

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



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

Faculté des Sciences Économiques, Commerciales et des Sciences de Gestion  
Département des sciences économiques

**MÉMOIRE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE**  
**MASTER**

**Domaine : Sciences économiques, commerciales et de gestion**  
**Filière : Sciences économiques**  
**Spécialité : Économie Quantitative**

*Thème*

**Évaluation des performances d'un système de files d'attente.**

**Cas de l'Entreprise Portuaire de Bejaia (EPB)**

**Réalisé Par :**

- OUARET LOULA
- MOULA SARA

**Devant le jury :**

- **Promoteur** : Mr LAOUAR Abdelhek
- **Président** : Mr BOUAISSAOUI Samir
- **Examineur** : Mr ASLI Larbi

**Année Universitaire : 2022 / 2023**



# REMERCIEMENTS

*Tout d'abord nous devrions remercier DIEU le tout puissant et le miséricordieux de nous avoir donné la chance, la patience et courage pour réaliser ce travail.*

*Nous souhaitons rendre hommage à tous ceux qui nous ont accompagnés, Formés et conseillés et dirigés tout au long de notre parcours ; Nos parents, professeurs responsables, ou encore collègues et ami(es). Ce mémoire reflète bien leurs pensées, leurs modélisations, leurs conseils, leurs préoccupations et leurs amitiés.*

*Nos remerciements vont également à notre encadreur Mr LAOUAR, pour son aide, sa générosité et le temps qu'il nous a consacrés, et par le réconfort que vous nous avez apporté lors de l'élaboration de ce travail.*

*Sans oublier de remercier tous nos enseignants sur tout notre responsable de spécialité*

*M<sup>r</sup>. ABDERRAHMANI.*

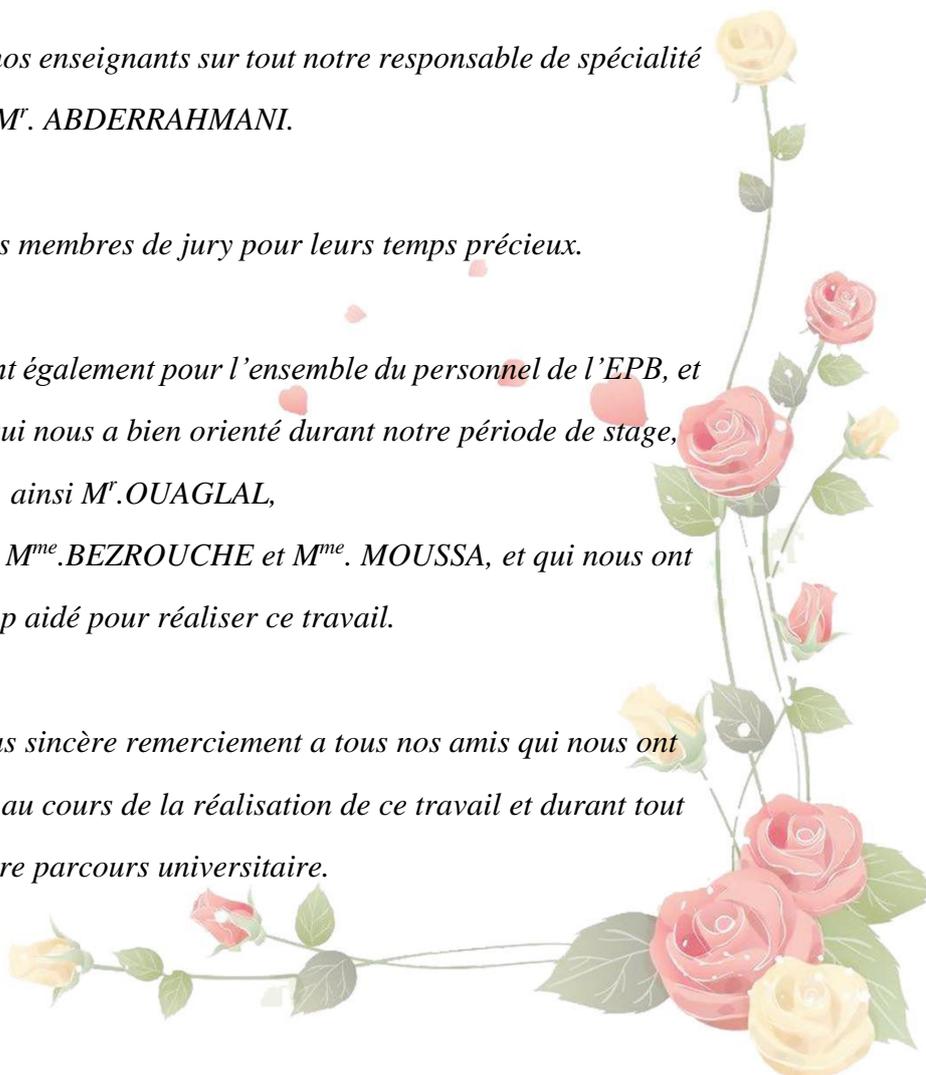
*On tient à remercier les membres de jury pour leurs temps précieux.*

*Nos profonds remerciements vont également pour l'ensemble du personnel de l'EPB, et à notre encadreur M<sup>r</sup>.RAMY qui nous a bien orienté durant notre période de stage,*

*ainsi M<sup>r</sup>.OUAGLAL,*

*M<sup>r</sup>. ZIANE, M<sup>me</sup>. BOUCHEFA, M<sup>me</sup>.BEZROUCHE et M<sup>me</sup>. MOUSSA, et qui nous ont beaucoup aidé pour réaliser ce travail.*

*En fin, nous adressons nos plus sincère remerciement a tous nos amis qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce travail et durant tout notre parcours universitaire.*





## **Dédicaces**

*Je dèdie ce modeste travail à mon PAPA qui était toujours fier de moi et de mes réussites, et à ma Mère pour son aide et amour, et à mes frères et sœurs, à ma deuxième famille KARIMA et BOUBKER, mes amies proches que j'aime trop vous êtes ma force, et a tous ceux qui aiment LOULA, et ma chère binôme SARA.*

**OUARET LOULA**

*Je dédie ce travail aux deux personnes les plus chères au monde mon PAPA et MAMA, en signe d'amours et de gratitude, à mes adorables sœurs, à mes précieuses amies proches et à ma chère binôme LOULA, ainsi à toute ma famille et tous qui mon soutenue de près et de loin.*

**MOULA SARA**



---

# TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>iii</b>
<b>Liste de figures</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>v</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>vi</b>
<b>Glossaire des Termes Portuaires</b>	<b>vii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités sur les ports</b>	<b>4</b>
Introduction . . . . .	4
1.1 Section 01 : Notions de base sur la gestion portuaire à l'échelle mondiale . . . . .	4
1.1.1 Définitions . . . . .	4
1.1.2 Types de ports . . . . .	5
1.1.2.1 Classification selon leurs activités . . . . .	5
1.1.2.2 Classification selon leur utilisation . . . . .	6
1.1.2.3 Classification selon leur nature . . . . .	6
1.1.2.4 Classification selon leur propriété . . . . .	6
1.1.3 Le rôle des ports . . . . .	6
1.1.4 Gestion des ports . . . . .	8
1.2 Section 02 : La diversité des navires à travers le monde . . . . .	11
1.2.1 Définition d'un navire . . . . .	11
1.2.2 Les types de navire . . . . .	11
1.2.2.1 Navires passagers . . . . .	11
1.2.2.2 Navires de charge . . . . .	12
Conclusion . . . . .	15

<b>2</b>	<b>Théorie des files d'attente</b>	<b>16</b>
	Introduction . . . . .	16
2.1	Section 01 : Processus aléatoires et files d'attente . . . . .	16
2.1.1	Processus aléatoires . . . . .	16
2.1.1.1	Processus de Comptage . . . . .	16
2.1.1.2	Processus de Poisson . . . . .	17
2.1.1.3	Processus stationnaire . . . . .	17
2.1.1.4	Processus de Poisson et la loi exponentielle . . . . .	18
2.1.2	File d'attente . . . . .	18
2.1.2.1	Identification des systèmes d'attente . . . . .	18
2.1.2.2	La notation de Kendall . . . . .	19
2.1.2.3	Tests d'ajustement . . . . .	19
2.1.2.3.1	Test de KHI-DEUX . . . . .	19
2.1.2.3.2	Test de Kolmogorov-Smirnov . . . . .	20
2.1.2.4	Discipline de service . . . . .	21
2.2	Section 02 : Les modèles existants . . . . .	22
2.2.1	Les modèles Markoviens . . . . .	22
2.2.1.1	Modèle M/M/1 (serveur unique, temps de service expo- nentiel) . . . . .	22
2.2.1.2	Modèle M/D/1 (Temps de service constant) . . . . .	23
2.2.1.3	Modèle M/M/m (serveurs multiples) . . . . .	24
2.2.1.4	Modèle $M^{[X]}/M/1$ . . . . .	24
2.2.2	Les modèles non Markoviens . . . . .	24
2.2.2.1	Le modèle M/G/1 . . . . .	25
2.2.2.2	Le modèle G/M/1 . . . . .	25
2.2.2.3	Le modèle G/G/1 . . . . .	25
2.3	Section 03 : Les réseaux de files d'attente . . . . .	25
2.3.1	Les réseaux de Jackson ouverts . . . . .	25
2.3.2	Les réseaux de Jackson fermés . . . . .	26
2.3.3	Les réseaux de files d'attente avec blocage . . . . .	26
	Conclusion . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Présentation du problème</b>	<b>27</b>
	Introduction . . . . .	27
3.1	Section 01 : L'Entreprise Portuaire de Bejaia . . . . .	27
3.1.1	Présentation du port de Bejaia . . . . .	27
3.1.2	Les différentes structures de l'EPB . . . . .	28
3.1.3	Les équipements . . . . .	30
3.2	Section 02 : Classification des postes à quais et des navires . . . . .	31
3.2.1	Les postes à quai . . . . .	31
3.2.2	Les navires . . . . .	32
3.2.2.1	Parcours d'un navire arrivant au port . . . . .	32
3.2.2.2	Les types de navires . . . . .	33
	Conclusion . . . . .	38

<b>4</b>	<b>Évaluation des performances d'un système de file d'attente au sein de l'EPB</b>	<b>39</b>
	Introduction . . . . .	39
4.1	Section 01 : Estimation des différentes lois d'arrivée des navires . . . . .	39
4.1.1	Loi d'arrivée des navires de type BITUMIER . . . . .	40
4.1.2	Loi d'arrivée des navires de type BUTANIER . . . . .	40
4.1.3	Loi d'arrivée des navires de type CARBURANT . . . . .	42
4.1.4	Loi d'arrivée des navires de type CAR-FERRIES . . . . .	43
4.1.5	Loi d'arrivée des navires de type CARGO . . . . .	44
4.1.6	Loi d'arrivée des navires de type CEREALIER . . . . .	46
4.1.7	Loi d'arrivée des navires de type HUILIER . . . . .	47
4.1.8	Loi d'arrivée des navires de type PETROLIER . . . . .	49
4.1.9	Loi d'arrivée des navires de type PORTE-CONTENEURS . . . . .	50
4.1.10	Loi d'arrivée des navires de type RO-RO . . . . .	51
4.2	Section 02 : Estimation des différentes lois de service des navires . . . . .	52
4.2.1	Loi de service des navires de type BITUMIER . . . . .	52
4.2.2	Loi de service des navires de type BUTANIER . . . . .	53
4.2.3	Loi de service des navires de type CARBURANT . . . . .	54
4.2.4	Loi de service des navires de type CAR-FERRIES . . . . .	55
4.2.5	Loi de service des navires de type CARGO . . . . .	56
4.2.6	Loi de service des navires de type CEREALIER . . . . .	57
4.2.7	Loi de service des navires de type HUILIER . . . . .	58
4.2.8	Loi de service des navires de type PETROLIER . . . . .	59
4.2.9	Loi de service des navires de type PORTE-CONTENEURS . . . . .	60
4.2.10	Loi de service des navires de type RO/RO . . . . .	61
4.3	Modèle Proposé . . . . .	62
	Conclusion . . . . .	69
	<b>Conclusion générale</b>	<b>70</b>
	<b>Bibliographie.</b>	<b>72</b>
	<b>Annexes.</b>	<b>73</b>

---

# TABLE DES FIGURES

1.1	Les différents types de ports . . . . .	5
1.2	Les composantes de la gestion portuaire . . . . .	10
2.1	Système de files d'attente . . . . .	19
2.2	Test de Kolmogorov-Smirnov . . . . .	21
3.1	Organigramme de l'EPB (source : DC de l'EPB) . . . . .	28
3.2	Plan de répartition des postes à quai du port de Bejaia . . . . .	31
3.3	Modélisation du parcours d'un navire . . . . .	33
4.1	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type BITUMIER . . . . .	41
4.2	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type BUTANIER . . . . .	42
4.3	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CARBURANT . . . . .	43
4.4	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CAR-FERRIES . . . . .	44
4.5	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CARGO . . . . .	46
4.6	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CEREALIER . . . . .	47
4.7	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type HUILIER . . . . .	48
4.8	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type PETROLIER . . . . .	50
4.9	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type PORTE-CONTENEURS . . . . .	51
4.10	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type RO-RO . . . . .	52
4.11	Le nouveau modèle l'affectation des navires . . . . .	63
4.12	Résultats Comparatifs . . . . .	69

---

# LISTE DES TABLEAUX

3.1	Mesures de performance des navires à base des données de L'EPB . . . . .	38
4.1	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type BITUMIER . . . . .	40
4.2	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type BUTANIER . . . . .	41
4.3	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CARBURANT . . . . .	42
4.4	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CAR-FERRIES . . . . .	43
4.5	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CARGO . . . . .	45
4.6	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CEREALIER . . . . .	46
4.7	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type HUILIER . . . . .	48
4.8	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type PETROLIER . . . . .	49
4.9	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type PORTE-CONTENEURS . . . . .	50
4.10	Estimation de la loi d'arrivée des navires de type RO-RO . . . . .	51
4.11	Mesures de performance des navires avec le modèle proposé . . . . .	69
4.12	Table khi-deux avec $k$ degrés de liberté : Quantiles d'ordre $1 - \gamma$ . . . . .	77
4.13	Table de Kolmogorov-Smirnov . . . . .	78

---

# LISTE DES ABRÉVIATIONS

- **BMT** : Bejaia Mediterranean Terminal.
- **BSAP** : Association des ports de la mer Baltique et de la mer du Nord.
- **D.A** : Direction Achats.
- **D.C** : Direction capitainerie.
- **D.D.D** : Direction Domaine et Développement.
- **D.D.N** : Direction Digitalisation et Numérique.
- **D.E** : Direction Exploitation.
- **D.F.C** : Direction des Finances et Comptabilité.
- **D.G** : Direction Générale.
- **D.G.A.F** : Direction Générale Adjointe Fonctionnelle.
- **D.G.A.O** : Direction Générale Adjointe Opérationnelle.
- **D.M** : Direction Maintenance.
- **D.R.H** : Direction des Ressources Humaines.
- **EPB** : Entreprise Portuaire de Bejaia.
- **EVP** : Equivalent Vingt Pieds.
- **IAPH** : Association Internationale des ports.
- **MED** : Association des ports de la Méditerranée.
- **OMI** : Organisation Maritime Internationale.
- **U.P** : Unité Payante.

