$	$F(b)=1-\exp(-\lambda.b)$	$D_i=|F^*(b)-F(b)|$
<=600	15	0,2778	600	0,2778	0,3337	0,0559
600-1200	12	0,2222	1200	0,5	0,5560	0,0560
1200-1800	9	0,1667	1800	0,6667	0,7042	0,0375
1800-2400	6	0,1111	2400	0,7778	0,8029	0,0251
2400-3000	5	0,0926	3000	0,8704	0,8687	0,0017
3000-3600	4	0,0741	3600	0,9444	0,9125	0,0319
3600-4200	3	0,0556	4200	1	0,9417	0,0583
Somme	54	1	/	/	/	/

Tableau 5.4 Test de Kolmogorov pour les TBF des pompes d'exportation (port pétrolier)

$$D_n = \text{Max} \{D_i\} = 0,0583 < D_{0,05,7} = 0,483$$

Hypothèse acceptée

Conclusion :

La distribution des temps de bon fonctionnement suit une loi exponentielle.

Calcul du taux de défaillance :

$$MTBF = 1477,7778 \text{ h}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = 0.00068 \text{ h}^{-1}$$

1.1.1.2. Détermination du taux de réparation :**❖ Regroupement des heures de réparation :**

Pompe M	Pompe N	Pompe O	Pompe P	Pompe R	Pompe S	Pompe T
2.1	3.8	29.2	5.1	6.02	6.58	9.81
16.38	12.2	32.09	35.8	11.21	13.4	42.3
28.2	31.6	53.38	41.08	28.4	50.08	53.4
59.08	50.4	58.88	59.19	89.1	81.3	55.75
78.1	62.1	67.17	67.11	93.1	143.1	81.03
128.31	107.08	115.13	119.09	106.09	181.2	102.2
259.18	133.15	127.35	123.6	161.19	218.11	155.83
/	341.71	155.1	/	178.78	241.12	205.13

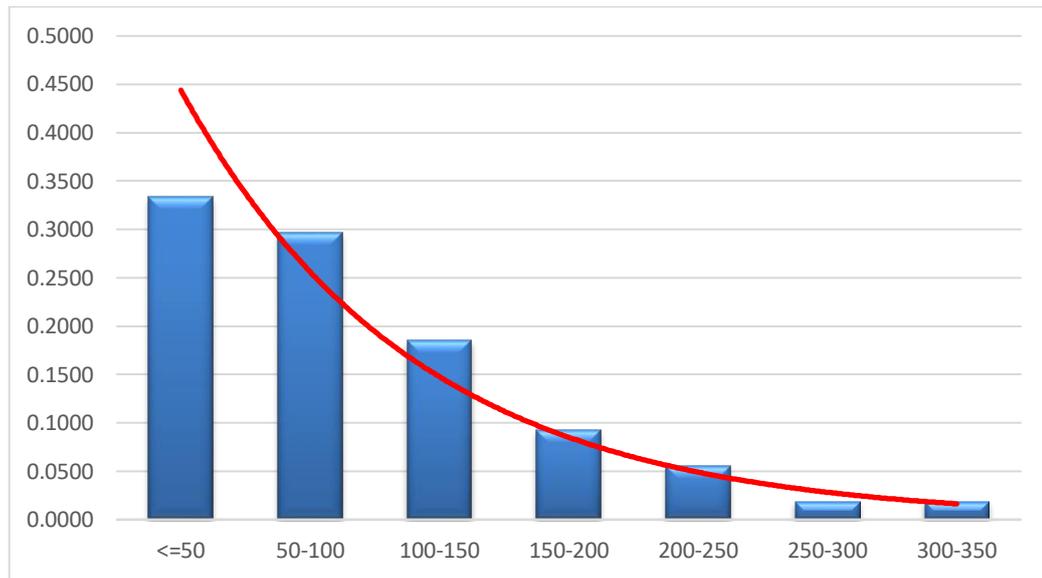
Tableau 5.5 TTR des pompes d'exportation (port pétrolier)**Tableau des probabilités de réparation :**

N°	classe	ni	x _i	pi
1	<=50	18	25	0,3333
2	50-100	16	75	0,2963
3	100-150	10	125	0,1852
4	150-200	5	175	0,0926
5	200-250	3	225	0,0556
6	250-300	1	275	0,0185
7	300-350	1	325	0,0185
Somme	/	54	/	1

Tableau 5.6 Probabilités de réparation des pompes d'exportation (port pétrolier)

La moyenne des temps de réparation:

$$m = 93,5185 \text{ h}$$

Histogramme des TTR :**Figure 5.3** Histogramme des TTR des pompes d'exportation (port pétrolier)

D'après l'histogramme, on peut émettre l'hypothèse suivante :

La loi de distribution des TTR suit une loi exponentielle.

❖ **Vérification de l'hypothèse émise par le test de Kolmogorov :**

classe	n_i	n_i/N	b	$F^*(b)=\sum n_i/N$	$F(b)=1-\exp(-\mu.b)$	$D_i=|F^*(b)-F(b)|$
<=50	18	0,3333	50	0,3333	0,4141	0,0808
50-100	16	0,2963	100	0,6296	0,6568	0,0271
100-150	10	0,1852	150	0,8148	0,7989	0,0159
150-200	5	0,0926	200	0,9074	0,8822	0,0252
200-250	3	0,0556	250	0,9630	0,9310	0,0320
250-300	1	0,0185	300	0,9815	0,9596	0,0219
300-350	1	0,0185	350	1	0,9763	0,0237
/	54	1	/	/	/	/

Tableau 5.7 Test de Kolmogorov pour les TTR des pompes d'exportation (port pétrolier)

$$D_n = \text{Max} \{D_i\} = 0,0808 < D_{0,05,7} = 0,483$$

Hypothèse acceptée.

Conclusion :

La distribution des temps de réparation suit une loi exponentielle.

Calcul du taux de réparation :

$$MTTR = 93,5185 \text{ h}$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = 0,01069 \text{ h}^{-1}$$

1.1.1.3. Calcul de la disponibilité par le graphe des états de Markov :

Dans notre cas nous considérons :

- Trois (3) pompes en réserve ;
- Une (1) seule équipe de réparation.

Graphe de Markov :(voir schéma en Annexe)

Equations d'état du système :

$$P_7(t + dt) = [1 - (4\lambda + 3\lambda_0)dt]P_7(t) + \mu dt \cdot P_6(t)$$

$$P_6(t + dt) = [1 - (4\lambda + 2\lambda_0 + \mu)dt]P_6(t) + \mu dt \cdot P_5(t) + (4\lambda + 3\lambda_0)dt \cdot P_7(t)$$

$$P_5(t + dt) = [1 - (4\lambda + \lambda_0 + \mu)dt]P_5(t) + \mu dt \cdot P_4(t) + (4\lambda + 2\lambda_0)dt \cdot P_6(t)$$

$$P_4(t + dt) = [1 - (4\lambda + \mu)dt]P_4(t) + \mu dt \cdot P_3(t) + (4\lambda + \lambda_0)dt \cdot P_5(t)$$

$$P_3(t + dt) = [1 - (3\lambda + \mu)dt]P_3(t) + \mu dt \cdot P_2(t) + 4\lambda dt \cdot P_4(t)$$

$$P_2(t + dt) = [1 - (2\lambda + \mu)dt]P_2(t) + \mu dt \cdot P_1(t) + 3\lambda dt \cdot P_3(t)$$

$$P_1(t + dt) = [1 - (\lambda + \mu)dt]P_1(t) + \mu dt \cdot P_0(t) + 2\lambda dt \cdot P_2(t)$$

$$P_0(t + dt) = [1 - \mu dt]P_0(t) + \lambda dt \cdot P_1(t)$$

Les équations différentielles :

$$\frac{dP_7(t)}{dt} = -(4\lambda + 3\lambda_0)P_7(t) + \mu P_6(t)$$

$$\frac{dP_6(t)}{dt} = (4\lambda + 3\lambda_0)P_7(t) - (4\lambda + 2\lambda_0 + \mu)P_6(t) + \mu P_5(t)$$

$$\frac{dP_5(t)}{dt} = (4\lambda + 2\lambda_0)P_6(t) - (4\lambda + \lambda_0 + \mu)P_5(t) + \mu P_4(t)$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = (4\lambda + \lambda_0)P_5(t) - (4\lambda + \mu)P_4(t) + \mu P_3(t)$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = (4\lambda)P_4(t) - (3\lambda + \mu)P_3(t) + \mu P_2(t)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = 3\lambda P_3(t) - (2\lambda + \mu)P_2(t) + \mu P_1(t)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda P_2(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_0(t)$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = \lambda P_1(t) - \mu P_0(t)$$

Données:

- λ_0 , le taux de panne durant le stockage est nul ($\lambda_0 = 0$)
- $\frac{\lambda}{\mu} = \frac{0,00068}{0,01069} = 0,0636 < 1$ donc le régime est stationnaire (Quand $t \rightarrow \infty$ $P_i(t) \rightarrow P_i =$ constante)

Le système d'équations devient :

$$-(4\lambda)P_7 + \mu P_6 = 0$$

$$(4\lambda)P_7 - (4\lambda + \mu)P_6 + \mu P_5 = 0$$

$$(4\lambda)P_6 - (4\lambda + \mu)P_5 + \mu P_4 = 0$$

$$(4\lambda)P_5 - (4\lambda + \mu)P_4 + \mu P_3 = 0$$

$$(4\lambda)P_4 - (3\lambda + \mu)P_3 + \mu P_2 = 0$$

$$3\lambda P_3 - (2\lambda + \mu)P_2 + \mu P_1 = 0$$

$$2\lambda P_2 - (\lambda + \mu)P_1 + \mu P_0 = 0$$

$$\lambda P_1 - \mu P_0 = 0$$

$$\text{On a : } \sum P_i = 1$$

La résolution de ce système donne :

- La probabilité d'avoir 7 pompes disponibles : $P_7 = \frac{\mu^7}{1536\lambda^7} P_0$
- La probabilité d'avoir 6 pompes disponibles : $P_6 = \frac{\mu^6}{384\lambda^6} P_0$
- La probabilité d'avoir 5 pompes disponibles : $P_5 = \frac{\mu^5}{96\lambda^5} P_0$
- La probabilité d'avoir 4 pompes disponibles : $P_4 = \frac{\mu^4}{24\lambda^4} P_0$
- La probabilité d'avoir 3 pompes disponibles : $P_3 = \frac{\mu^3}{6\lambda^3} P_0$
- La probabilité d'avoir 2 pompes disponibles : $P_2 = \frac{\mu^2}{2\lambda^2} P_0$
- La probabilité d'avoir 1 pompe disponible : $P_1 = \frac{\mu}{\lambda} P_0$
- La probabilité d'avoir 0 pompe disponible :

$$P_0 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu^2}{2\lambda^2} + \frac{\mu^3}{6\lambda^3} + \frac{\mu^4}{24\lambda^4} + \frac{\mu^5}{96\lambda^5} + \frac{\mu^6}{384\lambda^6} + \frac{\mu^7}{1536\lambda^7}\right)}$$

$$P_0 = 4,66 \cdot 10^{-6}$$

$$P_1 = 7,37 \cdot 10^{-5}$$

$$P_2 = 5,82 \cdot 10^{-4}$$

$$P_3 = 0,0031$$

$$P_4 = 0,0121$$

$$P_5 = 0,0479$$

$$P_6 = 0,1891$$

$$P_7 = 0,7472$$

La disponibilité du système :

$$D_{s_2} = 1 - (P_0 + P_1 + P_2 + P_3) = P_4 + P_5 + P_6 + P_7 = 0,9963$$

1.1.2. Application de la théorie des chaînes de Markov aux bras de chargements :

Vu que le poste N°2 a été complètement rénové récemment, on estimera dans notre étude que sa disponibilité ainsi que sa fiabilité sont de 99,99 %.

L'étude qui suivra se portera uniquement sur le poste N°2. Ce dernier est constitué de 4 bras de chargement dont trois (3) en marche et un (1) en réserve. C'est un système à redondance séquentielle partielle.

❖ Données statistiques :

Numéro de la panne	Bras N°1			Bras N°2		
	Cumule de marche	TBF	TTR	Cumule de marche	TBF	TTR
1	225,38	225,38	23,4	420,2	420,2	21,30
2	563,54	338,16	9,1	583,9	163,7	40,01
3	580,07	16,53	89,03	1287,02	703,12	68,13
4	722,28	142,21	28,67	1313,35	26,33	10,3
5	1280,58	558,3	10,6	1392,48	79,13	18,51
6	1428,76	148,18	37,02	2280,58	888,1	15,6
7	1530,82	102,06	11,33	2488,6	208,02	37,66
8	2537,92	1007,1	39,66	2931,72	443,12	202,02
9	3029,02	491,1	66,13	3064,97	133,25	18,17
10	3058,1	29,08	15,6	3242,16	177,19	91,06
11	3146,27	88,17	33,11	3504,26	262,1	78,11
12	3441,87	295,6	155,3	3610,43	106,17	35,6
13	3813,07	371,2	42,1	3739,62	129,19	102,11
14	3925,28	112,21	93,19	3879,82	140,2	63,33

Numéro de la panne	Bras N°3			Bras N°4		
	Cumule de marche	TBF	TTR	Cumule de marche	TBF	TTR
1	401,19	401,19	114,15	573,29	573,29	44,02
2	519,94	118,75	20,02	650,42	77,13	6,8
3	573,04	53,1	82,15	797,34	146,92	24,13
4	862,15	289,11	15,56	986,49	189,15	46,69
5	1603,33	741,18	84,44	1435,38	448,89	16,18
6	2272,03	668,7	51,31	2218,55	783,17	31,11
7	2292,14	20,11	19,79	2273,77	55,22	29,15
8	2511,25	219,11	116,06	2422,14	148,37	67,08
9	2636,8	125,55	8,67	2603,31	181,17	13,11
10	3384,84	748,04	28,11	2704,81	101,5	118,1
11	3697,06	312,22	142,6	3278,1	573,29	69,98
12	3841,46	144,4	43,56	3417,27	139,17	30,08
13	4066,26	224,8	48,18	3576,29	159,02	129,3
14	4567,36	501,1	73,11	3859,59	283,3	35,18

Tableau 5.8 Données statistiques des bras de chargements du poste N°3

1.1.2.1. Détermination du taux de défaillance :

❖ Regroupement des temps de bon fonctionnement :

Bras N°1	Bras N°2	Bras N°3	Bras N°4
16.53	26.33	20.11	55.22
29.08	79.13	53,1	77.13
88.17	106.17	118.75	101.5
103.06	129.19	125.55	139.17
112.21	133.25	144.4	146.92
142.21	140.2	219.11	148.37
148.18	163.7	224.8	159.02
225.31	177.19	289.11	181.17
295.6	208.02	312.22	189.15
338.16	262.1	401.19	283.3
371.2	420.2	501.1	448.89
491.1	443.12	668.7	573.29
558.3	703.12	741.18	783.17
1007.1	888.1	748.04	1042.2

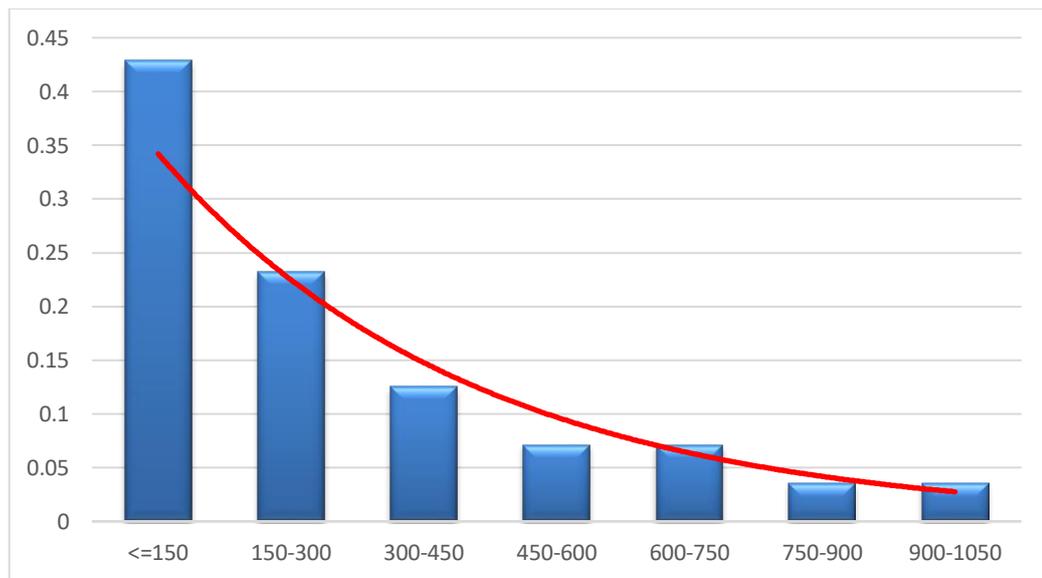
Tableau 5.9 TBF des bras de chargement du poste N°3

Tableau de probabilité des pannes :

i	classe	n_i	x_i	P_i
1	<150	24	75	0,4286
2	150-300	13	225	0,2321
3	300-450	7	375	0,1250
4	450-600	4	525	0,0714
5	600-750	4	675	0,0714
6	750-900	2	825	0,0357
7	900-1050	2	975	0,0357
Somme	/	56	1125	1

Tableau 5.10 Probabilité de panne des bras de chargement du poste N°3

$$m = 281,25 \text{ h}$$

Histogramme des TBF :**Figure 5.4** Histogramme des TBF des bras de chargement du poste N°3

D'après l'histogramme on peut émettre l'hypothèse d'une distribution exponentielle de l'échantillon.

❖ **Vérification de l'hypothèse émise par le test de Kolmogorov :**

i	n _i	n _i /N	b	F*(b)=∑n _i /N	F(b)=1-exp(-μ.b)	D _i=|F*(b)-F(b)|
1	24	0,4286	150	0,4286	0,4134	0,0152
2	13	0,2321	300	0,6607	0,6558	0,0049
3	7	0,1250	450	0,7857	0,7981	0,0124
4	4	0,0714	600	0,8571	0,8816	0,0244
5	4	0,0714	750	0,9286	0,9305	0,0019
6	2	0,0357	900	0,9643	0,9592	0,0050
7	2	0,0357	1050	1	0,97609	0,02391
∑	56	/	/	/	/	/

Tableau 5.11 Test de Kolmogorov pour les TBF des bras de chargement du poste N°3

$$D_n = \max(D_i) = 0,0244 < D_{0,05;7} = 0,483$$

Hypothèse acceptée.

Conclusion :

Les temps de bon fonctionnement suivent une loi exponentielle de distribution.