---

# GLOSSAIRE DES TERMES PORTUAIRES

- **Accostage** : manœuvre d'approche finale du navire à l'ouvrage (quai ou appontement) conçue pour permettre le stationnement des navires, leur amarrage et manutention.
- **Acconage** : est une activité liée au transport maritime de marchandise. Cela implique la manipulation, le stockage et la distribution des marchandises sur les quais et dans les entrepôts des ports.
- **Amarrage** : immobilisation d'un navire au moyen d'aussières (câbles) à un quai ou une bouée.
- **Arrimage** : opération qui consiste à fixer solidement les marchandises à bord du navire.
- **Bâbord** : côté gauche du navire considéré dans le sens de sa marche normale.
- **BMT** : une jointe venture entre EPB et PORTEK Systems and Equipment (PSE), elle est spécialisée dans la gestion et l'exploitation du Terminal à conteneurs du port de Bejaia.
- **Capitainerie** : service dépendant de l'autorité portuaire et chargé de coordonner les mouvements de navires dans le port et de la police.
- **Cargaison** : diverses marchandises.
- **Conférence** : en tente d'armateurs visant surtout à l'application de taux de fret communs sur des destinations données et à la coordination des transports.
- **Conteneur** : engin de transport généralement de forme parallélépipédique conçu pour faciliter le transport sans rupture de charge et muni de dispositifs rendant sa manipulation aisée. Les conteneurs normalisés mesurent 20, 30 et 40 pieds de long,

soit une capacité respective de 30, 45 et 60  $m^3$ .

- **Débarquement** : est le processus inverse de l'embarquement, c'est-à-dire la descente ou la sortie des passagers et des marchandises d'un moyen de transport.
- **Désarrimage** : est le processus de détachement de conteneurs, de cargaison, d'équipement ou d'une charge fixée à un support tel qu'un navire.
- **Drague** : engin pour enlever les boues, les vases et les graviers du fond de l'eau.
- **Embarquement** : est le processus de montée à bord d'un moyen de transport tel qu'un navire.
- **Entreposage** : est l'activité de stockage de marchandise pour une période donnée.
- **EPB** : Entreprise Portuaire de Bejaia, elle est responsable de la gestion des opérations portuaires, de l'administration, de la maintenance des infrastructures portuaires, de la sécurité et la facilitation des activités commerciales.
- **E.V.P** : mesure statistique pour le trafic de conteneurs.
- **Evitage** : plan d'eau suffisamment vaste pour permettre à un navire de tourner.
- **Forage** : implique le creusement précis de cavités pour permettre la réalisation de ces activités liées à la construction, à l'infrastructure et à la maintenance portuaire.
- **Gare maritime** : est une infrastructure portuaire qui permet l'embarquement et débarquement des passagers et des marchandises pour les navires de transport maritime.
- **Lamanage** : il consiste à amarrer ou désamarrer le navire de son poste d'accostage.
- **Législation** : se réfère à l'ensemble des lois, règlements et autres dispositions juridiques qui régissent une société ou un état.
- **Manutention** : c'est les opérations d'embarquement, d'arrimage, de désarrimage et de débarquement de marchandises.
- **Marnage** : différence de niveau entre la basse mer et la pleine mer.
- **Mouillage** : opération consistant à jeter l'ancre en laissant filer la chaîne de façon à faire crocher l'ancre.
- **Mouvement** : fait référence à l'action de changé de position d'un navire vers un autre poste à quai ou bien la rade.

- **Pier to Pier** : mode de cotisation de fret. Transport assuré de quai à quai.
- **Rade** : plan d'eau ayant un accès à la mer et pouvant servir de mouillage.
- **Remorquage** : société fournissant au navire des remorqueurs pour lui permettre d'assurer des manœuvres dans les accès au port.
- **Sas** : partie de l'écluse située entre les portes amont et aval dans laquelle stationne le navire pendant le chargement de niveau.
- **Tirant d'eau** : distance verticale entre la ligne de flottaison et la quille ou enfoncement du navire.
- **Transbordement** : chargement d'une marchandise, d'un moyen de transport à un autre moyen de transport sans mise à terre.
- **Transitaire** : est un auxiliaire très important du commerce extérieur. Il intervient dans la chaîne de transport, soit comme mandataire, soit comme commissionnaire de transport.
- **Tribord** : côté droit du navire considéré dans le sens de sa marche normale.
- **U.P** : unité de taxation de fret, soit à la tonne, soit au mètre cube, à l'avantage du navire.

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le transport maritime est essentiel pour l'économie mondiale en permettant la livraison des marchandises d'un pays à un autre en quantité importante à moindre coût, c'est pour cela il continue à se développer au cours du temps. Ils peuvent être des centres économiques en attirant des activités économiques comme la construction navales, les réparations navales, la transformation des produits de mer, la logistique et d'autres services connexes qui crée des emplois et stimule le développement économiques dans la région.

Le mot " port " est d'origine Latin, il vient du mot " portus ", qui désigne une entrée ou un passage à travers une frontière entre la mer et la terre. Le mot " porta " est lié à " portus " qui conduit au développement du verbe " portage " qui signifie " faire passer quelque chose ". On peut trouver ce verbe sous plusieurs formes préfixées tell que transport, importation et exportation.

Les ports ont évolués au file de l'histoire en fonction des besoins du commerce maritime et technologiques disponibles. L'ancien port a été découvert en Egypte et en Mésopotamie durant l'antiquité, durant cette période les ports étaient des structures rudimentaires avec des quais en bois ou en pierre pour permettre aux navires de s'amarrer et de décharger leurs cargaisons. Les ports médiévaux étaient des villes fortifiées avec des quais en pierres et des entrepôts pour stocker les marchandises, ils ont commencé a se développer en Europe, en Asie ainsi d'autre régions dans le monde. C'est à partir de la renaissance que les ports ont commencé à se moderniser avec des installations portuaires plus sophistiquées afin de mieux gérer le commerce maritime telle que : les grues, les quais renforcés des murs en béton. Au XXème siècle, les ports ont connus une évolution majeur grâce à l'introduction de la technologie moderne qui permet l'optimisation des capacités de stockage et de traitement de cargaisons. Les ports continuent d'évoluer pour répondre aux besoins du commerce maritime en étant plus efficace, plus sûrs et plus durables grâce à l'équipement technologique avancé telles que l'internet des objets, l'analyse des données et l'intelligence artificielle. Les progrès technologiques, les changements dans les flux de commerce mondial et la préoccupation environnementale continue à façonner l'évolution des ports.

Les ports les plus performants sont caractérisés par des infrastructures modernes, des équipements de pointe et une utilisation judicieuse des ressources naturelles. La performance des ports aide à comprendre l'impact des ports sur le commerce international et la croissance économique. En analysant les tendances et les défis auxquels les ports sont confrontés dans divers recoins du monde, il est possible d'identifier les facteurs clés qui influencent leur performance et de mettre en place des stratégies pour améliorer leur efficacité et leur durabilité.

L'Algérie est connue par son large littoral de 1200 km qui contient 11 ports commerciaux. Trois de ses ports sont spécialisés dans l'exportation d'hydrocarbures, tandis que les autres ports ne sont pas beaucoup développés depuis l'indépendance du pays. Le port d'Alger, Oran et Annaba sont les plus grands ports commerciaux d'Algérie, traitant 33% du commerce international du pays. La croissance des marchandises importées a été rapide en raison de l'ouverture du marché Algérien et de la reprise financière du pays depuis le début des années 2000, alors que les exportations n'ont représenté que 14% du trafic national. Le gouvernement Algérien investit dans le secteur des transports pour moderniser les ports d'Alger est géré par DPWORLD et dispose d'un terminal à conteneurs qui s'étend sur 30,3 hectares et dispose d'une capacité de stockage de 120 000 tonnes. Le port d'Oran dispose de 24 postes d'amarrage, il est situé à proximité des principales voies maritimes reliant le nord-ouest de l'Europe au canal de Suez.

Le port de Bejaia est l'un des ports actifs d'Algérie. Il a une riche histoire de commerce qui remonte de l'Antiquité avec les phéniciens, les romains et il s'est développé plus tard avec les ports tels que Marseille et Gênes sous les Hammadites. Ses infrastructures ont été développées par les Français entre le 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècle. Aujourd'hui le port de Bejaia est un important pôle de transport de la région, avec des liaisons routières et ferroviaires et un port international. Il est géré par la société publique Algérienne EPB, situé sur la côte méditerranéenne de l'Algérie, elle joue un rôle clé dans le secteur du transport maritime et impliquée dans la manutention des marchandises, l'accueil des navires, la gestion des terminaux, le stockage des marchandises, ainsi que d'autres services connexes tels que les formalités douanières et les services logistiques.

En vu de la place importante occupée par le port dans le commerce et le développement économique, notre démarche vise à faire une analyse sur le système de gestion des navires au niveau du port de Bejaia qui va nous permettre d'explorer les différents aspects du système actuel et mettre l'accent sur les mesures qui pourraient être prises afin d'améliorer le temps d'accostage et réduire les retards en rade et de répondre à la question suivante :

***” Quelle sont les mesures qui peuvent être mise en place pour optimiser le temps d'accostage et réduire les retards en rade au niveau de l'EPB, et quelles seraient les conséquences économiques et stratégiques d'une telle optimisation ? ”.***

Mais avant de répondre à cette problématique, on doit tout d'abord expliquer quelques points essentiels telles que :

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

- Comment les navires sont affectés aux postes à quai ?
- Quel est le taux d'occupation de chaque poste à quai ?
- Comment mesurer la durée d'attente, de service et de séjour pour chaque type de navires ?

Le présent mémoire se présente en quatre chapitres, en commençant par une introduction générale. Le premier chapitre porte sur des généralités de la gestion portuaire à travers le monde. Le deuxième chapitre présente des notions de base sur les systèmes de file d'attente. Le troisième chapitre est consacré à la présentation de l'entreprise portuaire de Bejaïa et du problème. Le dernier chapitre est réservé pour la présentation du cas pratique qui consiste à évaluer les performances du port de Béjaia en utilisant la théorie des files d'attente. Le mémoire s'achèvera par une conclusion générale où des propositions et des suggestions d'amélioration de la gestion portuaire seront abordées.

---

---

# CHAPITRE 1

---

## GÉNÉRALITÉS SUR LES PORTS

### Introduction

Les ports jouent un rôle majeur dans le développement économique en permettant aux économies nationales et régionales de se connecter aux marchés internationaux et de stimuler la croissance économique, et en facilitant le commerce international à travers les différents navires. Ce chapitre comme son titre l'indique " *Généralités sur les ports* " permet de mieux comprendre les différentes notions liées aux ports et aux navires à l'échelle mondiale.

### 1.1 Section 01 : Notions de base sur la gestion portuaire à l'échelle mondiale

#### 1.1.1 Définitions

Le port est considéré comme un lieu de transaction où différentes cultures se rencontrent et effectuent leurs échanges.

Le port, lieu de début ou d'achèvement des trajets maritimes, d'entreposage et de transbordement de marchandises, sert de plaque tournante au trafic import/export en double direction : vers l'intérieur des pays et vers la mer. Ils occupent une place prépondérante dans l'économie nationale. [TIGHILT. F ( 2021)].

Littérairement, le port signifie " un abri naturel ou artificiel pour les bâtiments de navigation, muni des installations nécessaires à l'embarquement et au débarquement du fret et des passagers ".

Selon la société des histoires Médiéviste de l'enseignement public " le terme port renvoie en effet, à celui de port. En ce sens, l'infrastructure portuaire est un passage

entre la terre et la mer, une entrée et une issue permettant la circulation des hommes, des marchandises et des matériels. Elle assure la commutation entre différents modes de transport maritime, fluvial et terrestre ”.

**Selon le code maritime algérien article 888 :** ” le port est un point du rivage de la mer, aménagé et équipé pour recevoir, abriter des navires et assurer toutes les opérations de commerce maritime, de pêche et de la plaisance ”.

Les ports sont équipés des postes à quais autrement dit postes d’amarrage qu’on peut définir comme un lieu où le navire doit charger ou décharger les différentes cargaisons ou de personnes.

### 1.1.2 Types de ports

On distingue plusieurs types de port qu’on peut classés selon leurs activités, l’utilisation, natures, et leurs propriétés :

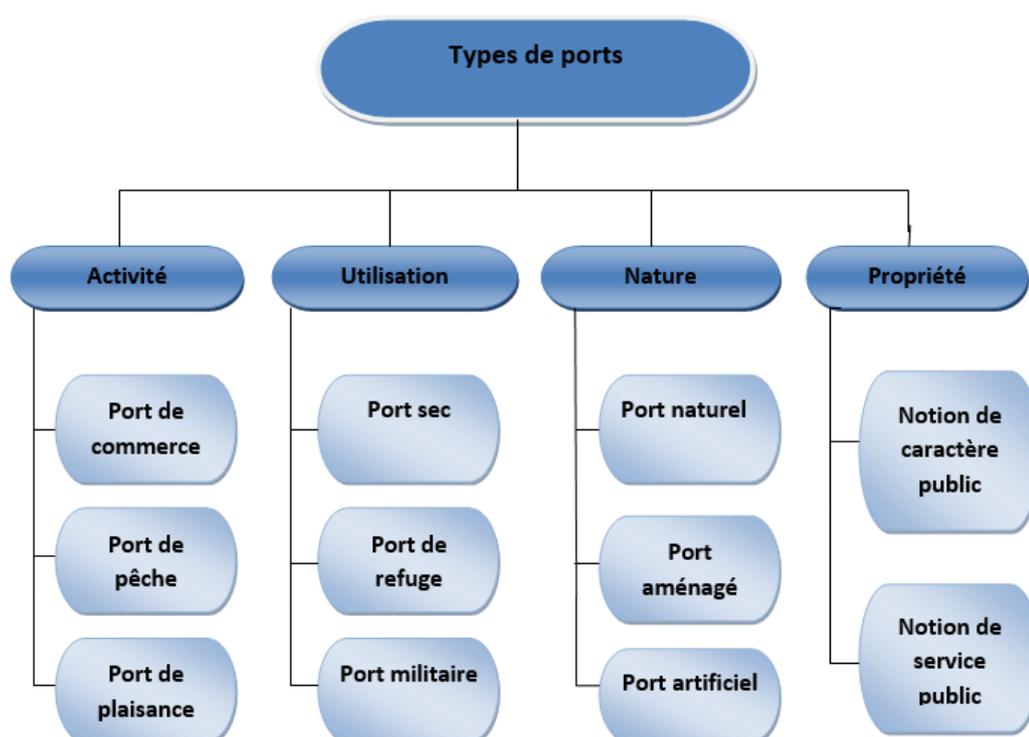


FIGURE 1.1 – Les différents types de ports

#### 1.1.2.1 Classification selon leurs activités

- ✓ **Port de commerce** : sont des ports spécialisés dans les opérations d’embarquement et de débarquement de marchandises et de personnes à travers différents types

de navires (cargo, ferries...), ainsi que toutes les opérations liées à la navigation maritime.

- ✓ **Port de pêche** : sont des ports caractérisés par des dimensions les plus réduites ; qui servent à accueillir les bateaux de pêche telle que les chalutiers, ... etc.
- ✓ **Port de plaisance** : sont des ports aménagés pour la pratique des activités de loisir, ils sont réservés aux navires de petite taille à voile et à moteur.

#### 1.1.2.2 Classification selon leur utilisation

- ✓ **Port sec** : autrement appelé "port avancé", "port intérieur", ou "plateforme logistique multimodal", est un outil stratégique dans la chaîne logistique qui permet l'amélioration de la performance portuaire.
- ✓ **Port de refuge** : les ports de refuge servent à fournir un abri temporaire aux navires en détresse, à cause du mauvais temps ou bien aux incidents de navigation imprévisibles.
- ✓ **Port militaire** : il est aménagé des mêmes infrastructures que les ports de commerce et dispose en plus des équipements de stockage et de logistique de munition.

#### 1.1.2.3 Classification selon leur nature

- ✓ **Port naturel** : contrairement aux autres ports, les ports naturels bénéficient d'un abri naturel, on prend l'exemple du port de NEW YORK l'un des plus beaux abris naturels.
- ✓ **Port aménagé** : est un port sans abri naturel, qui nécessite la construction d'un abri. Par exemple à VENIS, des jetées ont servis à construire un canal d'entrée vers le bassin. Le port de LOS ANGELES est disposé d'un brise-lames qui s'étend du rivage à l'océan pour protéger l'entrée du port intérieur.
- ✓ **Port artificiel** : est construit sur une côte sans abri naturel, en délimitant des plans d'eau avec digues pour former des baies artificielles, on cite le port de CHERBOUG ou DUNKERQUE aussi le port de BUFFELO, celui de MARSEILLE, Port-Saïd, CASABLANCA, NAPLES et TRIESTE.