Calcul du taux de défaillance :

$$MTBF = 281,25 \text{ h}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = 0,00356 \text{ h}^{-1}$$

1.1.2.2. Détermination du taux de réparation :

❖ **Regroupement des temps de réparation:**

Bras N°1	Bras N°2	Bras N°3	Bras N°4
9.1	10.3	8.67	6.8
10.6	15.6	15.56	13.11
11.33	18.17	19.79	16.18
15.6	18,51	20.02	24.13
23.4	21.3	28.11	29.15
28.67	35.6	43.56	30.08
33.11	37.66	48.18	35.18
37.02	40.01	51.31	44.02
39.66	63.33	73.11	46.69
42.1	68.13	82.15	67.08
66.13	78.11	84.44	69.98
89.03	91.06	114.15	118.1
93.19	102.11	116.06	129.3
155.3	202.02	142.6	131.11

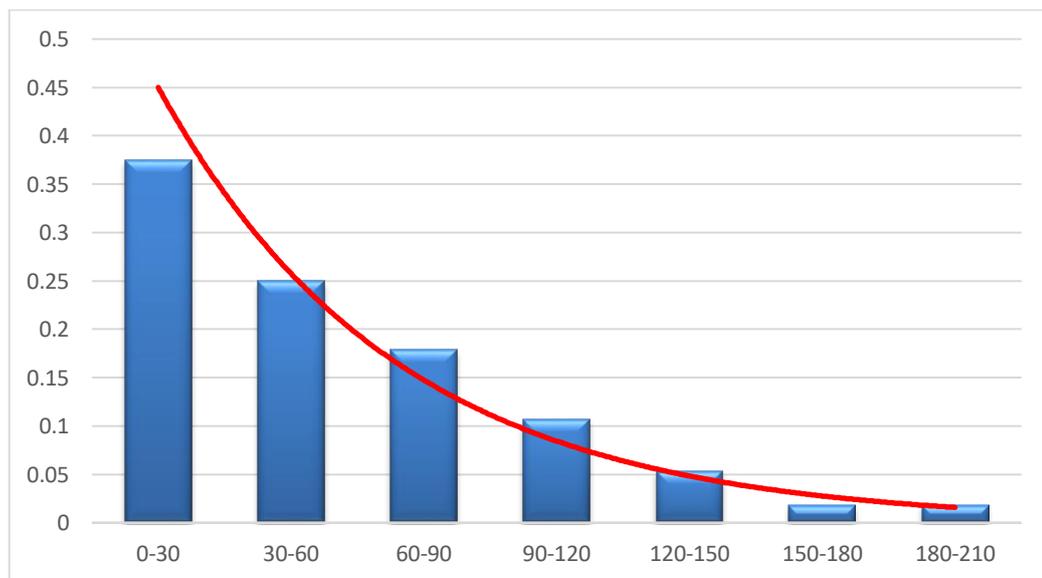
Tableau 5.12 TTR des bras de chargement du poste N°3

Tableau de probabilité des réparations :

i	classe	ni	xi	pi
1	0-30	21	15	0,375
2	30-60	14	45	0,25
3	60-90	10	75	0,1786
4	90-120	6	105	0,1071
5	120-150	3	135	0,0536
6	150-180	1	165	0,0179
7	180-210	1	195	0,0179
Somme	/	56	/	1

Tableau 5.13 Probabilités de réparation des bras de chargement du poste N°3

$$m = 55,1786 \text{ h}$$

Histogramme des réparations :**Figure 5.5** Histogramme des TTR des bras de chargement du poste N°3

D'après l'histogramme on peut émettre l'hypothèse d'une distribution exponentielle de l'échantillon.

❖ **Vérification de l'hypothèse émise par le test de Kolmogorov :**

i	n _i	n _i /N	b	F*(b)=∑n _i /N	F(b)=1-exp(-μ.b)	D _i=|F*(b)-F(b)|
1	21	0,3750	30	0,3750	0,4194	0,0444
2	14	0,2500	60	0,6250	0,6629	0,0379
3	10	0,1786	90	0,8036	0,8043	0,0007
4	6	0,1071	120	0,9107	0,8864	0,0244
5	3	0,0536	150	0,9643	0,9340	0,0303
6	1	0,0179	180	0,9821	0,9617	0,0204
7	1	0,0179	210	1	0,9778	0,0222
Somme	56	1	/	/	/	/

Tableau 5.14 Test de Kolmogorov pour les TTR des bras de chargement du poste N°3

$$D_n = \max(D_i) = 0,0444 < D_{0,05;7} = 0,483$$

Hypothèse admise.

Conclusion :

Les temps de réparations suivent une loi exponentielle de distribution.

Calcul du taux de réparation :

$$MTTR = 55,1786h$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = 0,0182 h^{-1}$$

1.1.2.3. Calcul de la disponibilité par le graphe des états de Markov :

On considère :

- Trois bras en marche et un(1) en réserve.
- Une seule équipe de réparation.

Graphe de Markov :(Voir schéma en Annexe)

Les équations différentielles :

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = -(3\lambda + \lambda_0)P_4(t) + \mu P_3(t)$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = (3\lambda + \lambda_0)P_4(t) - (3\lambda + \mu)P_3(t) + \mu P_2(t)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = 3\lambda P_3(t) - (2\lambda + \mu)P_2(t) + \mu P_1(t)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda P_2(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_0(t)$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\mu P_0(t) + \lambda P_1(t)$$

Données:

- λ_0 , le taux de panne durant le stockage est nul ($\lambda_0=0$)
- $\frac{\lambda}{\mu} = \frac{0,00356}{0,0182} = 0,1956 < 1$ donc le régime est stationnaire (Quand $t \rightarrow \infty$ $P_i(t) \rightarrow P_i =$ constante)

Le système d'équation devient :

$$-(3\lambda)P_4 + \mu P_3 = 0$$

$$(3\lambda)P_4 - (3\lambda + \mu)P_3 + \mu P_2 = 0$$

$$-(2\lambda + \mu)P_2 + 3\lambda P_3 + \mu P_1 = 0$$

$$-(\lambda + \mu)P_1 + 2\lambda P_2 + \mu P_0 = 0$$

$$-\mu P_0 + \lambda P_1 = 0$$

On a : $\sum P_i = 1$

La résolution du système d'équation précédent donne les probabilités suivantes :

- La probabilité d'avoir 4 bras disponibles : $P_4 = \frac{\mu^4}{18\lambda^4} P_0$
- La probabilité d'avoir 3 bras disponibles : $P_3 = \frac{\mu^3}{6\lambda^3} P_0$
- La probabilité d'avoir 2 bras disponibles : $P_2 = \frac{\mu^2}{2\lambda^2} P_0$
- La probabilité d'avoir 1 bras disponible : $P_1 = \frac{\mu}{\lambda} P_0$
- La probabilité de n'avoir aucun bras disponible : $P_0 = \frac{1}{(1 + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu^2}{2\lambda^2} + \frac{\mu^3}{6\lambda^3} + \frac{\mu^4}{18\lambda^4})}$

$$P_0 = 0,0127 \quad P_1 = 0,0648 \quad P_2 = 0,1652 \quad P_3 = 0,2806 \quad P_4 = 0,4767$$

La disponibilité est donc :

$$D_{S'_3} = 1 - (P_0 + P_1 + P_2) = P_3 + P_4 = 0,7573$$

1.1.2.4. Calcul de la disponibilité totale du système bras de chargement :

On a $D_{S_3''} = 0,9999 = 99,99\%$

$$D_{S_3} = 1 - (1 - D_{S'_3})(1 - D_{S_3''})$$

$$D_{S_3} = 0,9999$$

$$D_{S_3} = 99,99\%$$

1.1.3. Calcul de la disponibilité des bacs de stockage :

$$D = \frac{V_{\text{réel}}}{V_{\text{théorique}}}$$

Le terminal marin de Bejaïa dispose de 16 bacs de stockage brut placés en parallèle formant ainsi un système à redondance active totale.

Les volumes réels et théoriques de chaque bac sont donnés dans le tableau ci-après :

Bac	Capacité théorique (m^3)	Capacité Réelle (m^3)
A7	35 000	32 000
A8	35 000	32 000
B11	35 000	32 500
B12	35 000	32 500
C4	35 000	32 000
C9	35 000	32 500
D3	35 000	32 500
D10	35 000	32 500
E1	35 000	32 500
E2	35 000	32 500
F5	35 000	32 000
F6	35 000	32 500
M20	50 000	46 000
N14	50 000	46 000
P21	50 000	46 000
R13	50 000	45 000

Tableau 5.15 Capacités réelles et théoriques des bacs de stockage

$$D_{A7} = 0,9143$$

$$D_{C4} = 0,9143$$

$$D_{E1} = 0,9286$$

$$D_{M20} = 0,92$$

$$D_{A8} = 0,9143$$

$$D_{C9} = 0,9286$$

$$D_{E2} = 0,9286$$

$$D_{N14} = 0,92$$

$$D_{B11} = 0,9286$$

$$D_{D3} = 0,9286$$

$$D_{F5} = 0,9286$$

$$D_{P21} = 0,92$$

$$D_{B12} = 0,9286$$

$$D_{D10} = 0$$

$$D_{F6} = 0,9286$$

$$D_{R13} = 0$$

La disponibilité du système :

$$D_{S_1} = 1 - \prod_{i=1}^{16} (1 - D_i)$$

$$D_{S_1} = 99,99\%$$

1.1.4. Calcul de la disponibilité totale du système de chargement on-shore :



Figure 5.6 Diagramme de fiabilité du système de chargement on-shore (phase 2)

$$D_s = D_{S_1} \times D_{S_2} \times D_{S_3} = 0,9999 \times 0,9963 \times 0,9999 = 0,9962 = 99,61\%$$

1.2. Disponibilité du système de chargement offshore :

1.2.1. Disponibilité des pompes sea-line par le graphe des états de Markov:

La station de pompage off-shore dispose de trois (3) pompes placées en parallèles dont (2) deux en marche et une (1) en réserve.

On considère une seule équipe de réparation.

❖ Données statistiques :

Numéro de la panne	Pompe N°1			Pompe N°2		
	Cumule de marche	TBF	TTR	Cumule de marche	TBF	TTR
1	2707,13	2707,13	38,19	793,82	793,82	141,13
2	3478,46	771,33	64,4	2133	1339,18	46,3
3	5257,82	1779,36	90,33	5112,66	2979,66	94,44
4	5777,72	519,9	233,89	5635,99	523,33	176,6
5	8166,42	2388,7	8,7	7213,15	1577,16	18,2
6	8181,62	15,2	10,4	11915,48	4702,33	295,15
7	8567,78	386,16	211,01	12531,59	616,11	12,3
8	12167,87	3600,09	89,02	16334,69	3803,1	73,1
9	13369,05	1201,18	114,33	18650,19	2315,5	190,02
10	17491,65	4122,6	102,02	19653,29	1003,1	41,8
11	19704,27	2212,62	181,12	22768,89	3115,6	193,66
12	20494,2	789,93	58,12	23470,19	701,3	136,19

Numéro de la panne	Pompe N°3		
	Cumule de marche	TBF	TTR
1	3315,05	3315,05	219,9
2	4298,38	983,33	66,11
3	5075,61	777,23	128,8
4	5178,91	103,3	29,17
5	6284,41	1105,5	148,4
6	8185,47	1901,06	77
7	8343,62	158,15	12,06
8	10401,73	2058,11	59,09
9	11217,04	815,31	153,33
10	11598,21	381,17	69,19
11	13041,54	1443,33	139,2
12	14404,14	1362,6	33,15

Tableau 5.16 Données statistiques des pompes sea-line

1.2.1.1. Détermination du taux de défaillance :

❖ Regroupement des temps de bon fonctionnement :

Pompe N°1	Pompe N°2	Pompe N°3
15 ,2	523,33	103,3
386,16	616,11	158,15
519,9	701,3	318,17
771,33	793,82	777,23
789,93	1003,1	815,31
1201,18	1339,18	983,33
1779,36	1577,16	1105,5
2212,62	2315,5	1362,6
2388,7	2979,66	1443,33
2707,13	3115,6	1901,06
3600,09	3803,1	2058,11
4122,6	4702,33	3315,05

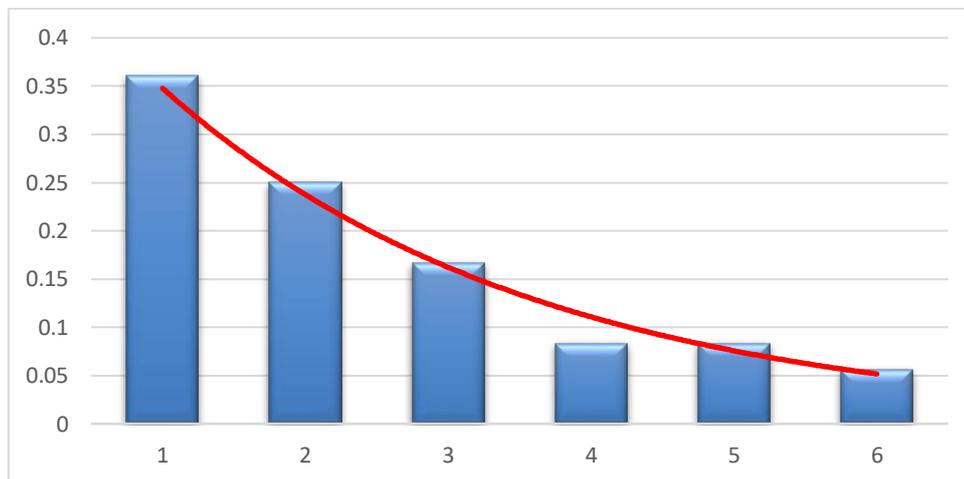
Tableau 5.17 TBF des pompes sea-line

Tableau des probabilités de panne :

N°	classe	n _i	x _i	p _i
1	<=800	13	400	0,3611
2	800-1600	9	1200	0,25
3	1600-2400	6	2000	0,1667
4	2400-3200	3	2800	0,0833
5	3200-4000	3	3600	0,0833
6	4000-4800	2	4400	0,0556
Somme	/	36	/	1

Tableau 5.18 Probabilités de panne des pompes sea-line

$$m=1555,5556 \text{ h}$$

Histogramme des TBF :**Figure 5.7** Histogramme des TBF des pompes sea-line

D'après l'histogramme on peut émettre l'hypothèse d'une distribution exponentielle de l'échantillon.

❖ **Vérification de l'hypothèse émise par le test de Kolmogorov :**

N°	classe	n _i	n _i /N	b	F*(b)=∑n _i /N	F(b)=1-exp(-λ.b)	D _i=|F*(b)-F(b)|
1	<=800	13	0,3611	800	0,3611	0,4021	0,0410
2	800-1600	9	0,25	1600	0,6111	0,6425	0,0314
3	1600-2400	6	0,1667	2400	0,7778	0,7862	0,0085
4	2400-3200	3	0,0833	3200	0,8611	0,8722	0,0111
5	3200-4000	3	0,0833	4000	0,9444	0,9236	0,0209
6	4000-4800	2	0,0556	4800	1	0,9543	0,0457
somme	/	36	1	/	/	/	/

Tableau 5.19 Test de Kolmogorov pour les TBR des pompes sea-line

$$D_n = \max(D_i) = 0,0457 < D_{0,05;6} = 0,519$$

Hypothèse admise.

Conclusion :

Les temps de bon fonctionnement suivent une loi exponentielle de distribution.

Calcul du taux de défaillance :

$$MTBF = 1555,5556h$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = 6,43 \times 10^{-4} h^{-1}$$

1.2.1.2. Détermination du taux de réparation :

❖ **Regroupement des temps de réparation :**

Pompe N°1	Pompe N°2	Pompe N°3
8,7	12,3	12,06
10,4	18,2	29,17
38,19	41,8	33,15
58,12	46,3	59,09
64,4	73,1	66,11
89,02	94,44	69,19
90,33	136,19	77
102,02	141,13	128,8
114,33	176,6	139,2
181,12	190,02	148,4
211,01	193,66	153,33
233,89	295,15	219,9

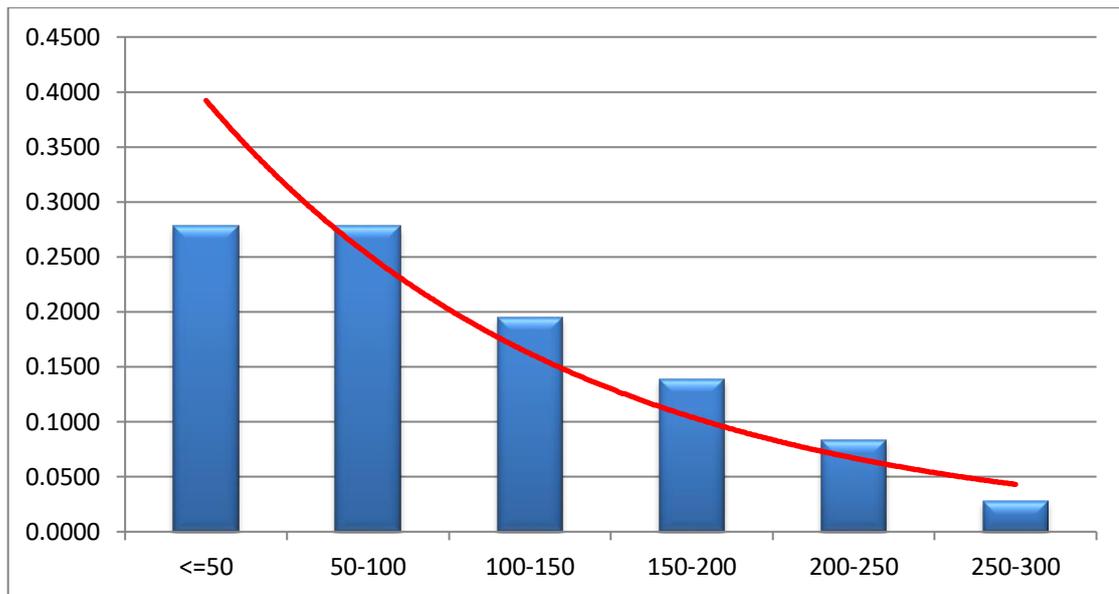
Tableau 5.20 TTR des pompes sea-line

Tableau de probabilité des réparations :

i	classe	ni	xi	pi
1	<=50	10	25	0,2778
2	50-100	10	75	0,2778
3	100-150	7	125	0,1944
4	150-200	5	175	0,1389
5	200-250	3	225	0,0833
6	250-300	1	275	0,0278
Somme	/	36		1

Tableau 5.21 Probabilités de réparation des pompes sea-line

$$m = 102,7778h$$

Histogramme des TTR :**Figure 5.8** Histogramme des TTR des pompes sea-line

D'après l'histogramme on peut émettre l'hypothèse d'une distribution exponentielle de l'échantillon.

❖ **Vérification de l'hypothèse émise par le test de Kolmogorov :**

N°	classe	ni	ni/N	b	F*(b)=∑ni/N	F(b)=1-EXP(-μ.b)	Di=|F*(b)-F(b)|
1	<=50	10	0,2778	50	0,2778	0,3852	0,1074
2	50-100	10	0,2778	100	0,5556	0,6220	0,0665
3	100-150	7	0,1944	150	0,75	0,7676	0,0176
4	150-200	5	0,1389	200	0,8889	0,8571	0,0317
5	200-250	3	0,0833	250	0,9722	0,9122	0,0600
6	250-300	1	0,0278	300	1	0,9460	0,0540
somme	/	36	1	/	/	/	/

Tableau 5.22 Test de Kolmogorov pour les TTR des pompes sea-line

$$D_n = \max(D_i) = 0,1074 < D_{0,05;6} = 0,519$$

Hypothèse admise.

Conclusion :

Les temps de réparation suivent une loi exponentielle de distribution.