#### 1.1.2.4 Classification selon leur propriété

- ✓ **Notion de caractère public** : les ports admettent certaines caractéristiques économiques en constituent un service public, en tant que bien collectif et en tant qu'espace accessible au public.
- ✓ **Notion de service public** : est une activité contrôlée par des pouvoirs publics, soumis à un régime juridique et exercée directement par l'administration. L'organisation de l'activité portuaire dans un État passe par la répartition des responsabilités entre le secteur public et secteur privé.

### 1.1.3 Le rôle des ports

Les ports représentent l'un des principaux outils industriels et commerciaux pour le développement économique et social du pays, car ils jouent un rôle primordial dans

l'économie nationale et dans le commerce extérieur du pays, dont la quasi-totalité emprunte la voie maritime.

Le port joue un rôle crucial dans l'économie et le commerce international en offrant une interface entre le transport maritime et terrestre pour les navires effectuant des opérations commerciales. En tant que pôle de croissance, le port peut créer des emplois, offrant des débouchés pour les demandeurs d'emploi. Sa mission est de faciliter le transbordement des marchandises et des personnes en toute sécurité, rapidité et efficacité, tout en minimisant les conséquences de la rupture de charge.

De nos jours, l'activité portuaire est considérée comme une priorité dans les programmes de développement, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. Les ports ont une fonction de plus en plus spécifique dans l'économie, qu'il s'agisse de la croissance économique nationale ou des échanges avec d'autres pays. Les ports jouent un rôle crucial dans le commerce international, ce qui renforce leur importance et leur impact dans la politique de développement national.

Le port peut s'apprécier suivant les trois rôles suivants : [BOUZAHER.A (2016)]

**✘ Le port comme facteur de développement du commerce extérieur :**

Un port en bon état de fonctionnement est essentiel pour garantir les importations du pays dans des conditions optimales, ce qui réduit le coût des biens de consommation. De plus, il permet aux exportations d'être plus compétitives sur les marchés internationaux, favorisant ainsi la production de devises grâce à l'augmentation des quantités exportées et des marges bénéficiaires sur les prix de vente.

**✘ Le port comme pôle de développement dans l'aménagement du territoire :**

Chaque entreprise ou activité a un point optimal de délocalisation qui minimise les coûts de production et de transport pour le marché de consommation. Dans ce contexte, la construction ou l'amélioration d'un port dans certaines régions peut être considérée comme un élément clé de l'aménagement du territoire, car elle réduit les coûts de transport et raccourcit les distances de déplacement. C'est pourquoi les ports sont souvent considérés comme des moyens essentiels pour réduire les coûts de production et améliorer la compétitivité sur les marchés internationaux. En somme, les ports jouent un rôle crucial dans le développement économique et la croissance nationale.

**✘ Le port comme élément du développement pour l'industrialisation :**

Au fil du temps, les ports ont évolué d'un simple lieu de transit vers un rôle plus crucial dans les activités industrielles, tels que les ports pour minéraliers. Cela se remarque particulièrement en Afrique occidentale où les pôles industriels sont souvent

localisés près des zones portuaires.

#### 1.1.4 Gestion des ports

Plusieurs organisations à l'échelle mondiale sont impliquées dans la gestion des ports, telle que :

- L'organisation maritime mondiale (OMI) qui est chargée de la réglementation du transport maritime international ;
- L'association internationale des ports (APH) qui représente les intérêts des ports à travers le monde ;
- Les organisations régionales comme l'association des ports de la mer Baltique et de la mer du Nord (BSAP) et l'association des ports de la Méditerranée (MED Ports) qui travaillent à la promotion de la coopération entre les ports de la région et à l'amélioration de leur efficacité et de leur sécurité.

La gestion portuaire assure une utilisation efficace et durable des ressources portuaires, facilite le commerce international et encourage la croissance économique des régions portuaires. Donc elle représente l'ensemble des activités liées à l'administration, elle inclue :

- ✓ **La gestion financière** : Elle couvre toutes les activités liées à la gestion des ressources financières du port, ce qui inclut la planification budgétaire, la tenue des comptes, la gestion des revenus et des dépenses, ainsi que la recherche de financements pour les projets d'investissement portuaires.
- ✓ **Gestion de l'exploitation portuaire** : Cela concerne la coordination et la supervision des opérations quotidiennes du port, telles que l'accostage et le départ des navires, le chargement et le déchargement des marchandises, la gestion des entrepôts et des terminaux, ainsi que la planification des infrastructures portuaires.
- ✓ **Gestion de la sécurité** : Consiste à garantir la protection des individus, des navires et des marchandises au sein du port. Cela implique la mise en place de mesures de sécurité adéquates, le respect des réglementations internationales et la coordination avec les autorités compétentes en matière de sécurité maritime.
- ✓ **Gestion des ressources humaines et des relations avec les parties prenantes** : Comprend la gestion du personnel du port, ce qui inclut le recrutement, la formation et le développement des compétences. Elle englobe également la gestion des relations avec les syndicats, les fournisseurs, les clients et les autres parties prenantes impliquées dans les activités portuaires.
- ✓ **La planification stratégique (à long terme)** : Implique d'établir la vision, les objectifs et les stratégies à long terme du port, en prenant en considération les évolutions du commerce maritime, les besoins changeants des clients et les enjeux environnementaux. Elle comprend également la planification du développement des infrastructures portuaires et la capacité d'anticiper les besoins futurs.

- ✓ **L'élaboration des politiques et des règlements** : Cela concerne la mise en place de politiques et de réglementations pour guider les activités portuaires, en accord avec les exigences nationales et internationales. Cela peut inclure des règles sur les tarifs portuaires, les normes environnementales, la concurrence, la sécurité maritime, etc.

Le mode de gestion d'un port dépend de la législation, des politiques gouvernementales, des besoins locaux et des contraintes économiques et sociales de chaque pays. Les principaux modes de gestion portuaire sont :

1. **Gestion publique** : Se caractérise par la prise en charge de leur gestion par l'État ou des autorités portuaires publiques. Dans ce mode de gestion, le financement des ports provient du gouvernement, et celui-ci assume la responsabilité de la supervision et de la gestion de leurs activités.
2. **Gestion privée** : Les ports sont détenus et gérés par des entreprises privées dans ce mode de gestion. Ces entreprises sont chargées de toutes les activités portuaires, et elles peuvent être financées par des investisseurs privés ou par les revenus générés par les opérations portuaires.
3. **Gestion mixte** : Implique une collaboration entre entités publiques et privées pour assurer le développement et la gestion des installations portuaires. Les responsabilités sont partagées entre les acteurs publics et privés, qui travaillent en partenariat pour assurer le bon fonctionnement du port.
4. **Gestion déléguée** : Les opérations portuaires sont déléguées à des entreprises spécialisées dans la gestion portuaire, appelées opérateurs de terminaux ou concessionnaires. Ils obtiennent des contrats à long terme pour exploiter et gérer une partie ou la totalité des activités portuaires, tandis que l'autorité portuaire conserve généralement la propriété des infrastructures.
5. **Gestion coopérative** : Dans ce mode de gestion coopérative, divers acteurs du secteur portuaire, tels que les autorités portuaires, les opérateurs de terminaux, les compagnies maritimes et les transporteurs, travaillent en étroite collaboration dans la gestion et le développement du port. L'objectif est de favoriser la coordination, l'échange d'informations et la recherche de synergies afin d'améliorer l'efficacité et la compétitivité du port.
6. **Concession** : Dans ce mode de gestion, les autorités portuaires assurent la réglementation et la supervision de l'activité portuaire, tandis que les investissements, la maintenance et la modernisation des installations portuaires sont gérés par des concessionnaires. Les concessionnaires obtiennent des droits exclusifs pour exploiter et gérer le port pendant une période déterminée.

L'objectif global de la gestion portuaire est d'assurer une utilisation efficace et durable des ressources portuaires, de faciliter le commerce international et de favoriser la croissance économique des régions portuaires. Les organisations internationales et régionales, telles que l'OMI et l'APH, jouent un rôle important en établissant des normes et des

meilleures pratiques pour la gestion des ports à l'échelle mondiale et régionale.

Les défis actuels de la gestion portuaires incluent la nécessité de s'adapter aux changements climatiques, de réduire les émissions de gaz à effet de serre, d'augmenter la sécurité des opérations portuaires et de promouvoir l'innovation technologique pour améliorer l'efficacité et la compétitivité des ports.

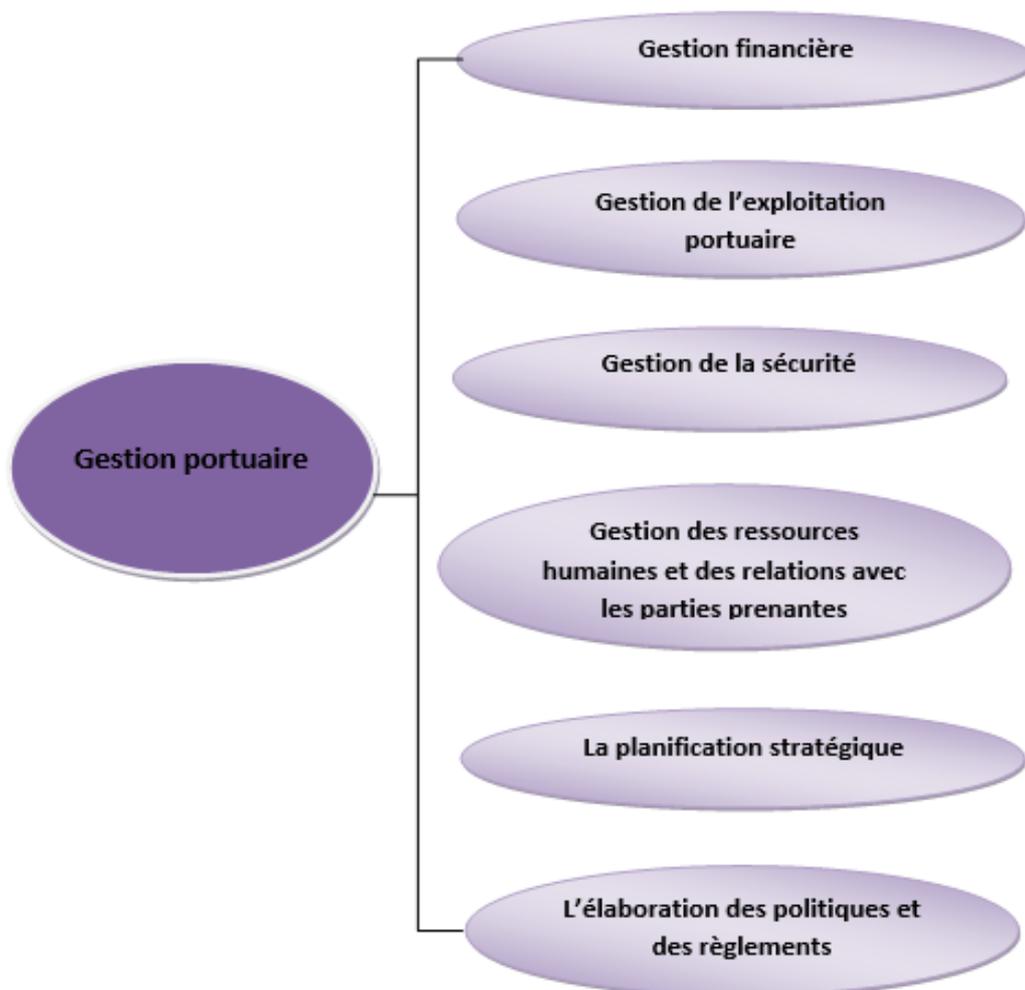


FIGURE 1.2 – Les composantes de la gestion portuaire

## 1.2 Section 02 : La diversité des navires à travers le monde

### 1.2.1 Définition d'un navire

” Tout bâtiment de mer ou engin flottant effectuant une navigation maritime, soit par son propre moyen, soit par remorque d'un autre navire, ou effectué à une telle navigation ” [CMA98, l'art.13, page 8].

Un navire est un moyen de transport qui peut être utilisé pour se déplacer sur l'eau, généralement pour transporter des personnes ou des marchandises d'un endroit à un autre. Les navires peuvent varier en taille et en forme, allant des petits bateaux de pêche aux grands porte-conteneurs ou navires de croisière. Aussi peuvent être propulsées par la force du vent, des moteurs, ou une combinaison des deux. [TIGHILT.F, 2021)]

### 1.2.2 Les types de navire

Il existe de nombreux types de navire, chacun ayant des caractéristiques et des fonctions spécifiques en fonctions de leur conception et de leur utilisation.

Le système de transport maritime est constitué de deux grands groupes de navires : des navires à passagers et des navires en charge. [TIGHILT.F, 2021)]

#### 1.2.2.1 Navires passagers

Les navires passagers sont des bateaux conçus pour transporter des passagers d'un point à un autre. Ils peuvent être utilisés pour des voyages de courte ou de longue distance. Les navires passagers sont constitués de :

1. **Ferries** : on appelle ferry aussi bien une vedette transportant 200 passagers, qu'un navire transportant 2000 passagers.



2. **Paquebots de croisières** : nombreux et luxueux, transportent des milliers de passagers, autour du monde. En général grands navires, mais ils existent aussi de petites unités de luxe, même à voile.



3. **Paquebots de ligne** : rares sinon inexistants. Remplacés par l'avion, faisaient autrefois des lignes régulières avec escales à dates fixes.



#### 1.2.2.2 Navires de charge

Ce sont des navires qui transportent des marchandises en vrac ou en conteneurs, tels que les vraquiers, les cargos, les chimiquiers ...etc. Il existe trois types de navires en charge :

**I. Les navires de charge sèche** : Ces navires transportent des marchandises solides en utilisant : caisses, conteneurs... , à travers les navires suivants :

1. **Conventionnel** : C'est un navire polyvalent équipé de grues qui facilite le chargement et déchargement de marchandises lourdes ou volumineuses. Ils sont souvent choisis pour le transport de cargaisons mixtes qui ne nécessitent pas de navires spécialisés.



2. **Rouliers Ro-Ro** : Permet aux véhicules motorisés (voitures ; camions ...) de rouler sur et en dehors du navire en utilisant des rampes spéciales.



3. **Porte-conteneurs** : Ce type de navire transporte des conteneurs standardisés sur des routes commerciales maritimes, il est devenu l'un des moyens les plus courants du transport de marchandises dans le monde.



4. **Vraquier** : Un navire vraquier est un type de navire de transport maritime conçue pour transporter des marchandises en vrac, ils sont plus de 8000 et transportent d'énormes quantités de cargaisons : charbon, grains . . . .



Les vraciers totalisent 40% de la flotte mondiale, ils peuvent être de différents tailles et formes. On cite cinq types principaux de vraciers qui sont :

- ✓ Cape-sizes ;
- ✓ Post-panamax ;
- ✓ Panamax ;
- ✓ Handy max, supra max ;
- ✓ Handy size.

**II. Les navires citernes** : Sont des navires utilisés pour transporter des liquides ou des gaz en vrac, tel que le pétrole, les produits chimiques et le gaz naturel liquéfié . . .  
Les navires citernes sont :

1. **Pétrolier** : Ce type de navire destiné où transporte de cargaisons de pétrole brut et de produit pétrolier raffinés tel que l'essence . . . , sont généralement transportés dans des réservoirs de grande taille situés dans les cales du navire.



2. **Chimiquier** : Il permet de transporter des produits chimiques liquides en vrac, tels que des acides, des solvants, des huiles. . ., sont conçus pour répondre aux exigences spécifiques de chaque type de cargaison.