Calcul du taux de réparation :

$$MTTR = 102,7778h$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = 0,0097 h^{-1}$$

Grphe d'état : (voir schéma en Annexe)

Equations différentielles :

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = -(2\lambda + \lambda_0)P_3(t) + \mu P_2(t)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = (2\lambda + \lambda_0)P_3(t) - (2\lambda + \mu)P_2(t) + \mu P_1(t)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda + \mu)P_1(t) + 2\lambda P_2(t) + \mu P_0(t)$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = \lambda P_1(t) - \mu P_0(t)$$

Données:

- λ_0 , le taux de panne durant le stockage est nul ($\lambda_0=0$)
- $\frac{\lambda}{\mu} = \frac{6,43 \times 10^{-4}}{0,0097} = 0,0663 < 1$ donc le régime est stationnaire (Quand $t \rightarrow \infty$ $P_i(t) \rightarrow P_i =$ constante)

Le système d'équations devient :

$$0 = -(2\lambda)P_3 + \mu P_2$$

$$0 = (2\lambda)P_3 - (2\lambda + \mu)P_2 + \mu P_1$$

$$0 = -(\lambda + \mu)P_1 + 2\lambda P_2 + \mu P_0$$

$$0 = \lambda P_1 - \mu P_0$$

La résolution du système d'équation précédent donne les probabilités suivantes :

- La probabilité d'avoir 3 pompes disponibles : $P_3 = \frac{\mu^3}{4\lambda^3} P_0$
- La probabilité d'avoir 2 pompes disponibles : $P_2 = \frac{\mu^2}{2\lambda^2} P_0$
- La probabilité d'avoir 1 pompe disponible : $P_1 = \frac{\mu}{\lambda} P_0$
- La probabilité de n'avoir aucune pompe disponible: $P_0 = \frac{1}{(1 + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu^2}{2\lambda^2} + \frac{\mu^3}{6\lambda^3} + \frac{\mu^4}{18\lambda^4})}$

$$P_0=0,0010$$

$$P_1=0,0152$$

$$P_2=0,1148$$

$$P_3=0,8690$$

La disponibilité des pompes sea-line est :

$$D = 1 - (P_0 + P_1) = P_2 + P_3$$

$$D = 0,9838$$

$$D = 98,38\%$$

2. Application à la fiabilité :

Pour le calcul de la fiabilité nous avons utilisé le logiciel Markov Process.

2.1. Description du programme Markov Process :

C'est un programme qui peut résoudre les équations différentielles des états des systèmes selon le graphe de Markov.

a) *New Problem* :

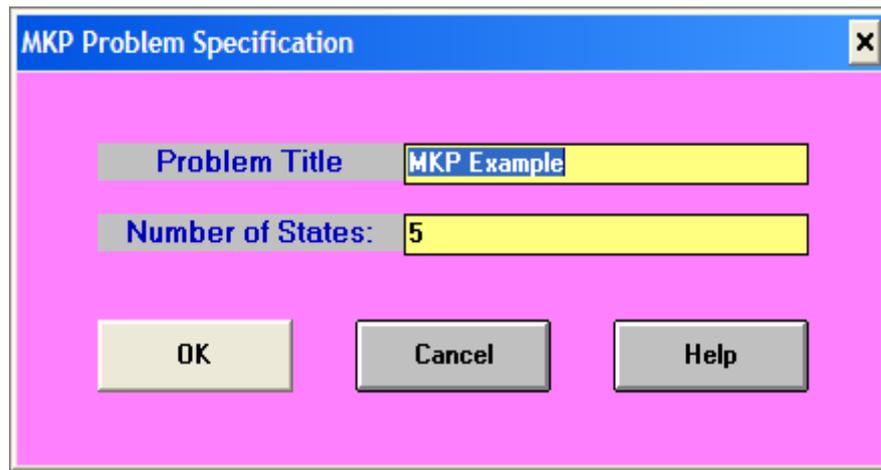


Figure 5.9 Fenêtre « *New problem* » du logiciel Markov process

Number of states : dimension de la matrice des taux de transition.

b) L'écriture de la matrice :

From \ To	State1	State2	State3	State4	State5
State1					
State2					
State3					
State4					
State5					
Initial Prob.					
State Cost					

Figure 5.10 Ecriture de la matrice sur Markov Process

c) Solve and analyze : (Solve steady state)

05-12-2016	State Name	State Probability	Recurrence Time
1	State1	P1	...
2	State2	P2	...
3	State3	P3	...
4	State4	P4	...
5	State5	P5	...
	Expected	Cost/Return =	0

Figure 5.11 Résultat de la résolution de la matrice sur Markov process

2.2. Application de la théorie des chaines de Markov aux pompes d'exportation du système de chargement on-shore :

Graphes de Markov :(Voir schéma en Annexe)

Représentation matricielle :

	E_7	E_6	E_5	E_4	E_3	E_2	E_1	E_0
E_7	$1 - (4\lambda + 3\lambda_0)$	$4\lambda + 3\lambda_0$	0	0	0	0	0	0
E_6	μ	$1 - (4\lambda + 2\lambda_0 + \mu)$	$4\lambda + 2\lambda_0$	0	0	0	0	0
E_5	0	μ	$1 - (4\lambda + \lambda_0 + \mu)$	$4\lambda + \lambda_0$	0	0	0	0
E_4	0	0	μ	$1 - (4\lambda + \mu)$	4λ	0	0	0
E_3	0	0	0	0	$1 - 3\lambda$	3λ	0	0
E_2	0	0	0	0	0	$1 - 2\lambda$	2λ	0
E_1	0	0	0	0	0	0	$1 - \lambda$	λ
E_0	0	0	0	0	0	0	0	1

Données :

$\mu = 0,01069 \text{ h}^{-1}$

$\lambda = 0,00068 \text{ h}^{-1}$

$\lambda_0 = 0$ Pendant le stockage

Matrice numérique :

0,99728	0,00272	0	0	0	0	0	0	0
0,01069	0,98659	0,00272	0	0	0	0	0	0
0	0,01069	0,98659	0,00272	0	0	0	0	0
0	0	0,01069	0,98659	0,00272	0	0	0	0
0	0	0	0	0,99796	0,00204	0	0	0
0	0	0	0	0	0,99864	0,00136	0	0
0	0	0	0	0	0	0,99932	0,00068	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1

Résolution du système en utilisant Markov Process :

05-10-2016	State Name	State Probability	Recurrence Time
1	State1	0.7068	1.4149
2	State2	0.1776	5.6303
3	State3	0.0430	23.2697
4	State4	0.0087	114.7228
5	State5	0.0116	86.0433
6	State6	0.0174	57.3622
7	State7	0.0349	28.6823
8	State8	0.0000	42179.9000
	Expected	Cost/Return =	0

Figure 5.12 Résultats de la fiabilité des pompes d'exportation du port pétrolier

$$P_7 = 0,7068$$

$$P_6 = 0,1776$$

$$P_5 = 0,0430$$

$$P_4 = 0,0087$$

$$P_3 = 0,0116$$

$$P_2 = 0,0174$$

$$P_1 = 0,0349$$

$$P_0 = 0,0000$$

$$R = 1 - (P_0 + P_1 + P_2 + P_3)$$

$$R = 0,9361$$

2.3. Application de la théorie des chaînes de Markov aux bras de chargement du poste N°3 :

Graphe de Markov : (Voir schéma en Annexe)

La représentation matricielle :

$$\begin{array}{c}
 E_4 \\
 E_3 \\
 E_2 \\
 E_1 \\
 E_0
 \end{array}
 \left[\begin{array}{ccccc}
 & E_4 & E_3 & E_2 & E_1 & E_0 \\
 & 1 - (3\lambda + \lambda_0) & 3\lambda + \lambda_0 & 0 & 0 & 0 \\
 & \mu & 1 - (3\lambda + \mu) & 3\lambda & 0 & 0 \\
 & 0 & 0 & 1 - 2\lambda & 2\lambda & 0 \\
 & 0 & 0 & 0 & 1 - \lambda & \lambda \\
 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right]$$

Données :

$$\mu = 0,0182 \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda = 0,00356 \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda_0 = 0 \text{ Pendant le stockage}$$

La matrice numérique :

$$\left[\begin{array}{ccccc}
 0,98932 & 0,01068 & 0 & 0 & 0 \\
 0,0182 & 0,97112 & 0,01068 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0,99288 & 0,00712 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0,99644 & 0,00356 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right]$$

Résolution du système en utilisant Markov Process :

05-12-2016	State Name	State Probability	Recurrence Time
1	State1	0.3292	3.0379
2	State2	0.1217	8.2148
3	State3	0.1826	5.4765
4	State4	0.3652	2.7383
5	State5	0.0013	769.1776
	Expected	Cost/Return =	0

Figure 5.13 Résultats de la fiabilité des bras de chargement du poste N°3

$$P_4 = 0,3292$$

$$P_3 = 0,1217$$

$$P_2 = 0,1826$$

$$P_1 = 0,3652$$

$$P_0 = 0.0013$$

$$R = 1 - (P_0 + P_1 + P_2)$$

$$R = 0,4509$$

$$R = 45,09\%$$

2.4. Application de la théorie des chaînes de Markov aux pompes d'exportation du système de chargement off-shore :

Graphe de Markov : (Voir schéma en Annexe)

La représentation matricielle :

$$\begin{bmatrix} 1 - (2\lambda + \lambda_0) & 2\lambda + \lambda_0 & 0 & 0 \\ \mu & 1 - (2\lambda + \mu) & 2\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \lambda & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Données :

$$\mu = 0,0097 \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda = 6,43 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda_0 = 0 \text{ Pendant le stockage}$$

La matrice numérique :

$$\begin{bmatrix} 0,998714 & 0,001286 & 0 & 0 \\ 0,0097 & 0,989014 & 0,001286 & 0 \\ 0 & 0 & 0,999357 & 0,000643 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Résolution du système en utilisant Markov Process :

05-12-2016	State Name	State Probability	Recurrence Time
1	State1	0.7400	1.3513
2	State2	0.0866	11.5440
3	State3	0.1732	5.7721
4	State4	0.0001	8976.8690
	Expected	Cost/Return =	0

Figure 5.14 Résultats de la fiabilité des pompes sea-line

$$P_3 = 0,74$$

$$P_2 = 0,0866$$

$$P_1 = 0,1732$$

$$P_0 = 0.0001$$

$$R = 1 - (P_0 + P_1)$$

$$R = 0,8267$$

$$R = 82,67\%$$

3. Interprétation des résultats :

En analysant les résultats obtenus on constate que :

Système on-shore :

- Les pompes d'exportation du port pétrolier ont une bonne disponibilité et ce malgré des temps de réparation élevés. Cela est expliqué par le fait d'avoir 3 pompes en réserve, en effet, le nombre d'éléments en redondance influe directement sur la disponibilité d'un système.