3. **Gazier** : Il transporte des gaz à pression normale mais réfrigérés : butane, méthane, gaz naturel liquéfié (GNL) et gaz pétrole liquéfié (GPL).



**Remarque :**

Les navires citernes sont également surveillés de près par les autorités maritimes pour s'assurer qu'ils respectent les normes de sécurité et les réglementations en matière de pollution.

- III. Les navires frigorifiques** : Un navire frigorifique transporte des produits périssables, tels que des denrées alimentaires ou des produits pharmaceutiques, à des températures contrôlées, aussi utilisés pour le transport de fruits, de viandes ou d'autres produits similaires à travers le monde.



**Remarque :** Il existe aussi un autre type de navire dédié à fournir des services soit pour d'autres navires, soit à une activité humaine quelconque, comme :

- ✓ **Câbliers** : Posent et entretiennent des câbles de télécommunication au fond des océans dans le monde.
- ✓ **Offshore** : Sont utilisés pour des opérations de forage, de production, de transport et de maintenance dans des eaux profondes et éloignées de côtes.
- ✓ **Remorqueurs** : Sont souvent utilisés dans les ports et les terminaux maritimes pour aider les navires à s'ancrer, à accoster ou à quitter les quais.
- ✓ **Recherche** : Ce sont des navires utilisés pour la recherche scientifique en mer.
- ✓ **Dragage** : Sont équipés de systèmes de pompage, de dragage pour extraire les sédiments et les transporter à l'endroit où ils seront déchargés.

## Conclusion

En conclusion, il convient de noter qu'il existe une grande variété de navires en fonction de leur utilisation spécifique, tels que les navires de pêche, les navires de croisière, les navires de transport de marchandises spéciales, et bien d'autres encore. Chaque type de navire est conçu pour répondre à des besoins particuliers et jouer un rôle spécifique dans le commerce international.

En somme, les ports et les navires sont non seulement des acteurs majeurs du commerce international, mais également des secteurs soucieux de leur durabilité et de leur sécurité grâce à la mise en place de réglementations rigoureuses qui garantissent le respect des normes internationales et la préservation de l'environnement marin.

---

---

# CHAPITRE 2

---

## THÉORIE DES FILES D'ATTENTE

### Introduction

La théorie des files d'attente est une méthode de la recherche opérationnelle qui permet de modéliser les systèmes où les clients doivent attendre pour recevoir un service, de calculer les performances de ces systèmes et d'analyser leurs caractéristiques pour aider les gestionnaires à prendre des décisions éclairées. Les files d'attente sont un phénomène courant dans la vie moderne et peuvent être trouvées dans de nombreux domaines d'activité.

L'analyse mathématique des phénomènes d'attente utilise des processus stochastiques pour étudier le comportement aléatoire des "stations" où les clients attendent pour recevoir un service dont la durée est souvent imprévisible. Dans ce chapitre, nous allons évoquer les notions de base de files d'attente, les différents modèles existants ainsi que les réseaux de files d'attente.

### 2.1 Section 01 : Processus aléatoires et files d'attente

#### 2.1.1 Processus aléatoires

Un processus stochastique  $\{X(t), t \in T\}$  est une collection de variables aléatoires indexées par un paramètre  $t$  et définies sur un même espace de probabilités  $(\Omega; \mathbb{E}; p)$ , où  $X(t)$  représente l'état du processus au temps  $t$ . L'ensemble de toutes les valeurs possibles pour cette variable est appelé l'espace des états du processus noté par  $\mathbb{E}$ .

##### 2.1.1.1 Processus de Comptage

Désignons par  $N(t)$  le nombre d'évènements se produisant dans l'intervalle de temps  $[0, t]$ , en supposant que  $N(0) = 0$ . On cherche à déterminer la distribution de cette variable aléatoire discrète  $N(t)$ .

Soit  $(S_n)_{n \geq 1}$  l'instant d'occurrence du  $n^{\text{ème}}$  évènement, le processus stochastique  $\{N(t), t \geq 0\}$  est appelé processus de comptage à temps continu associé à  $(S_n)_{n \geq 1}$  si ses réalisations

sont des fonctions en escalier non décroissantes.

Tout processus de comptage vérifie les propriétés suivantes :

- ✓ Pour tout  $t \geq 0$ , le nombre  $N(t)$  est à valeurs entières positives.
- ✓  $N(s+t) - N(s)$  représente le nombre d'évènements qui se produisent dans l'intervalle semi-ouvert  $]s, s + t]$ .

### 2.1.1.2 Processus de Poisson

**Définition 2.1.1.** On dit qu'un processus de comptage  $\{N(t); t \geq 0\}$  est un processus de Poisson s'il satisfait les trois conditions suivantes :

1. Le processus  $N(t)$  est homogène dans le temps : c'est-à-dire que le nombre d'évènements se produisant dans un intervalle de temps de longueur  $t$  ne dépend que de  $t$ . Autrement dit :

$$P(N(s+t) - N(s) = k) = P(N(t) = k) = p_k(t).$$

2. Le processus  $N(t)$  est à accroissements indépendants : c'est-à-dire que le nombre d'évènements se produisant dans des intervalles de temps disjoints sont indépendants.

$$P(N(s+t) - N(s) = k, N(s) = j) = P(N(s+t) - N(s) = k)P(N(s) = j) = p_k(t)p_j(s).$$

3. La probabilité que deux évènements ou plus se produisant dans un petit intervalle ( $\Delta t$ ) est négligeable par rapport à la probabilité qu'il n'y ait qu'un seul évènement. Autrement dit :

$$p_k(\Delta t) = \begin{cases} o(\Delta t), & k \geq 2; \\ \lambda \Delta t + o(\Delta t), & k = 1; \\ 1 - \lambda \Delta t + o(\Delta t), & k = 0. \end{cases}$$

Le coefficient  $\lambda$  est appelé Taux (intensité) du processus de Poisson.

Si un processus de comptage  $N(t)$  satisfait aux trois conditions précédentes alors sa distribution de probabilité est donnée par :

$$P(N(t) = k) = p_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}.$$

La moyenne et la variance d'un tel processus sont données par :

$$E[N(t)] = Var[N(t)] = \lambda t.$$

### 2.1.1.3 Processus stationnaire

Un processus stochastique est dit stationnaire lorsque la distribution de probabilité des variables aléatoires reste approximativement constante sur une certaine période de temps. En d'autres termes, bien que la série de nombres reste limitée dans une certaine plage de valeurs.

Cette propriété permet de créer des modèles pour prédire les variables. Les rendements quotidiens des actifs financiers sont un exemple de processus stochastique stationnaire.

D'une part un processus stochastique  $(X_t)_{(t \in T)}$  est considéré fortement stationnaire si les lois fini-dimensionnelles sont invariantes par translation c'est-à-dire :

$$\forall h > 0, \forall t_1, \dots, t_n \in T, n \in \mathbb{N}^*.$$

Le vecteur  $(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n})$  a la même loi que le vecteur  $(X_{t_1+h}, X_{t_2+h}, \dots, X_{t_n+h})$ .

D'autre part un processus stochastique  $((X_t)_{(t \in T)})$  est faiblement stationnaire si :

- (i)  $E(X_t) = m_t = m < +\infty$  ;
- (ii)  $E(X_t^2) = \sigma_t^2 = \sigma^2 < +\infty$  ;
- (iii)  $Cov(X_t, X_s) = E[(X_t - m)(X_s - m)] = \Gamma(t - s)$ .

#### 2.1.1.4 Processus de Poisson et la loi exponentielle

Une variable aléatoire  $Y$  à valeurs dans  $\mathbb{R}_+$  suit la loi exponentielle de paramètre  $\mu > 0$ , si sa fonction de répartition et sa fonction de densité sont données par :

$$F(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad \text{et} \quad f(t) = \mu e^{-\mu t}.$$

La moyenne et la variance d'une telle variable aléatoire  $Y$  sont données par :

$$E(Y) = \frac{1}{\mu} \quad \text{et} \quad Var(Y) = \frac{1}{\mu^2}.$$

Notons que la loi exponentielle est caractérisée par la propriété d'absence de mémoire que l'on exprime formellement par :

$$\forall s, t \geq 0; P(Y > t + s | Y > s) = P(Y > t).$$

On dit que la loi exponentielle est sans mémoire : si un évènement ne s'est pas produit entre 0 et  $t$ , la probabilité qu'il se produise entre  $t$  et  $t + s$  est la même que la probabilité pour qu'il se produise entre 0 et  $s$ , i.e. l'instant de départ n'a pas d'influence.

Soit  $\{N(t), t \geq 0\}$  un processus de Poisson de paramètre  $\lambda$ , et  $T_n$  la durée séparant le  $(n - 1)^{\text{ème}}$  et le  $n^{\text{ème}}$  évènement. Alors on a les deux résultats suivants :

- Les temps d'attente  $T_n$  d'un processus de Poisson de paramètre  $\lambda$  sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées selon une loi exponentielle de paramètre  $\lambda$ .
- Un processus de comptage  $\{N(t), t \geq 0\}$  est un processus de Poisson de paramètre  $\lambda$  si les intervalles de temps entre deux évènements consécutifs sont des variables aléatoires indépendantes obéissant à la même loi exponentielle de paramètre  $\lambda$ .

## 2.1.2 File d'attente

### 2.1.2.1 Identification des systèmes d'attente

Un système de file d'attente typique comprend une file d'attente ainsi qu'un ou plusieurs serveurs. Les clients viennent de l'extérieur et peuvent devoir attendre dans la file d'attente avant de recevoir leur service. Une fois le service terminé, les clients quittent le système.

Pour identifier un système d'attente on devra tout d'abord déterminer :



FIGURE 2.1 – Système de files d'attente

- La nature stochastique du processus des arrivées défini par la distribution des intervalles séparant deux arrivées consécutives ;
- La distribution du temps aléatoire de service ;
- Le nombre "m" de stations de service qui sont montrés en parallèle ;
- La capacité "N" du système. Si  $N < \infty$  (la file d'attente ne peut dépasser une longueur de  $N - m$  unités). Dans ce cas, certains clients qui arrivant vers le système n'ont pas la possibilité d'y entrer.

### 2.1.2.2 La notation de Kendall

La notation suivante, introduite par Kendall, permet de ramener la description des différents éléments constituant une file d'attente simple à un modèle de manière compacte. Un système d'attente est décrit par :

$$\mathbf{A/B/m/K/N/S}$$

Où :

- **A** : La distribution des arrivées ;
- **B** : La distribution du temps de service ;
- **m** : Le nombre de serveurs ;
- **K** : Le nombre maximal des clients dans le système (file + service) ;
- **N** : Taille de la population des clients ;
- **S** : La discipline de service (FIFO, LIFO, RAND, ROUND ROBIN, ...).

Les valeurs les plus usuelles de A et B sont comme suit :

- **M** (Markov) : Loi exponentielle ;
- **D** (Déterministe) : Temps constant ;
- **E** (Erlang) : Loi d'Erlang (somme de lois exponentielles) ;
- **G** (Générale) : Loi arbitraire.

Lorsque K et N ne sont pas précisés, ils sont supposés infinies et S = FIFO.

### 2.1.2.3 Tests d'ajustement

**2.1.2.3.1 Test de KHI-DEUX** Soit X une variable aléatoire de loi L (le plus souvent inconnue). On souhaite tester l'ajustement de cette loi à une loi connue  $L_0$  (Poisson, Exponentielle, normale, etc) retenue comme étant un modèle convenable.

$$C_i = n \times p(X \in Classe_i / X \rightarrow L_0).$$

Classe	1	2	...	$i$	...	$k$
Effectifs observés	$O_1$	$O_2$	...	$O_i$	...	$O_k$
Effectifs théoriques	$C_1$	$C_2$	...	$C_i$	...	$C_k$

On calcule la valeur de la statistique de KHI-DEUX :

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - C_i)^2}{C_i}.$$

On compare ensuite cette valeur avec la valeur théorique  $\chi_\alpha^2$  lue dans la table de KHI-DEUX à  $v = k - 1 - r$  degrés de liberté où  $r$  est le nombre de paramètres de la loi  $L_0$  qu'il a fallu estimer. (Annexe 03) (Exemples :  $r = 0$  si la loi est connue ou imposée,  $r = 1$  pour une loi de Poisson,  $r = 2$  pour une loi normale sans autre précision).

**2.1.2.3.2 Test de Kolmogorov-Smirnov** Le test de Kolmogorov est "non-paramétrique" : il ne place aucune contrainte sur la distribution de référence, et ne demande pas qu'elle soit connue sous forme analytique (bien que ce soit pourtant le cas le plus courant).

Étant donnés :

1. Un échantillon de taille  $n$  d'observations d'une variable ;
2. Une fonction de répartition de référence  $F(x)$ .

Le test de Kolmogorov-Smirnov teste l'hypothèse  $H_0$  selon laquelle l'échantillon a été prélevé dans une population de fonction de répartition  $F(x)$ . Pour cela, il calcule sur l'échantillon une quantité  $D$ , appelée "statistique de Kolmogorov", dont la distribution est connue lorsque  $H_0$  est vraie. La statistique de Kolmogorov-Smirnov  $D_n$  est définie par :

$$D_n = \sup_{x \in \mathbb{R}} |F_n(x) - F(x)|.$$

Où  $F_n(x)$  est la proportion des observations dont la valeur est inférieure ou égale à  $x$  (fonction de répartition empirique).

Une valeur élevée de  $D$  est une indication que la distribution de l'échantillon s'éloigne sensiblement de la distribution de référence  $F(x)$ , et qu'il est donc peu probable que  $H_0$  soit correcte.

**Procédure :**

1. Classer les valeurs observées par ordre croissant ;
2. Calculer les nombres  $\frac{i}{n}$ , c'est-à-dire les valeurs supérieures de la distribution empirique ;
3. Calculer les valeurs absolues des écarts  $|F(x_i) - \frac{i}{n}|$  entre  $F$  et les valeurs précédentes ;
4. Calculer les nombres  $\frac{i-1}{n}$ , c'est-à-dire les valeurs inférieures de la distribution empirique ;
5. Calculer les valeurs absolues des écarts  $|F(x_i) - \frac{i-1}{n}|$  entre  $F$  et les valeurs précédentes ;

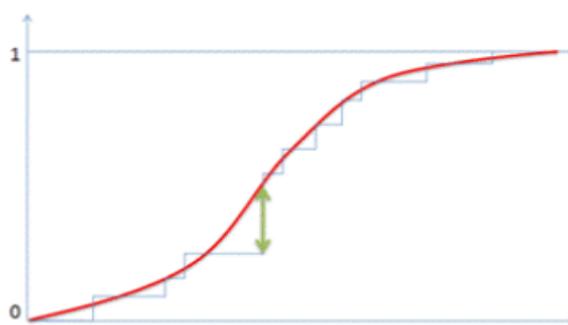


FIGURE 2.2 – Test de Kolmogorov-Smirnov

6. La distance de Kolmogorov-Smirnov est les plus grandes de tous ces écarts ;
7. On conclut le test en acceptant l'hypothèse  $H_0$  si la distance calculée est inférieure à la valeur critique donnée dans la table de Kolmogorov-Smirnov (Annexe 03) ; et en la rejetant sinon.

#### 2.1.2.4 Discipline de service

La discipline de service indique dans quel ordre sont traités les clients. Un certain nombre de règles courantes sont adoptées.

- Une règle de courtoisie voudrait que l'on serve les personnes en respectant leur ordre d'arrivée, c'est la discipline FCFS (first come, first served). Une règle proche de cette dernière est la discipline FIFO (first in, first out) qui lui est équivalente dans le cas où le service est effectué par un unique serveur.
- Une règle opposée à la règle de courtoisie consiste à servir en premier le dernier client arrivé. On rencontre cette situation lors de la gestion d'un stock : un magasinier déballé des cartons empilés sur une palette en démarrant du haut de la pile, le carton du haut étant le dernier arrivé. Le carton au bas de la pile sera déballé lorsque tous les autres au-dessus de lui (empilés après lui) auront été déballés. C'est la discipline LCFS (last come, first served). Une règle proche de la précédente est la discipline LIFO (last in, first out).
- Dans certains services d'urgence, des règles de priorités s'imposent : les clients se répartissent en plusieurs classes avec des ordres de priorité différents. Une personne prioritaire devra être servie avant une personne non prioritaire, même si celle-là est arrivée avant.