Puisqu'on dispose de plusieurs pompes de chargement, et ces dernières ne sont mises en marche que durant les opérations de chargement (temps de marche faible), on obtient une bonne fiabilité.

- La disponibilité et la fiabilité des bras de chargement du poste N°3 est faible, ceci implique qu'ils sont en mauvais état de fonctionnement de raison de l'ancienneté des installations de ces derniers.
- Le nombre de bac de stockage ainsi que leurs mise en parallèle augmentent la disponibilité et ce malgré l'inactivité de deux (2) d'entre eux.

Système off-shore :

- Les pompes sea-line possèdent une bonne disponibilité et fiabilité, et ce pour les mêmes raisons que celles des pompes d'exportation du port pétrolier.

Conclusion

Dans notre présent travail, nous nous sommes intéressés aux performances des systèmes de chargement de brut du terminal marin de Bejaia, notre étude s'est focalisée d'une part, sur la disponibilité de ces systèmes en évaluant :

- La disponibilité et la fiabilité des bras de chargement ;
- La disponibilité et la fiabilité des pompes d'exportation ;
- La disponibilité des bacs de stockage.

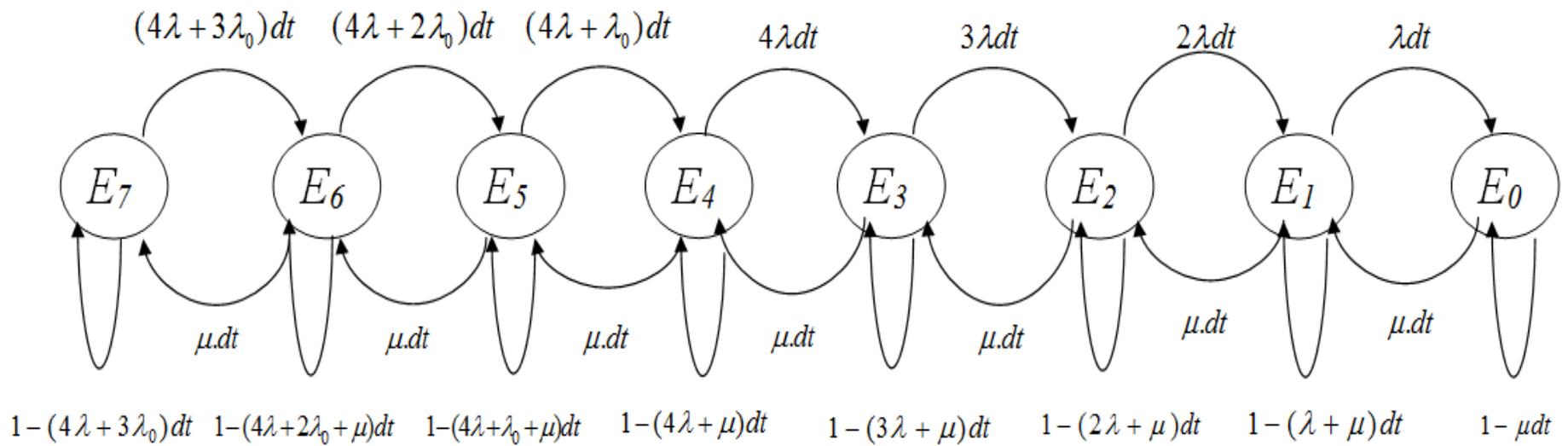
La disponibilité des deux systèmes étudiés (on shore et offshore) s'est avérée assez bonne, mise à part quelques composants du système on shore, à savoir : les bras de chargement du poste N°3 (disponibilité et fiabilité assez faible).

D'autre part, cette étude s'est basé sur une modélisation à l'aide de la théorie des files d'attente, ce qui nous a permis d'avoir une vue réelle sur les difficultés et différents problèmes rencontrés au cours des opérations de chargement.

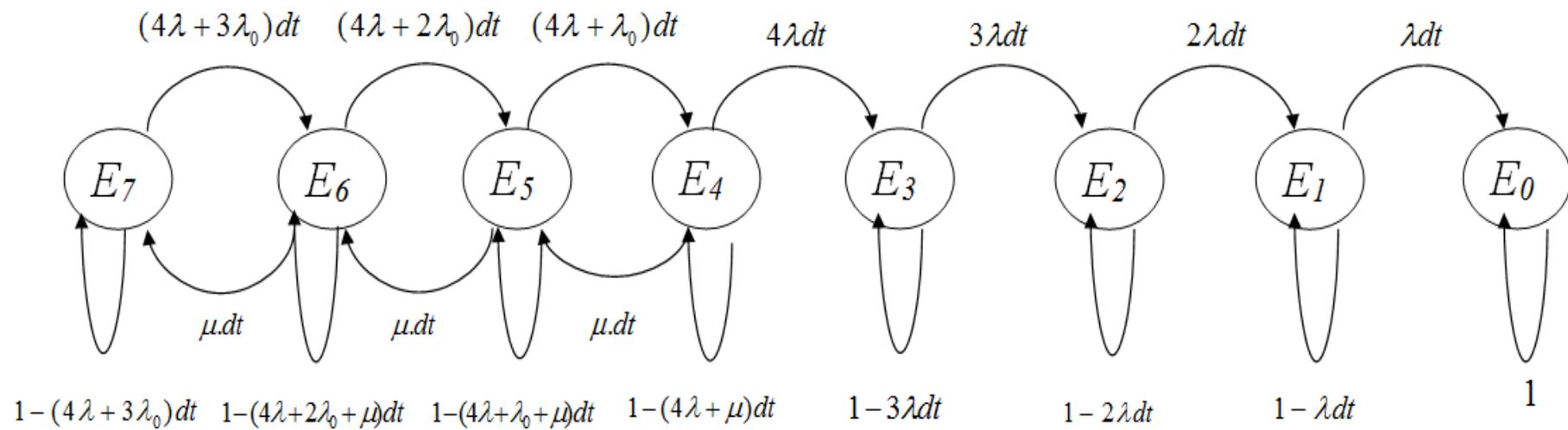
Nous avons conclu notre travail par une recherche de solutions envisageables afin d'améliorer les performances des systèmes de chargement du terminal.

Références bibliographiques

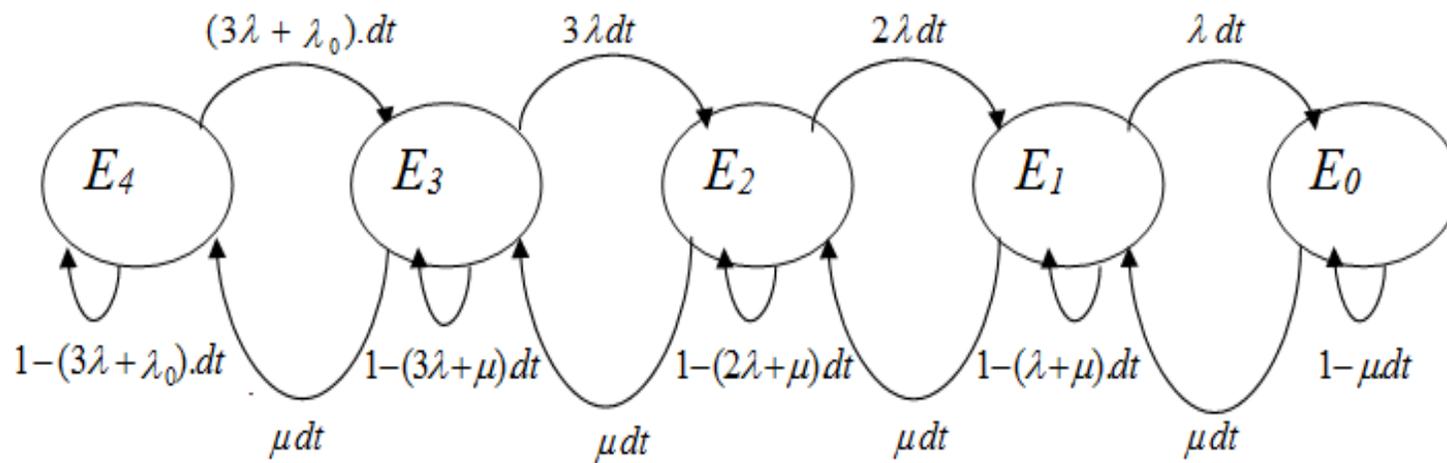
- [1] Rapport mensuel de l'état du terminal, TRC Bejaïa.
- [2] Manuel d'exploitation de l'installation d'exportation de pétrole brut et de condensat à Bejaïa (numéro du document 1459-20-AM-1603-OM-0075) FMC Technologies
- [3] Support de formation cours, révision 0.1 TOTAL (les équipements stockage et terminaux)
- [4] Rapport de contrôle technique réglementaire de sécurité des installations électriques ; direction régionale centre STH Bejaïa (port pétrolier) 2015
- [5] Liste des travaux à rajouter dans le cadre du contrat TRC/ENGTP « portant sur la mise à niveau et sécurisation des installations et infrastructures de surface au niveau du port pétrolier de Bejaïa » 2016
- [6] ALAIN BILLIONNET, Note de cours Recherche opérationnelle, 2010-2011
- [7] CLAUDE RIGAULT, introduction à la théorie des files d'attente, 21/02/2010
- [8] P.MAILLE (Notions de fiabilité, MTBF, MTTR, disponibilité) www.enst-bretagne.fr
- [9] GELEMBE « Introduction aux réseaux de file d'attente » 1985
- [10] PELAUMAIL.J, probabilités statistiques, files d'attente : cours et exercices résolus, 1986
- [11] MICHEL MAROT, de la modélisation du trafic dans les réseaux de télécommunication
- [12] R.LITTLE, J. EKVALL, Statistical analysis, 1979
- [13] Introduction aux télécommunications Chaîne de Markov - Télétrafic - Files d'attente
- [14] KLEINROCK.L, Queueing Systems Volume 1: Theory, Wiley, 1975.
- [15] COCOZZA. C .THIVENT, Processus stochastique de fiabilité des systèmes, Ed Springer, 1997
- [16] Dr K.YOUNSI, Cours de réhabilitation des pipelines
- [17] Pr AHMED BELLAOUAR et M.A SALIMA BELEULMI, polycopié de fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD), université de Constantine 1
- [18] Pr AMAR BENMOUNAH, Markovian Approach of safety engineering of system European journal of scientific research
- [19] ALAN RUEGG, Processus stochastiques avec applications aux phénomènes d'attente et de fiabilité, 1989