Dans le cas où une personne prioritaire arriverait pendant le service d'une personne non prioritaire, on peut envisager plusieurs situations :

1. Soit le service de la personne non prioritaire continue jusqu'à son terme avant le traitement de la personne prioritaire. C'est par exemple le cas des services d'urgence médicale : lorsqu'une personne est en train de subir une intervention chirurgicale, il faut terminer celle-là avant de traiter une autre urgence, même prioritaire ;

2. Soit le service de la personne non prioritaire est interrompu par l'arrivée d'une personne prioritaire (jouissant d'un droit de "préemption"). Dans ce cas, à la fin du service de la personne prioritaire, le service de la personne non prioritaire reprend, s'il n'y a plus de personne prioritaire dans la file.
  - (a) Soit en l'état tel qu'il était à l'instant d'interruption. C'est le cas par exemple de traitement de tâches informatiques : lorsque certaines doivent être traitées d'urgence les moins urgentes restent en mémoire (s'il y a suffisamment de mémoire) et seront achevées ultérieurement ;
  - (b) Soit depuis le début. C'est le cas par exemple de certaines réservations qui sont prioritaires pour des personnes handicapées ; lorsque ces réservations sont terminées, il faut reprendre celle qui était en cours depuis le début puisque les places disponibles ont diminué entre temps.

Enfin, dans d'autres situations, on adopte le partage de service (processor sharing) : on rencontre ce cas notamment en informatique, cas dans lequel différentes tâches sont traitées simultanément.

## 2.2 Section 02 : Les modèles existants

### 2.2.1 Les modèles Markoviens

Les Modèles Markoviens de files d'attente sont des systèmes dans lesquels les temps entre les arrivées et les durées de service sont des variables aléatoires indépendantes qui suivent une distribution exponentielle. La propriété de la loi exponentielle, qui est la propriété sans mémoire, permet une analyse simplifiée de ces modèles.

Pour ces modèles, on utilise les symboles et la terminologie suivante :

$\lambda$  : Taux d'arrivée des clients ;

$\mu$  : Taux de service ;

$\rho$  : Taux d'utilisation du système ;

$\bar{N}_F$  : Nombre moyen de clients qui attendent d'être servis (en attente) ;

$\bar{N}_S$  : Nombre moyen de clients dans le système (File + service) ;

$1/\mu$  : Temps moyen de service ;

$\bar{T}_F$  : Temps moyen d'attente dans la file ;

$\bar{T}_S$  : Temps moyen de séjour dans le système ;

$P_0$  : La probabilité pour qu'il n'ait aucun client dans le système ;

$P_n$  : La probabilité d'avoir n clients dans le système.

#### 2.2.1.1 Modèle M/M/1 (serveur unique, temps de service exponentiel)

C'est le modèle le plus simple des files d'attente caractérisé par un serveur unique et une file de capacité infinie. Les clients arrivent selon un processus de Poisson avec un taux  $\lambda$  et la durée de service est une variable aléatoire exponentielle avec un taux  $\mu$ . Le nombre de clients dans le système à tout moment est décrit par le processus stochastique  $f_x(t)$ , qui est un processus à temps continu et à espace d'état discret. Les caractéristiques du système, telles que le nombre moyen de clients dans la file et le temps moyen d'attente

dans la file, peuvent être calculées à partir des probabilités d'état transitoires et stationnaires. La condition de stabilité du système est que le taux d'arrivée soit inférieur au taux de service, soit  $\rho < 1$ .

Les formules servant à calculer les mesures de performances pour un tel modèle sont données comme suit :

- Nombre Moyen de clients dans la file d'attente :

$$\bar{N}_F = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}. \quad (2.1)$$

- Nombre moyen de clients dans le système :

$$\bar{N}_S = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}. \quad (2.2)$$

- Temps moyen d'attente dans la file :

$$\bar{T}_F = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}. \quad (2.3)$$

- Temps moyen de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = \frac{1}{\mu - \lambda}. \quad (2.4)$$

- Probabilité pour qu'il n'ait aucun client dans le système :

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu}. \quad (2.5)$$

- Probabilité d'avoir  $n$  clients dans le système :

$$P_n = P_0 \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n. \quad (2.6)$$

### 2.2.1.2 Modèle M/D/1 (Temps de service constant)

On retrouve de tels modèles dans plusieurs situations notamment lorsque le serveur est une machine automatique. Dans ce cas, le nombre moyen des clients qui attendent dans la file diminue de la moitié.

$$\bar{N}_F = \frac{\lambda^2}{2\mu(\mu - \lambda)}, \quad \bar{N}_S = \bar{N}_F + \rho.$$

Le temps moyen d'attente dans la file est aussi réduit de la moitié :

$$\bar{T}_F = \frac{\lambda}{2\mu(\mu - \lambda)}, \quad \bar{T}_S = \bar{T}_F + \frac{1}{\mu}.$$

### 2.2.1.3 Modèle M/M/m (serveurs multiples)

Le système  $M/M/m$  est un système où un nombre fini de serveurs indépendants sont disponibles pour servir les clients sans file d'attente. Les clients arrivent selon un processus de Poisson avec un taux d'arrivée  $\lambda$  et les temps de service suivent une distribution exponentielle avec un taux de service  $\mu_i$  pour chaque serveur  $i = 1, \dots, m$ . La dynamique du système peut être décrite par une chaîne de Markov à temps continu.

Pour un tel modèle, les paramètres de performances sont donnés comme suit :

- Nombre moyen des clients dans la file et le temps moyen d'attente :

$$\bar{N}_F = \frac{\lambda \mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m}{(m-1)!(m\mu - \lambda)^2} P_0.$$

- Probabilité pour qu'il n'ait aucun client dans le système :

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{m-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m}{m!(1 - \frac{\lambda}{m\mu})}}.$$

- Temps moyen de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = \frac{1}{m\mu - \lambda}.$$

- Probabilité qu'un client attend pour qu'il soit servi :

$$P_w = \frac{\bar{T}_F}{\bar{T}_S}.$$

### 2.2.1.4 Modèle $M^{[X]}/M/1$

Le modèle d'attente  $M^{[X]}/M/1$  est un modèle qui prend en compte les situations où les clients arrivent par groupe plutôt qu'individuellement. Dans ce modèle, les groupes de clients arrivent selon un processus de Poisson de taux  $\lambda$  et sont servis individuellement selon une discipline de service FIFO. Les durées de service sont indépendantes et suivent une loi exponentielle de moyenne  $1/\mu$ . La variable aléatoire  $X$  représente le nombre de clients par groupe et suit une loi de probabilité  $P(X = x) = cx$ , où  $c$  est une constante de normalisation. Bien que les arrivées des clients ne forment pas un processus de Naissance et de Mort, le système est tout de même Markovien car son comportement futur dépend uniquement de sa situation présente.

## 2.2.2 Les modèles non Markoviens

Si l'on ne suppose plus que les temps d'inter-arrivées et les durées de service suivent une distribution exponentielle, ou si l'on introduit des paramètres supplémentaires tels que la priorité, les rappels ou les blocages, alors le processus stochastique qui décrit le modèle ne sera plus de type Markovien. Cela rend l'analyse de ce modèle plus complexe, voire impossible.

### 2.2.2.1 Le modèle M/G/1

Le système M/G/1 est un modèle de file d'attente avec une capacité illimitée est un seul serveur. Les clients arrivent dans la file d'attente de manière poissonnienne avec un taux d'arrivée  $\lambda$ , mais le temps de service des clients est distribué selon une variable aléatoire générale H qui n'est plus exponentielle. Les services successifs sont considérés comme indépendants les uns des autres, mais cela rend le processus stochastique décrivant l'évolution du nombre de clients dans le système non-Markovien car le temps de service n'est plus "sans mémoire".

### 2.2.2.2 Le modèle G/M/1

Ce système est semi-Markovien. Il consiste le dual du système M/G/1. Dans ce cas, les temps des inter-arrivées des clients suivent une loi générale, et les temps de service sont indépendants et identiquement distribués selon une loi exponentielle du paramètre  $\mu$ .

### 2.2.2.3 Le modèle G/G/1

C'est un système complexe pour lequel seules les approximations et les bornes existant dans le cas général peut le rendre un processus sans mémoire pour obtenir nombre moyen de clients dans la file ou le temps de réponse, dont l'espace des états est mixte, difficile à analyser.

## 2.3 Section 03 : Les réseaux de files d'attente

La modélisation d'un système à l'aide d'une seule file d'attente est limitée dans son champ d'application car les clients peuvent nécessiter plusieurs traitements consécutifs de natures différentes avant de quitter le système. Les réseaux de files d'attente permettent de modéliser ces situations complexes en utilisant plusieurs files d'attente interconnectées. Lorsqu'un client quitte une file d'attente, il peut se diriger vers une nouvelle station du réseau ou sortir définitivement du système, en fonction de règles de routage déterministes ou stochastiques. [PHILIPPE ROBERT, (2000), page 25].

### 2.3.1 Les réseaux de Jackson ouverts

Un réseau Jackson ouvert est un système composé de "n" files d'attente interconnectées, où chaque file est de type  $M/M/m$ , c'est-à-dire qu'elle suit un processus de poisson pour l'arrivée des clients, possède un nombre fini de serveurs et fournit des traitements exponentiels de paramètre  $\mu_i$ .

Les clients arrivent de manière indépendante selon un processus de poisson avec un taux d'arrivée constant  $\lambda_i$  dans chaque file  $i(1 \leq i \leq n)$ , et sont routés vers d'autres files selon des règles de routage Markoviennes avec une probabilité  $r_{ij}$ .

Après avoir reçu un service dans une file "i", un client est dirigé vers la file "j", avec une probabilité  $r_{ij}$  et quitte le système avec une probabilité  $r_{io} = 1 - \sum r_{ij}$ , où la somme est prise sur toutes les files  $j$  ( $1 \leq j \leq n$ ).

### 2.3.2 Les réseaux de Jackson fermés

Les travaux initiaux de Jackson se concentraient uniquement sur les réseaux ouverts, mais depuis lors, ils ont été étendus et généralisés plusieurs fois. Des chercheurs ont montré que les distributions de forme produit s'appliquaient également aux réseaux fermés formés de files d'attente de type M/M/m. Dans tels réseaux, le taux d'arrivée  $\lambda_i$  est nul pour toutes les stations "i" et le nombre de clients dans le système est constant.

### 2.3.3 Les réseaux de files d'attente avec blocage

Lorsque les systèmes de files d'attente dans un réseau ont une capacité limitée, il peut se produire une situation appelée blocage.

Le blocage se produit lorsque des clients attendent d'être servis, mais l'inactivité survient en raison des limites de capacité des systèmes de file d'attente en aval. Il existe plusieurs types de blocage, tels que le blocage avant service et le blocage après service, décrits dans la littérature.

Les réseaux de file d'attente avec le blocage ont des solutions de forme produit uniquement dans des cas particuliers, et des techniques d'approximation analytiques ont été proposées pour déterminer les probabilités d'état en régime permanent de ces réseaux.

## Conclusion

Dans l'ensemble, la gestion de file d'attente est un aspect important de nombreux domaines, et il existe une variété de modèles et de techniques pour améliorer l'efficacité et minimiser les temps d'attente. L'utilisation appropriée de ces modèles et techniques peut aider à améliorer l'expérience client et la satisfaction globale, ainsi qu'à maximiser l'efficacité et la productivité des organisations.

---

---

# CHAPITRE 3

---

## PRÉSENTATION DU PROBLÈME

### Introduction

L'Entreprise Portuaire de Bejaia est une grande entreprise qui se caractérise par la diversification des activités commerciales dynamiques qui se réalisent dans ses différentes directions. Son aménagement des superstructures, le développement des infrastructures, l'utilisation de moyens de manutention et de techniques adaptés aux nouvelles technologies des navires et ses outils de gestion modernes, a fait évoluer le port de Bejaia depuis le milieu des années 1990. Dans cette partie, on va présenter l'EPB, ses équipements, ainsi que la classification des postes à quais et des navires.

### 3.1 Section 01 : L'Entreprise Portuaire de Bejaia

#### 3.1.1 Présentation du port de Bejaia

Le port de Bejaia est un port international et commercial caractérisé par sa position géographique stratégique très importante au cœur de la méditerranée occidentale et au centre de la côte Algérienne, et son environnement économique dans une région entreprenante et ses ressources humaines hautement formées et impliquées ont été les socles sur lesquels a été bâti un processus de développement harmonieux qui ont fait du port de Bejaia, une des premières infrastructures du transport maritime du pays.

Il est délimité au nord par la route nationale N°9, Au sud par les jetées de fermeture et de large sur une longueur de 2750 m, À l'est par la jetée Est de longueur de 650 m et de profondeur entre 0 et 16 m, À l'ouest par la zone industrielle de Bejaia. Il est formé de trois bassins :

- ✘ **Bassin de l'avant-port** : est destiné à traiter les navires pétroliers avec une superficie de 75 hectares et ses profondeurs varient entre 10,5 et 13,5 m.
- ✘ **Bassin du vieux port** : sa superficie est de 25 hectares et ses profondeurs de quai varient entre 8 et 9 m.

- ✠ **Bassin de l'arrière port** : sa superficie est de 55 hectares et ses profondeurs varient entre 10,5 et 12 m.

Le port s'étale sur une superficie totale de 79 hectares. Sa surface d'entreposage s'étale sur  $422.000m^2$  dont  $17.500m^2$  couverts. Il dispose d'environ 3235 ml de quai, répartis entre 26 postes à quai. [Document, présentation EPB, 2021]

### 3.1.2 Les différentes structures de l'EPB

L'Entreprise Portuaire de Bejaia (EPB) est organisée par plusieurs directions, dont préside la direction générale. [Document, présentation EPB, 2021]

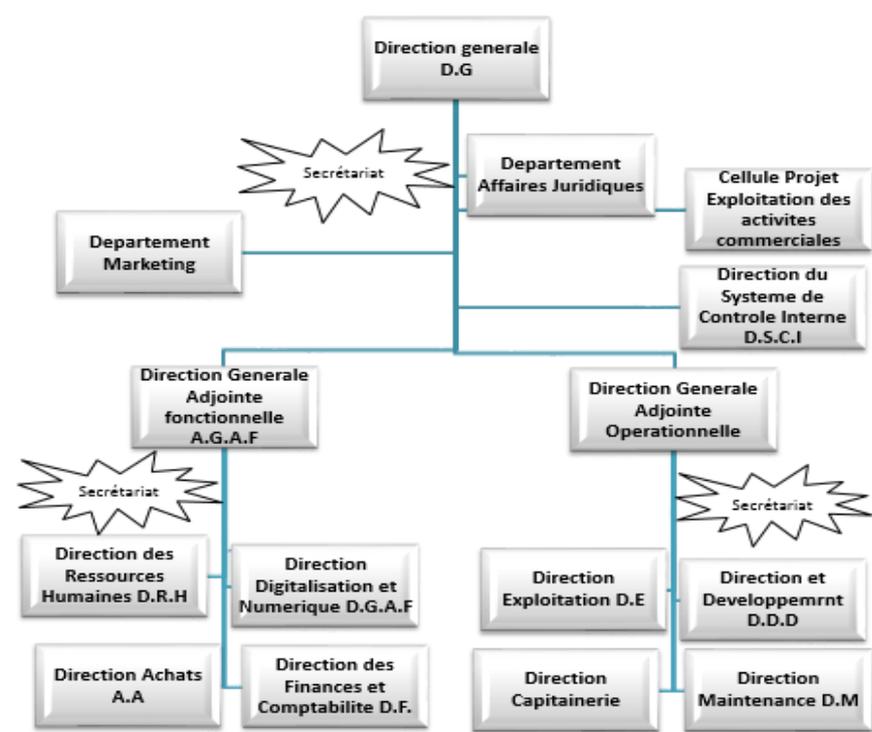


FIGURE 3.1 – Organigramme de l'EPB (source : DC de l'EPB)

- **Direction Générale (D.G)** : Elle est chargée de concevoir, coordonner et contrôler les actions liées à la gestion et au développement de l'entreprise par : deux départements, l'un c'est celui de marketing et l'autre d'affaires juridiques, une cellule de projet d'exploitation commerciales de la gare maritime et une direction du système de contrôle interne.