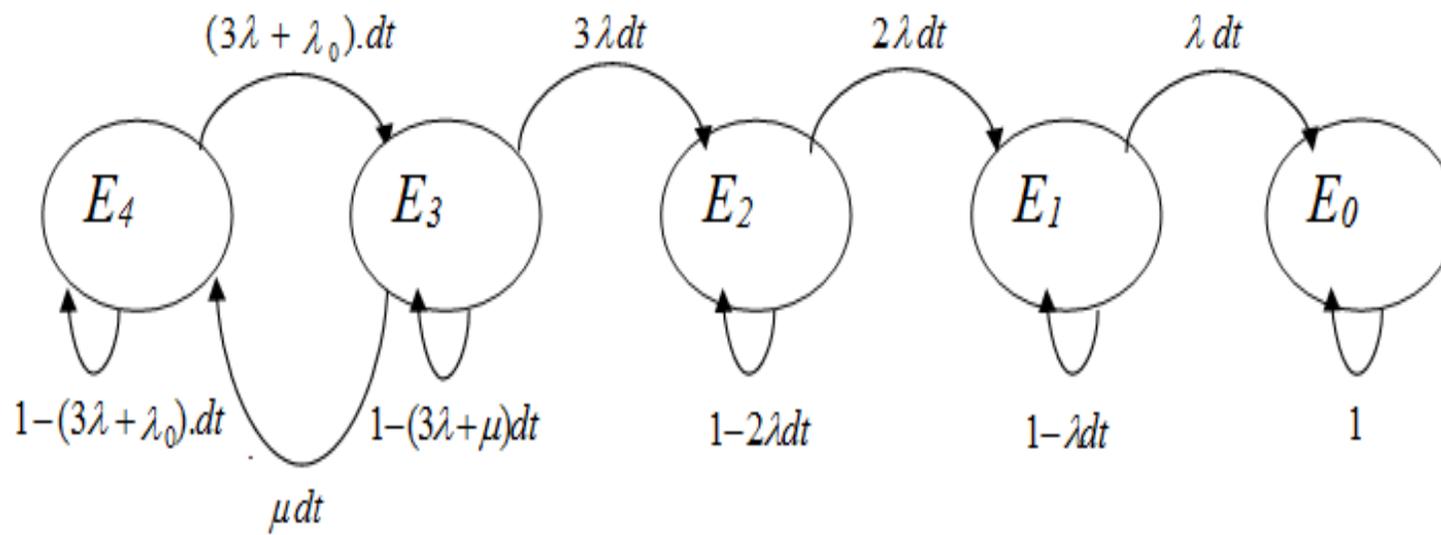
Graphe de Markov pour les pompes on shore (disponibilité avec 1 seul réparateur)



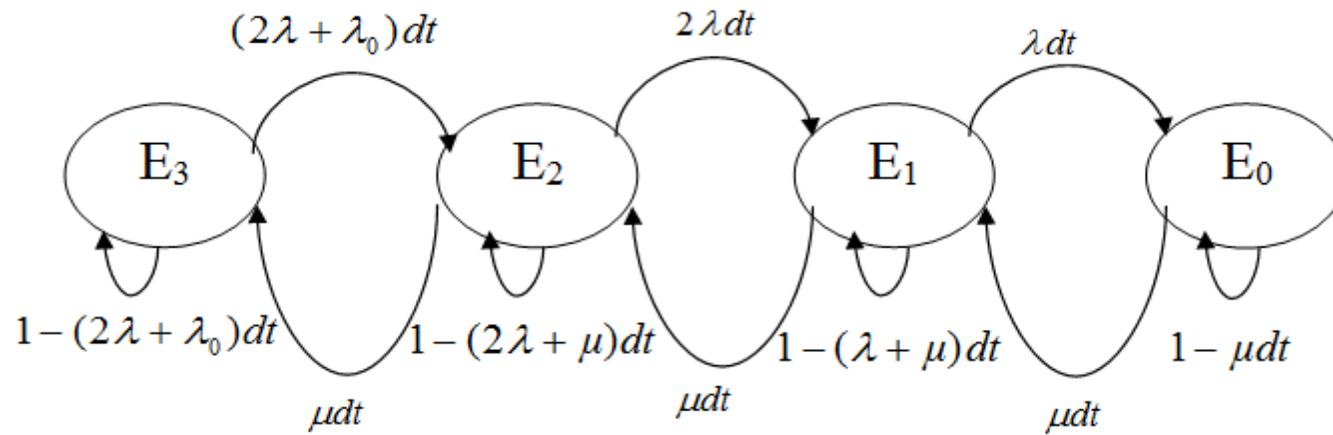
Graphe de Markov pour les pompes on shore (fiabilité avec 1 seul réparateur)



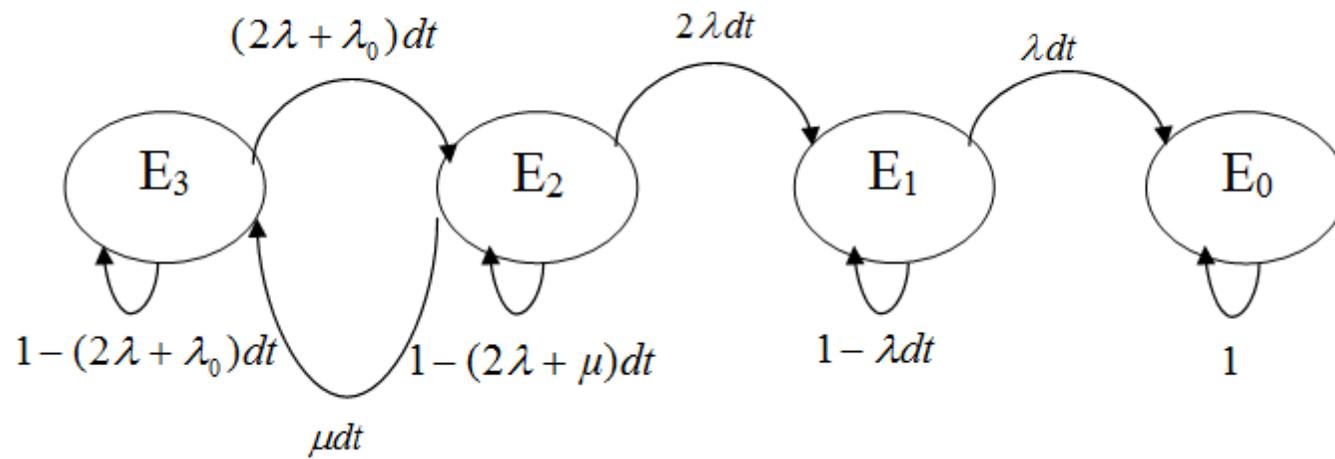
Graphe de Markov pour les bras de chargement (disponibilité avec 1 seul réparateur)



Grphe de Markov pour les bras de chargement (fiabilité avec 1 seul réparateur)



Grphe de Markov pour les pompes offshore (disponibilité avec 1 seul réparateur)



Graphe de Markov pour les pompes offshore (fiabilité avec 1 seul réparateur)

$\alpha \backslash n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,01	1,0000	0,9950	0,9293	0,8290	0,7342	0,6685	0,6166	0,5758	0,5418	0,5133
0,05	1,0000	0,9750	0,8419	0,7076	0,6239	0,5633	0,5193	0,4834	0,4543	0,4300
0,10	1,0000	0,9500	0,7764	0,6360	0,5652	0,5094	0,4680	0,4361	0,4096	0,3875
0,15	1,0000	0,9250	0,7261	0,5958	0,5248	0,4744	0,4353	0,4050	0,3806	0,3601
0,20	1,0000	0,9000	0,6838	0,5648	0,4927	0,4470	0,4104	0,3815	0,3583	0,3391

$\alpha \backslash n$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,01	0,4889	0,4677	0,4490	0,4325	0,4176	0,4042	0,3920	0,3809	0,3706	0,3612
0,05	0,4092	0,3912	0,3754	0,3614	0,3489	0,3376	0,3273	0,3180	0,3094	0,3014
0,10	0,3687	0,3524	0,3381	0,3255	0,3142	0,3040	0,2947	0,2863	0,2785	0,2714
0,15	0,3425	0,3273	0,3141	0,3023	0,2918	0,2823	0,2737	0,2659	0,2587	0,2520
0,20	0,3226	0,3083	0,2957	0,2847	0,2748	0,2658	0,2577	0,2503	0,2436	0,2373

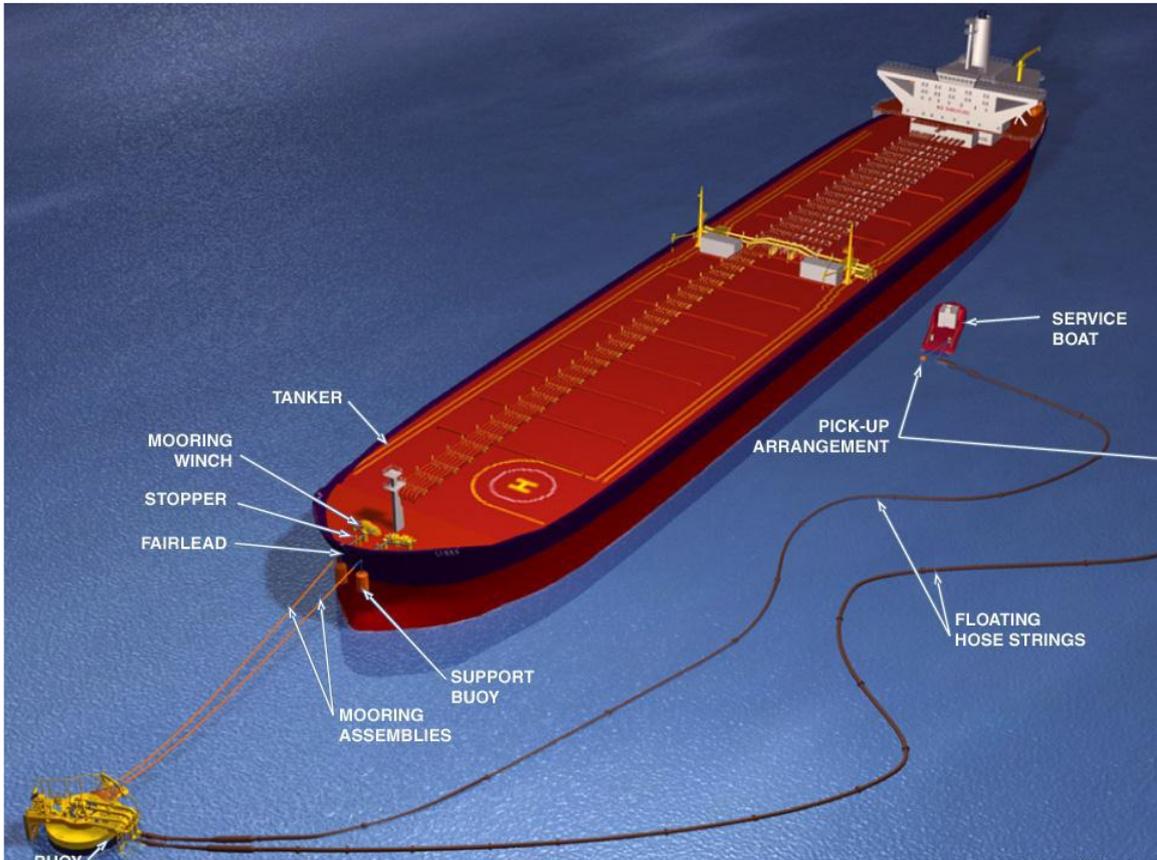
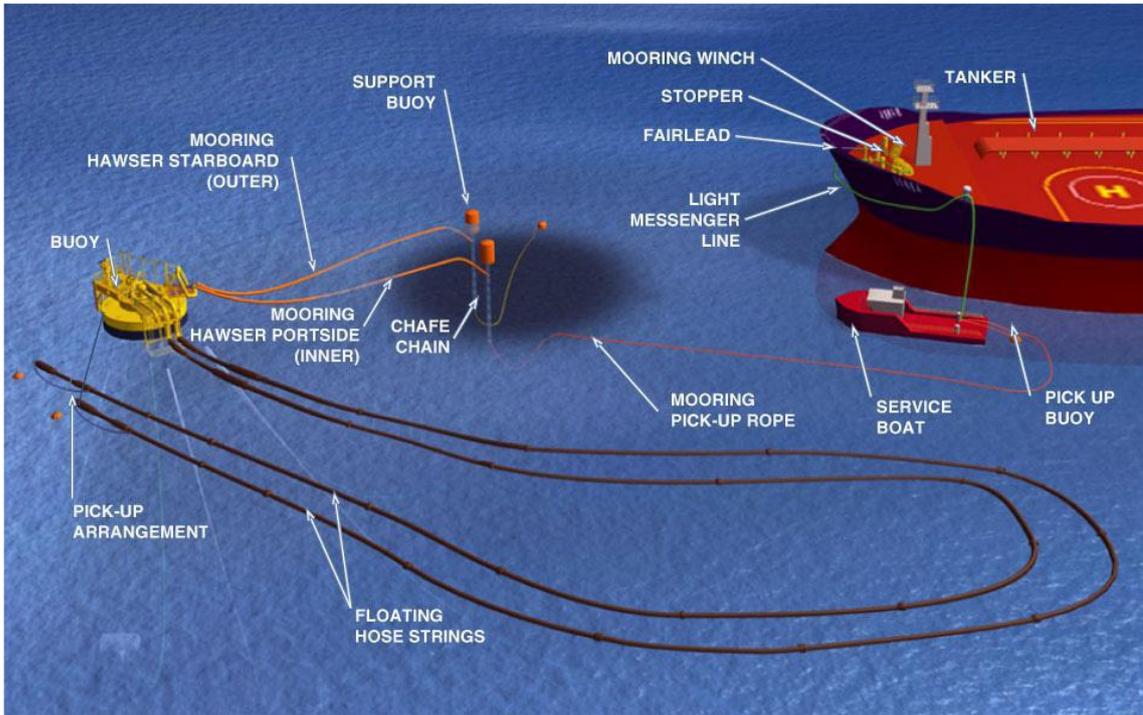
$\alpha \backslash n$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
0,01	0,3524	0,3443	0,3367	0,3295	0,3229	0,3166	0,3106	0,3050	0,2997	0,2947
0,05	0,2941	0,2872	0,2809	0,2749	0,2693	0,2640	0,2591	0,2544	0,2499	0,2457
0,10	0,2647	0,2586	0,2528	0,2475	0,2424	0,2377	0,2332	0,2290	0,2250	0,2212
0,15	0,2459	0,2402	0,2348	0,2298	0,2251	0,2207	0,2166	0,2127	0,2089	0,2054
0,20	0,2315	0,2261	0,2211	0,2164	0,2120	0,2079	0,2040	0,2003	0,1968	0,1934

Table de quantiles de la statistique de KOLMOGOROV Smirnov

k	γ										
	0.995	0.990	0.975	0.950	0.900	0.500	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.45	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	1.39	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	2.37	6.25	7.81	9.35	11.34	12.84
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	3.36	7.78	9.94	11.14	13.28	14.86
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	4.35	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	5.35	10.65	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	6.35	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	7.34	13.36	15.51	17.53	20.09	21.96
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	8.34	14.68	16.92	19.02	21.67	23.59
10	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	9.34	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	10.34	17.28	19.68	21.92	24.72	26.76
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	11.34	18.55	21.03	23.34	26.22	28.30
13	3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	12.34	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	13.34	21.06	23.68	26.12	29.14	31.32
15	4.60	5.23	6.27	7.26	8.55	14.34	22.31	25.00	27.49	30.58	32.80
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	15.34	23.54	26.30	28.85	32.00	34.27
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	16.34	24.77	27.59	30.19	33.41	35.72
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.87	17.34	25.99	28.87	31.53	34.81	37.16
19	6.84	7.63	8.81	10.12	11.65	18.34	27.20	30.14	32.85	36.19	38.58
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	19.34	28.41	31.41	34.17	37.57	40.00
21	8.03	8.90	10.28	11.59	13.24	20.34	29.62	32.67	35.48	38.93	41.40
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	21.34	30.81	33.92	36.78	40.29	42.80
23	9.26	10.20	11.69	13.09	14.85	22.34	32.01	35.17	38.08	41.64	44.18
24	9.89	10.86	12.40	13.85	15.66	23.34	33.20	36.42	39.36	42.98	45.56
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	24.34	34.28	37.65	40.65	44.31	46.93
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	25.34	35.56	38.89	41.92	45.64	48.29
27	11.81	12.88	14.57	16.15	18.11	26.34	36.74	40.11	43.19	46.96	49.65
28	12.46	13.57	15.31	16.93	18.94	27.34	37.92	41.34	44.46	48.28	50.99
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	28.34	39.09	42.56	45.72	49.59	52.34
30	13.79	14.95	16.79	18.49	20.60	29.34	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67
40	20.71	22.16	24.43	26.51	29.05	39.34	51.81	55.76	59.34	63.69	66.77
50	27.99	29.71	32.36	34.76	37.69	49.33	63.17	67.50	71.42	76.15	79.49
60	35.53	37.48	40.48	43.19	46.46	59.33	74.40	79.08	83.30	88.38	91.95
70	43.28	45.44	48.76	51.74	55.33	69.33	85.53	90.53	95.02	100.42	104.22
80	51.17	53.54	57.15	60.39	64.28	79.33	96.58	101.88	106.63	112.33	116.32
90	59.20	61.75	65.65	69.13	73.29	89.33	107.57	113.14	118.14	124.12	128.30
100	67.33	70.06	74.22	77.93	82.36	99.33	118.50	124.34	129.56	135.81	140.17

Loi de khi 2 avec k degrés de liberté

Quantile d'ordre 1-Y



SPM loading system



Handysize
20 000 – 30 000 DWT



Handymax
approx. 45 000 DWT



Panamax
approx. 79 000 DWT



Suezmax
120 000 - 160 000 DWT



VLCC
160 000 – 320 000 DWT



ULCC
over 320 000 DWT

Types of oil tankers (size)
Types des tankers selon la taille