La Direction Générale est divisée en deux directions adjointes, on distingue :

#### I. **Direction Générale Adjointe Opérationnelle (D.G.A.O)** :

Il s'agit des structures qui prennent en charge les activités sur le terrain et qui ont une relation directe avec les clients. Parmi ces directions on trouve :

1. **Direction Exploitation (D.E)** : Elle est responsable de la planification, de l'organisation, de la coordination et du contrôle de toutes les activités de chargement et de déchargement liées aux opérations portuaires. Elle abrite les départements suivants :
  - **Manutention** : Qui comprend les opérations d'embarquement, d'arrimage, de désarrimage et de débarquement de marchandise.
  - **Acconage** : on a :
    - ✓ **Pour les marchandises** :
      - La réception des marchandises ;
      - Le transfert vers les aires d'entreposage des marchandises.
    - ✓ **Pour le service** :
      - Rassembler toutes les informations sur les navires ;
      - - L'estimation du temps de sortir ainsi que la disponibilité des terres pleines pour le stockage.
2. **Direction Domaine et Développement (D.D.D)** :
  - Enlèvement des déchets des navires et assainissement des postes à quai ;
  - Pesages des marchandises et ravitaillement des navires en eau portable ;
  - Organiser, superviser et mettre à disposition les ressources nécessaires pour le traitement des voyageurs ;
  - Assurer l'entretien et maintenance de différentes installations et équipement de la gare maritime.
3. **Direction Capitainerie (D.C)** : Elle consiste à assurer la sécurité portuaire ainsi que la bonne régulation des mouvements des navires, et la garantie de sauvegarde des ouvrages portuaires comme :
  - Le remorquage : qui il consiste à tirer ou à pousser les navires, pour effectuer les manœuvres d'accostage, de décalage ou d'appareillage du navire.
  - Le pilotage : qui consiste à assister dans la conduite d'un navire à l'intérieur du port à l'entrée et à la sortie du navire.
  - L'amarrage : qui consiste à amarrer ou désamarrer le navire de son poste d'accostage.
  - L'accostage : implique une manœuvre délicate pour amarrer ou se rapproche d'un autre objet en toute sécurité et de manière contrôlée.
4. **Direction Maintenances (D.M)** : Les principaux métiers sont :
  - ✓ **Maintenance Engins** :
    - La maintenance des équipements ;
    - La maintenance des affectations.
  - ✓ **Maintenance navale** :
    - La maintenance des remorqueurs.

## II. Direction Générale Adjointe Fonctionnelle (D.G.A.F) :

Il s'agit des structures de soutien aux structures opérationnelles, elles sont les directions suivantes :

1. **Direction des Ressources Humaines (D.R.H)** :

- Elle est responsable de la politique de recrutement, de la gestion des relations humaines et de management social de l'entreprise, il est rattaché directement à la Direction Générale ;
  - Promouvoir la gestion des carrières (affectations, formation...) et proposer une politique de rémunération ;
  - Elle développe les motivations par l'élaboration d'un projet de l'entreprise ou des différentes formes de participation des salariés.
2. **Direction Digitalisation et Numérique (D.D.N) :**
- La mise en œuvre des systèmes d'information à la fois flexibles et fiables ;
  - Le management des évolutions des systèmes d'information et des projets informatiques ;
  - L'excellence opérationnelle et l'optimisation des fonctions de soutien de la direction.
3. **Direction Achats (D.A) :** La mission principale de la direction est de satisfaire les besoins des clients internes :
- La négociation des prix d'achat des prestations courants ;
  - L'augmentation de la qualité des produits ;
  - La pérennisation des relations avec les fournisseurs pour augmenter la sécurité.
4. **Direction des Finances et Comptabilité (D.F.C) :**
- L'animation, la coordination et le contrôle de l'ensemble des activités financières et comptables de l'entreprise ;
  - L'assistance à la Direction Générale, Direction Centrale, en matière de finances et comptabilités, par la fourniture de toutes les données nécessaires à la prise de décision ;
  - La participation active à l'élaboration des différents politiques de l'entreprise, ayant un impact sur la situation financière.

### 3.1.3 Les équipements

Le port de Bejaia enregistre au fil des années des performances en progression continue grâce à ses infrastructures, ses équipements et ses ressources humaines hautement qualifiées qui répondant aux normes universelles et aux exigences du trafic. Il est équipé de : [**Document, présentation EPB, 2021**]

- Des grues mobiles sur roues de 40 à 90 tonnes de capacité.
- Des grues de quais de 15 à 80 tonnes de capacité.
- Des pelles mécaniques utilisables dans les cales des céréaliers.
- Deux pont-bascule pour camions et wagons, d'une capacité de 60 à 100 tonnes.
- Des bennes preneuses.
- Des chariots élévateurs à 2,5 à 28 tonnes de capacité de levage.
- Tracteurs RoRo et remorques.
- Equipement de lutte anti-pollution (barrage anti-pollution d'une largeur de 900 m, dispersant marin, laboratoire spécialisé...etc.).
- Pompes à grains (250 tonnes/heure).



- ✓ **Poste 14** : situé dans la passe Casbah, sa profondeur est de 10 m et sa longueur est de 145 ml. Il est réservé aux navires cargos de fort tirant d'eau.
- ✓ **Postes 15 et 16** : quai sud-est situés dans l'arrière port avec une profondeur de 10m et une longueur de 230 ml, réservés aux navires de type céréalier.
- ✓ **Postes 17 à 19** : quai de la gare situé dans l'arrière port avec une profondeur de 7,5 à 10,5 m et une longueur de 530 ml. Le poste 17 est réservé au blé, poste 18 aux navires de fort tirant d'eau et le poste 19 est réservé pour l'essence, le gasoil et le bitume.
- ✓ **Postes 20 à 24** : constitués le nouveau quai situé dans l'arrière port, sa profondeur est de 12 m et sa longueur est de 750 ml dont le poste 20 est destiné à la réparation naval, poste 21 pour les navires céréaliers et huiliers, les postes 22, 23, et 24 sont réservés aux portes conteneurs (BMT).
- ✓ **Poste 25** : poste exploité par CEVITAL et CO.J.B avec une longueur de 170 ml.
- ✓ **Poste 26** : quai appelé grande jetée du large situé dans l'arrière port, sa profondeur est de 12,5 m et sa longueur est de 78 ml, réservé au navire gazier et huilier.

**Remarque :**

- Les navires RO/RO occupent les deux postes 11 et 12 au même temps.
- Il existe un autre poste à quais situé au niveau de la rade appelé poste 91, spécialisé au type des navires pétroliers.

## 3.2.2 Les navires

### 3.2.2.1 Parcours d'un navire arrivant au port

1. **Étape de mouillage :**

Avant d'accéder au port les navires sont mise en attente au niveau de la rade (zone de mouillage) jusqu'à obtention de l'autorisation de rejoindre un poste à quai après une conférence de placement au niveau de la direction capitainerie. Les navires car-ferries ne sont pas concernés par les attentes en rade.

2. **Étape de service :**

Cette étape est prise en charge par la direction adjointe opérationnelle, qui assure les opérations de navigation y compris le pilotage, remorquage et amarrage.

- Allocation de quai au navire : l'objectif d'allocation de quai est de déterminer un horaire d'affectation des navires au quai qui permet de minimiser le temps total de l'exécution des opérations.

Les postes de l'accostage à l'EPB sont affectés par le président d'une conférence de placement des navires (CPN) qui doit être fait quotidiennement le matin à 10h sauf le samedi et les jours fériés pour affecter les navires à poste à quai.

- Allocation des équipements de manutention de quai au navire : L'EPB utilise une procédure de programmation de déterminer les types d'engins nécessaire pour le traitement des navires et des marchandises à l'importation et l'exportation (chargement, déchargement, entreposage et évacuation).

### 3. Planification de chargement et de déchargement :

Afin de minimiser le nombre de manutention improductive, un plan de chargement (déchargement) sera mis en œuvre en tenant en compte de plusieurs facteurs, tout d'abord on retrouve les contraintes de stabilités de navire et contraintes de type de marchandises.

Les principales fonctions opérationnelles et administratives d'un port sont représentées dans le schéma suivant :

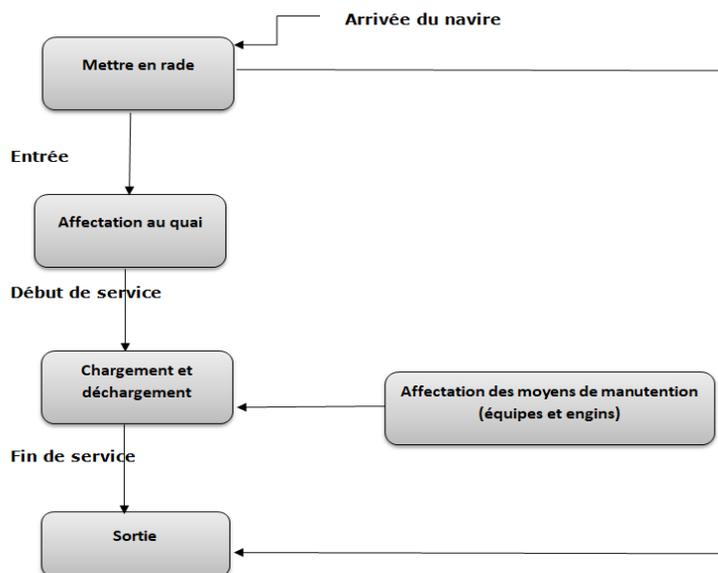


FIGURE 3.3 – Modélisation du parcours d'un navire

#### 3.2.2.2 Les types de navires

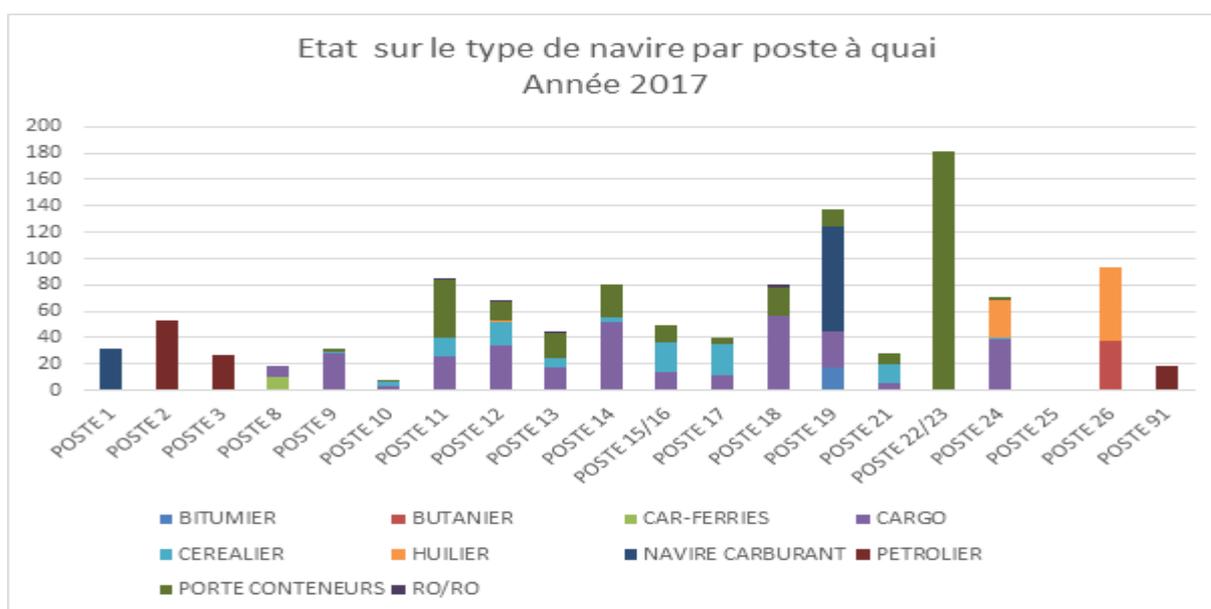
On distingue 10 catégories de navires :

- **Bitumier** : est un navire citerne spécialisé dans le transport d'asphalte et de bitume, celui-ci est transporté dans des cuves chauffées entre 180 et 250°C afin de le maintenir à l'état liquide visqueux.
- **Butanier** : est spécialisé dans le transport du butane, le propane ainsi que d'autre gaz liquéfiés.
- **Car-ferries** : appelée en français " Transbordeurs ", est un navire aménagé spécialement pour le transport des passagers et leurs voitures.
- **Cargo** : est un navire de charge dont son rôle est de transporter diverses marchandises.
- **Céréaliier** : est un navire vraquier spécialisé dans le transport des charges sèches telles que les céréales.
- **Huilier** : est un navire citerne destiné au transport d'huile, le plus souvent d'huile végétale alimentaire. Il est transporté en vrac dans de grandes citernes et déchargé au moyen de pompes.

- **Pétrolier** : est un navire conçu pour le transport de grandes quantités de pétrole brut de produits pétroliers.
- **Navire carburant** : c'est des navires citernes spécialisées dans le transport de la charge liquide comme l'essence et le gasoil.
- **Port conteneurs** : c'est des navires destinés au transport des conteneurs. Les plus gros font près de 400 m de long et transport 16.000 EVP.
- **Roll on/ Roll off (RO/RO)** : Ces des navires équipés de pont levis permettant de faire entrer et ressortir les véhicules. Leur capacité se mesure on tonne et en longueur de roulage.

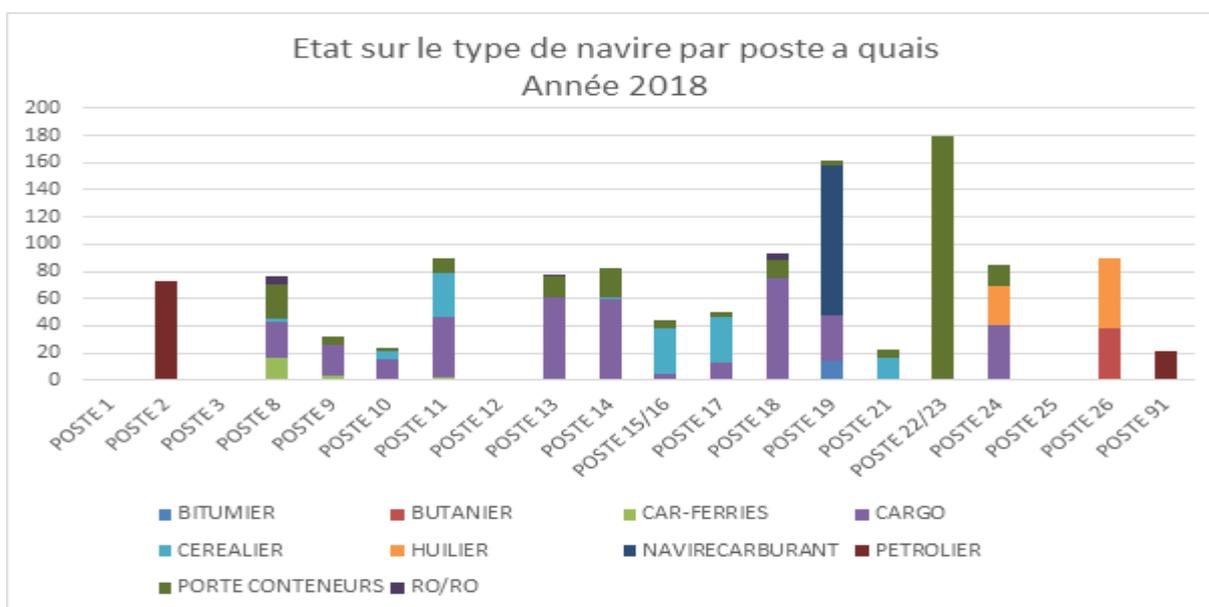
Afin d'analyser la performance des postes à quais, nous avons élaboré des histogrammes sur l'état des postes à quais à partir de l'année 2017 jusqu'à l'année 2022 (de Janvier 2022 à Octobre 2022).

**Remarque :** Les postes à quai 4 ; 5 ; 6 ; 7 sont exploités par des navires de pêche et les navires militaires.



L'historgramme fournit des informations sur le nombre de navires de différents types qui accostent à différents postes d'un port. D'après l'année 2017, les postes 22/23 sont les plus exploités par rapport à d'autres, avec un total de 181 navires qui accostent, de type "porte-conteneurs". Aussi, les postes 19 ; 26 ; 11 ; 14 et le poste 18, sont bien exploités par des navires pétrolier, céréalier, cargo, porte-conteneurs et huilier.

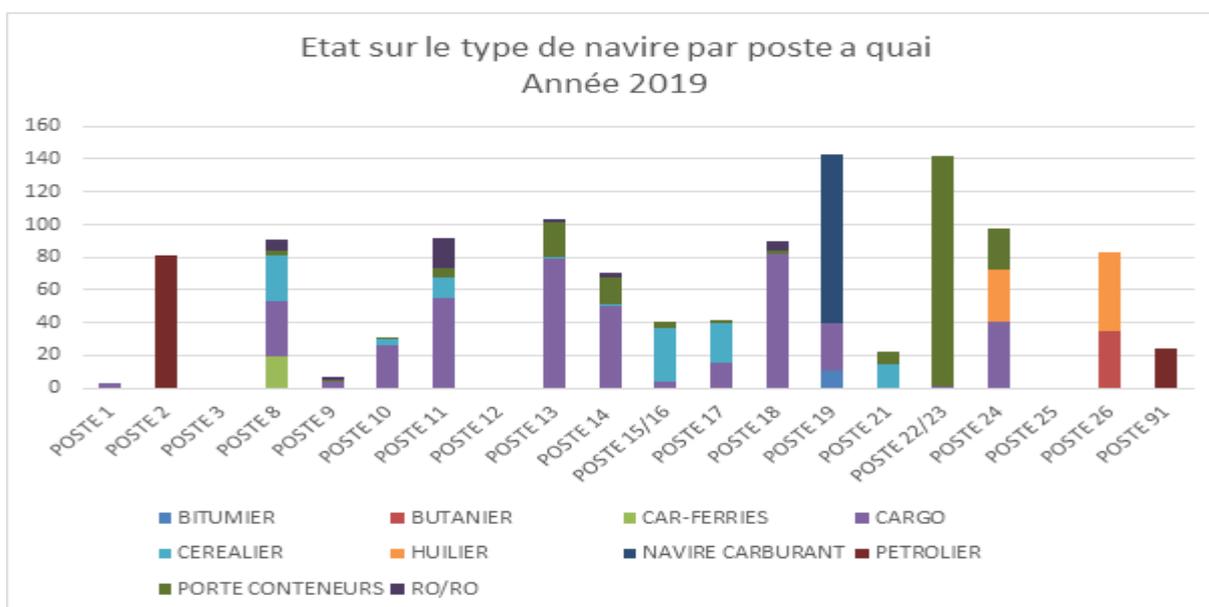
Les postes 1 ; 3 ; 8 ; 9 ; 10 ; 21 et 91, sont moins exploités car c'est les moins actifs par rapport d'autres. En revanche, le poste 25 est désoccupé en raison qu'il était en cours de construction.



Les données de l'année 2018, nous montre que les postes à quais 22/23 et 19 sont les plus exploités dans le port, avec un total de 179 navires pour le poste 22/23 et 162 pour le poste 19, de type porte-conteneurs et carburant.

Les postes 2;8 ; 11 ; 13 ; 14 ; 18 ; 24 et 26, sont bien exploités par des navires de type pétrolier, cargo, céréalier et huilier. Par contre les postes 9 ; 10 ; 15/16 ; 17 ; 21 ; et 91, sont moins exploités par rapport à d'autres postes à quais.

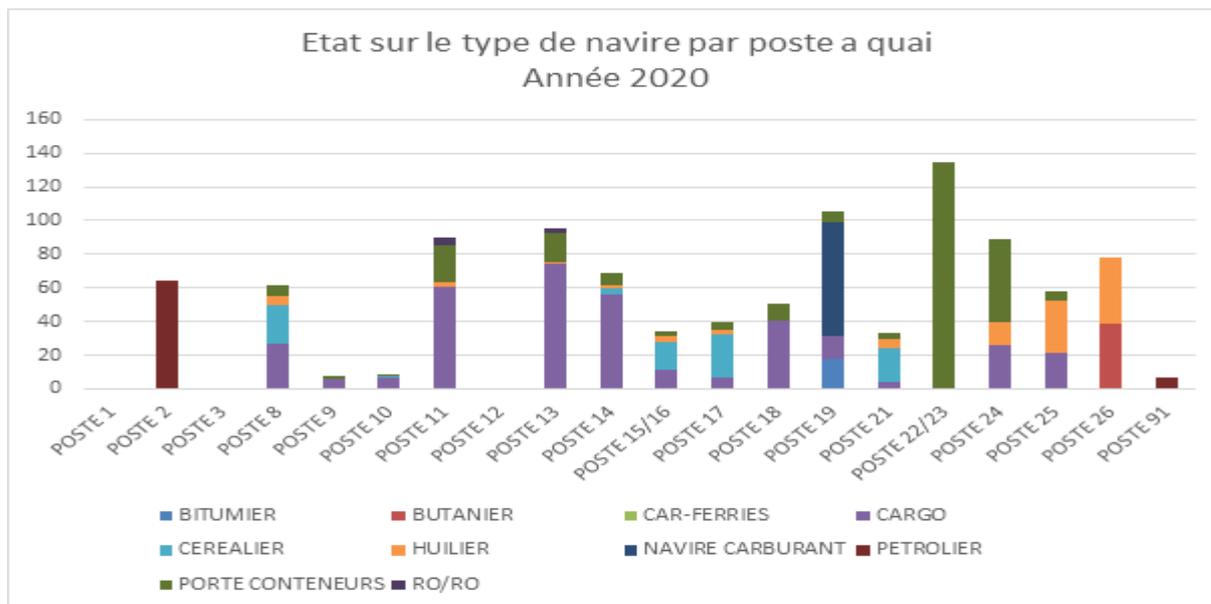
Il y a d'autres postes qui sont non exploités comme poste 1 et 12 et le poste 3 qui est en panne.



En 2019, on remarque que les postes les plus actifs sont : 19, 22/23, sont les plus actifs et plus exploités avec un total de 141 navires qui accostent, de type carburant et porte-conteneurs ;

Aussi, les postes 2 ; 8 ; 11 ; 13 ; 14 ; 18 ; 24 et 26, sont bien exploités par des navires suivants : Pétrolier, Cargo, Céréaliier, Butanier et Huilier ;

Les postes moins exploités sont les suivants : 1 ; 9 ; 10 ; 15/16 ; 17 ; 21 et 91.

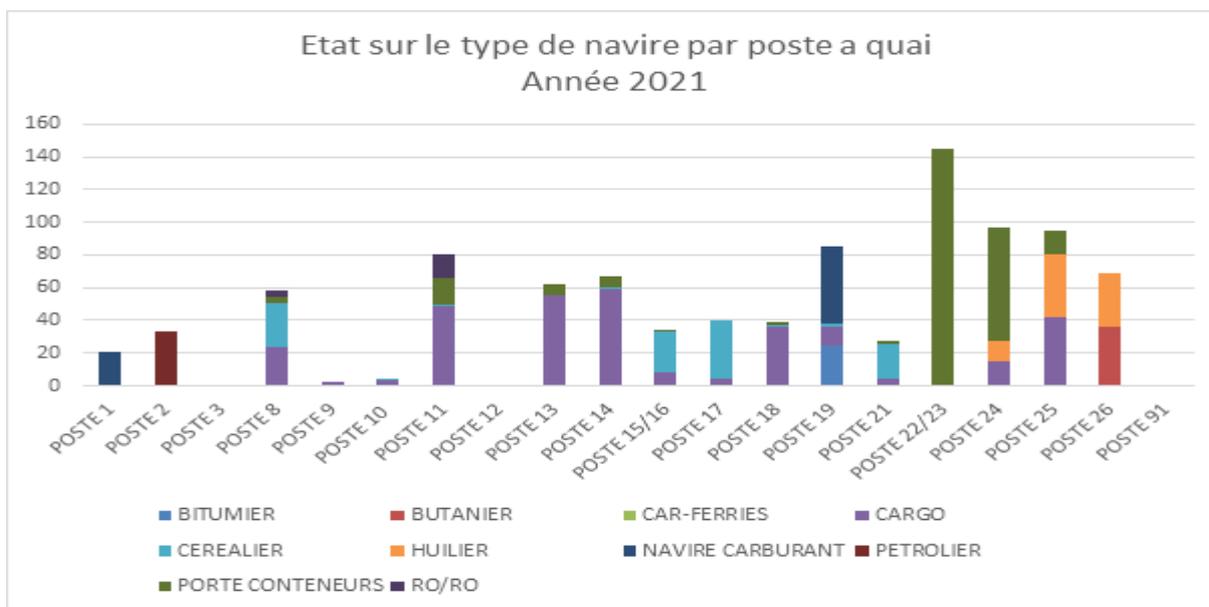


Durant l'année 2020, le port de Bejaia a été affecté par une crise économique qui a touché le monde entier à cause du " COVID 19", durant cette crise l'activité portuaire a bissée.

Les postes 22 et 23 sont les plus actifs et exploités avec un total de 135 navires de type porte-conteneurs.

Aussi, les postes 2 ; 8 ; 11 ; 13 ; 14 ; 19 ; 24 ; 25 et 26, sont bien exploités par des navires de type : Pétrolier, Cargo, Carburant, Butanier, Huilier et Céréaliier.

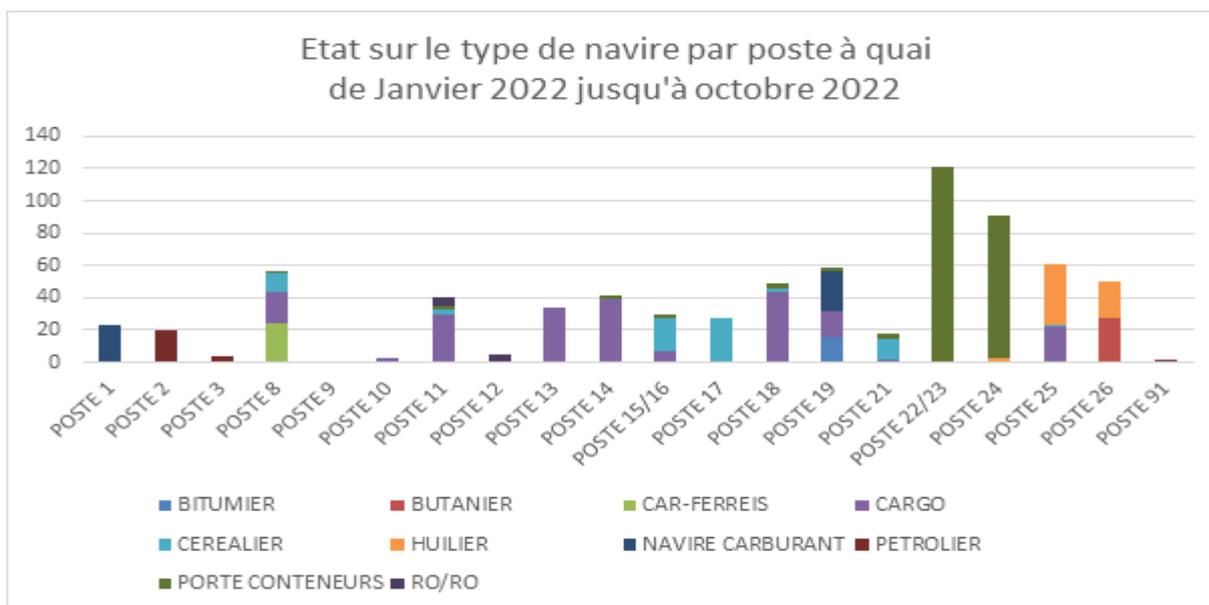
Les postes 9 ; 10 ; 15/16 ; 17 ; 21 et 91 sont les moins actifs, par contre les postes 1 ; 3 et 12 ne sont pas exploités durant cette année.



En 2021, les postes à quais 22 et 23 sont plus exploités avec un total de 145 navires qui accostent, de type porte-conteneurs ;

Les postes 8, 11, 13, 14, 19, 24, 25 et 26 sont bien exploités par des navires de types : Cargo, Carburant, Huilier, Porte-conteneurs, Céréaliier et Butanier. Par contre les postes 1, 2, 9, 10, 15/16, 17, 18 et 21 sont moins exploités durant cette année ;

Les postes 3, 12 et 91 sont non exploités en 2021.



Du 1er janvier 2022 jusqu'à le 31 octobre 2022, on constate que les postes à quai 22/23 et 24 sont les plus exploités avec un total de 209 navires de type " porte-conteneurs " ;

Les postes à quais 8, 11, 14, 18, 19, 25 et 26 sont suffisamment exploités par des navires de types suivants : Cargo, Carburant, Butanier, Huilier et Céréaliier.

D'autres postes 1, 2, 3, 10, 12, 13, 15/16, 17, 21 et 91 sont moins exploités et le poste 9 qui n'est pas du tout exploité car il était en panne.

Les différentes durées moyennes de l'ensemble des navires durant la période d'étude considérée sont résumées dans le tableau suivant :

Type de Navire	Durée d'attente		Durée Service		Durée de Sejour	
	<i>Jours/Nav</i>	<i>Heures/ Nav</i>	<i>Jours/Nav</i>	<i>Heures/ Nav</i>	<i>Jours/Nav</i>	<i>Heures/ Nav</i>
BITUMIER	2,4312	58,3480	1,4206	34,0949	3,7517	90,0396
BUTANIER	1,3386	32,1264	2,5083	60,1992	5,7911	138,9864
CARBURANT	1,9052	45,7241	1,9532	46,8759	3,8649	92,7566
CARE-FERRIES	0,0174	0,4167	0,2206	5,2953	0,3021	7,2504
CARGO	2,8044	67,3056	3,2090	77,0158	6,2680	150,4331
CEREALIER	5,6279	135,0701	8,5681	205,6334	14,4021	345,6515
HUILIER	3,1906	76,5755	2,0045	48,1082	5,2110	125,0651
PETROLIER	1,4940	35,8556	1,2503	30,0063	2,5796	61,9111
PORTE-CONTENEURS	3,7859	90,8620	2,3356	56,0547	6,2301	149,5220
RO/RO	1,3417	32,2016	2,2878	54,9072	4,1409	99,3816

TABLE 3.1 – Mesures de performance des navires à base des données de L'EPB

D'après ces analyses, on constate que :

- ✓ L'affectation des navires aux postes à quais se fait d'une façon désorganisée, où des navires de mêmes types sont affectés à plusieurs postes à quais ;
- ✓ Les postes à quais sont mal exploités, où on trouve des postes qui ne sont même pas exploités (exemple : poste 03 et 12) ;
- ✓ Les durées d'attente et de séjour sont un peu élevés pour quelques types de navires (exemple CEREALIER) ;
- ✓ Aussi un nombre important des mouvements des navires ou un même navire passe dans plusieurs postes à quais pour qu'il puisse décharger, ce qui augmente considérablement les durées de séjour.

## Conclusion

L'évaluation des performances du système d'affectation des navires aux postes à quais appliqué par l'EPB nous a permis de détecter certains problèmes (défaillances) de gestion ; tels que les mouvements des navires répétitifs où un même navire passe dans plusieurs postes à quais pour qu'il puisse décharger la totalité de la marchandise. Ce qui engendre des retards considérables et des congestions ainsi que des pertes financières pour l'entreprise. Il est donc important de mettre en place un nouveau modèle plus efficace qui permet d'assurer une affectation optimale des navires aux différents postes à quai de façon à améliorer la qualité de service assurée pour ses clients.

---

---

## CHAPITRE 4

---

# ÉVALUATION DES PERFORMANCES D'UN SYSTÈME DE FILE D'ATTENTE AU SEIN DE L'EPB

### Introduction

Dans le but de résoudre le problème de l'affectation des navires, qui peut entraîner des problèmes de gestion portuaire, en particulier pour les postes à quai, des estimations ont été effectuées pour déterminer les lois d'arrivée et les lois de service associées. Ces estimations seront ensuite utilisées pour modéliser le problème et trouver une solution appropriée.

### 4.1 Section 01 : Estimation des différentes lois d'arrivée des navires

Dans cette section on cherche à estimer les lois d'arrivées pour chaque type de navire selon une loi Poisson et ce en utilisant certains outils statistiques tels que la méthode du diagramme en battant et le test statistique de KHI-DEUX.

A base des données collectées, l'analyse graphique la plus pertinente pour juger de l'adéquation de la loi de d'arrivée des navires avec la loi de Poisson repose sur le schéma suivant :

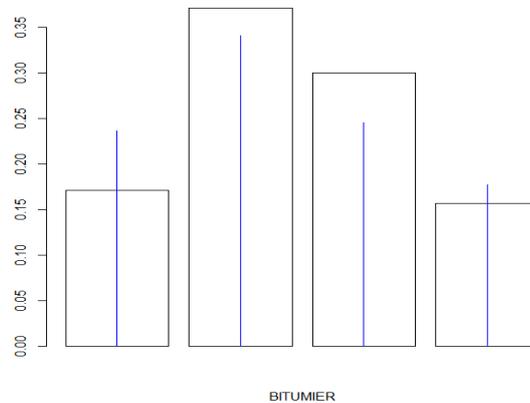
- On trace d'abord le barplot des fréquences correspondantes aux données.
- On superpose les valeurs de la "densité" associée à la loi de Posson en estimant éventuellement le paramètre inconnu de celle-ci.

### 4.1.1 Loi d'arrivée des navires de type BITUMIER

Nous avons recensés durant la période considérée 101 Navires de type BITUMIER. Le traitement des données concernant ces navires nous donne les résultats suivants :

$X_i$	Effectifs observés $O_k$	$P(X = k)$	Effectifs théoriques $E_k$	$(O_k - E_k)^2$	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
0	12	0,236251788	16,53762519	20,59004232	1,245042265
1	26	0,34087758	23,86143062	4,573478974	0,191668264
2	21	0,245918826	17,21431781	14,33138966	0,832527308
$\geq 3$	11	0,176951805	12,38662638	1,922732725	0,155226505
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>C (obs)</b>	<b>2,424464342</b>

TABLE 4.1 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type BITUMIER



Le diagramme nous donne une première impression que la loi d'arrivée des navires de type BITUMIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 1,44$  Navires /mois.

#### Le test de KHI-DEUX :

$H_0$  : " Le processus d'arrivée des navires de type BITUMIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 1,44$  Navires/Mois".

$H_1$  : " Le processus d'arrivée des navires de type BITUMIER ne suit pas une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 1,44$  Navires/Mois ".

Le test de Khi-Deux indique que :

$$\chi^2 = 2,42 \leq \chi_{(3)}^{0,05} = 7,81, \quad \text{et} \quad p\text{-value} = 0,48 > 0,05.$$

**Conclusion** : On accepte alors l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire le processus d'arrivée des navires de type BITUMIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda_{Bit} = 1,44$  Navires/Mois.

### 4.1.2 Loi d'arrivée des navires de type BUTANIER

Nous avons recensés durant la période considérée 213 Navires de type BUTANIER. Le traitement des données concernant ces navires nous donne les résultats suivants :

```

> BITUMIER = c(12, 26, 21, 11)
> Lambda = sum(0:3) * BITUMIER) / 70
> Lambda
[1] 1.442857
> Poisson = c(dpois(0:2, Lambda), 1 - ppois(2, Lambda))
> Poisson
[1] 0.2362518 0.3408776 0.2459188 0.1769518
> chisq.test(BITUMIER, p = Poisson)

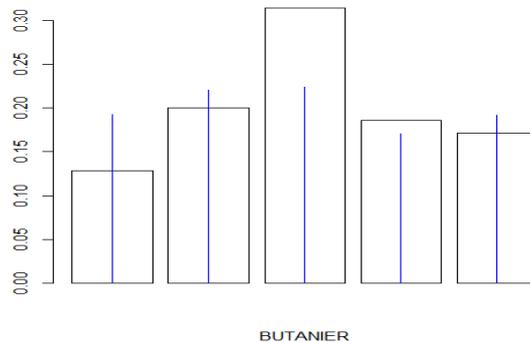
Chi-squared test for given probabilities

data: BITUMIER
X-squared = 2.4245, df = 3, p-value = 0.4891
    
```

FIGURE 4.1 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type BITUMIER

$X_i$	Effectifs observés $O_k$	$P(X = k)$	Effectifs théoriques $E_k$	$(O_k - E_k)^2$	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
$\leq 1$	9	0,192837871	13,498651	20,23786085	1,499250617
2	14	0,220819318	15,45735228	2,123875671	0,137402295
3	22	0,22397388	15,6781716	39,96551433	2,549118312
4	13	0,17038013	11,92660911	1,152168004	0,096604826
$\geq 5$	12	0,1919888	13,43921601	2,071342713	0,154126752
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>C (obs)</b>	<b>4,436502803</b>

TABLE 4.2 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type BUTANIER



Le diagramme nous donne une première impression que la loi d'arrivée des navires de type BUTANIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 3,04$  Navires /mois.

#### Le test de KHI-DEUX :

$H_0$  : " Le processus d'arrivée des navires de type BUTANIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 3,04$  Navires/Mois".

$H_1$  : " Le processus d'arrivée des navires de type BUTANIER ne suit pas une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 3,04$  Navires/Mois ".

Le test de Khi-Deux indique que :

$$\chi^2 = 4,43 \leq \chi_{(4)}^{0,05} = 9,49, \quad \text{et} \quad p - \text{value} = 0,35 > 0,05.$$

**Conclusion** : On accepte alors l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire le processus d'arrivée des

```

> BUTANIER = c(9, 14, 22, 13, 12)
> Lambda
[1] 3.042857
> Poisson = c(ppois(1, Lambda), dpois(2:4, Lambda), 1 - ppois(4, Lambda))
> Poisson
[1] 0.1928379 0.2208193 0.2239739 0.1703801 0.1919888
> chisq.test(BUTANIER, p = Poisson)

Chi-squared test for given probabilities

data: BUTANIER
X-squared = 4.4365, df = 4, p-value = 0.3501
    
```

FIGURE 4.2 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type BUTANIER

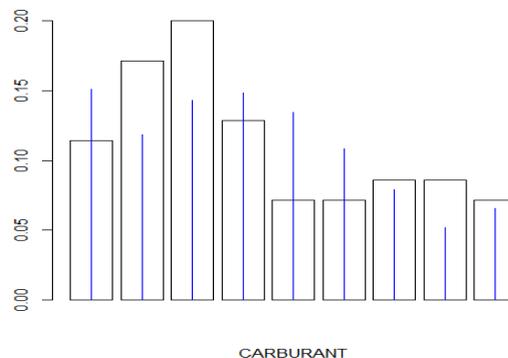
navires de type BUTANIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda_{But} = 3,04$  Navires/Mois.

### 4.1.3 Loi d'arrivée des navires de type CARBURANT

Nous avons recensés durant la période considérée 508 Navires de type CARBURANT. Le traitement des données concernant ces navires nous donne les résultats suivants :

$X_i$	Effectifs observés $O_k$	$P(X = k)$	Effectifs théoriques $E_k$	$(O_k - E_k)^2$	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
$\leq 4$	8	0,150798905	10,55592338	6,532744333	0,618870003
5	12	0,118279647	8,279575258	13,84156026	1,671771779
6	14	0,143062049	10,01434341	15,88545847	1,586270595
7	9	0,148317389	10,38221725	1,910524518	0,184018931
8	5	0,13454506	9,418154217	19,52008669	2,072602151
9	5	0,108490303	7,594321178	6,730502375	0,886254639
10	6	0,078732962	5,511307369	0,238820487	0,043332819
11	6	0,051943305	3,636031355	5,588347753	1,536936073
$\geq 12$	5	0,06583038	4,608126586	0,153564773	0,033324773
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>C (obs)</b>	<b>8,633381763</b>

TABLE 4.3 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CARBURANT



Le diagramme nous donne une première impression que la loi d'arrivée des navires de type CARBURANT suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 7,25$  Navires /mois.

**Le test de KHI-DEUX :**

$H_0$  : " Le processus d'arrivée des navires de type CARBURANT suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 7,25$  Navires/Mois".

$H_1$  : " Le processus d'arrivée des navires de type CARBURANT ne suit pas une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 7,25$  Navires/Mois ".

```
> CARBURANT = c(8, 12, 14, 9, 5, 5, 6, 6, 5)
> Lambda = 7.257142857
> Poisson = c(ppois(4, Lambda), dpois(5:11, Lambda), 1 - ppois(11, Lambda))
> Poisson
[1] 0.15079891 0.11827965 0.14306205 0.14831739 0.13454506 0.10849030 0.07873296
[8] 0.05194331 0.06583038
> chisq.test(CARBURANT, p = Poisson)

Chi-squared test for given probabilities

data: CARBURANT
X-squared = 8.6334, df = 8, p-value = 0.3742
```

FIGURE 4.3 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CARBURANT

Le test de Khi-Deux indique que :

$$\chi^2 = 8,63 \leq \chi_{(4)}^{0,05} = 15,51, \quad \text{et} \quad p - \text{value} = 0,37 > 0,05.$$

**Conclusion :** On accepte alors l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire le processus d'arrivée des navires de type CARBURANT suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda_{Carb} = 7,25$  Navires/Mois.

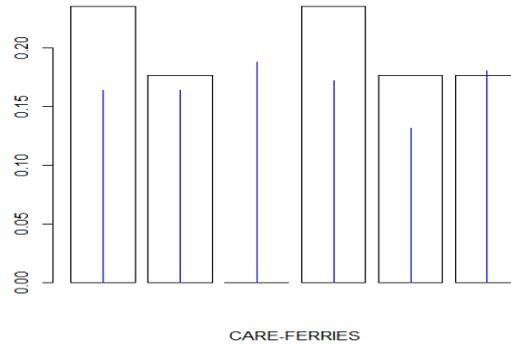
**4.1.4 Loi d'arrivée des navires de type CAR-FERRIES**

Nous avons recensés durant la période considérée 78 Navires de type CAR-FERRIES. Le traitement des données concernant ces navires nous donne les résultats suivants :

$X_i$	Effectifs observés $O_k$	$P(X = k)$	Effectifs théoriques $E_k$	$(O_k - E_k)^2$	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
$\leq 2$	4	0,163894027	2,78619845	1,473314197	0,528790114
3	3	0,163734623	2,78348859	0,046877192	0,016841165
4	0	0,187813244	3,19282514	10,1941324	3,192825145
5	4	0,172346271	2,9298866	1,145142682	0,390848806
6	3	0,131794207	2,24050152	0,576837941	0,257459295
$\geq 7$	3	0,180417629	3,06709969	0,004502369	0,001467956
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>C (obs)</b>	<b>4,388232481</b>

TABLE 4.4 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CAR-FERRIES

Le diagramme nous donne une première impression que la loi d'arrivée des navires de type CAR-FERRIES suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 4,58$  Navires /mois.



**Le test de KHI-DEUX :**

$H_0$  : " Le processus d'arrivée des navires de type CAR-FERRIES suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 4,58$  Navires/Mois".

$H_1$  : " Le processus d'arrivée des navires de type CAR-FERRIES ne suit pas une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 4,58$  Navires/Mois ".

```
> CAREFERRIES = c(4, 3, 0, 4, 3, 3)
> Lambda = 4.588235294
> Poisson = c(ppois(2, Lambda), dpois(3:6, Lambda), 1 - ppois(6, Lambda))
> Poisson
[1] 0.1638940 0.1637346 0.1878132 0.1723463 0.1317942 0.1804176
> chisq.test(CAREFERRIES, p = Poisson)

Chi-squared test for given probabilities

data: CAREFERRIES
X-squared = 4.3882, df = 5, p-value = 0.495
```

FIGURE 4.4 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CAR-FERRIES

Le test de Khi-Deux indique que :

$$\chi^2 = 4,3882 \leq \chi_{(5)}^{0,05} = 11,07, \quad \text{et} \quad p - \text{value} = 0,495 > 0,05.$$

**Conclusion** : On accepte alors l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire le processus d'arrivée des navires de type CAR-FERRIES suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda_{Ferr} = 4,58$  Navires/Mois.

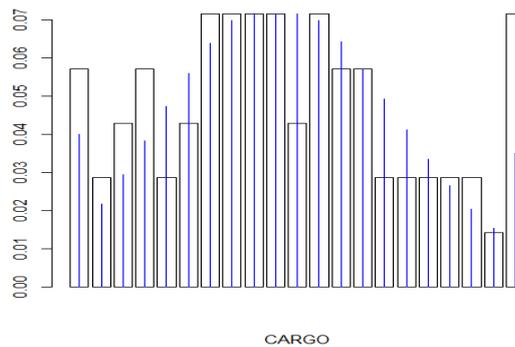
**4.1.5 Loi d'arrivée des navires de type CARGO**

Nous avons recensés durant la période considérée 1993 Navires de type CARGO. Le traitement des données concernant ces navires nous donne les résultats suivants :

Chapitre 04 : Évaluation des performances d'un système de file d'attente au sein de l'EPB

$X_i$	Effectifs observés $O_k$	$P(X = k)$	Effectifs théoriques $E_k$	$(O_k - E_k)^2$	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
$\leq 19$	4	0,040022848	2,801599332	1,436164162	0,512622967
20	2	0,021730826	1,521157827	0,229289827	0,150733752
21	3	0,02946227	2,062358877	0,879170876	0,426293835
22	4	0,038128768	2,669013793	1,771524282	0,663737402
23	2	0,047199153	3,303940677	1,700261289	0,514616168
24	3	0,055992804	3,919496291	0,84547343	0,215709715
25	5	0,063767805	4,463746348	0,28756798	0,064423011
26	5	0,06982925	4,888047512	0,01253336	0,002564083
27	5	0,07363476	5,15443317	0,023849604	0,004627008
28	5	0,074874528	5,241216993	0,058185638	0,011101551
29	3	0,07350982	5,145687423	4,603974515	0,894724871
30	5	0,06976432	4,883502397	0,013571692	0,00277909
31	4	0,064073866	4,485170634	0,235390545	0,05248196
32	4	0,057008578	3,99060048	8,8351E-05	2,21398E-05
33	2	0,049185323	3,442972622	2,082169987	0,60475938
34	2	0,041187542	2,883127914	0,779914912	0,270509993
35	2	0,033504804	2,345336299	0,119257159	0,050848639
36	2	0,026498046	1,854863192	0,021064693	0,011356467
37	2	0,020390195	1,427313645	0,327969661	0,229781073
38	1	0,015277315	1,069412066	0,004818035	0,004505312
$\geq 39$	5	0,034957179	2,447002509	6,517796188	2,663583778
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>C (obs)</b>	<b>7,351782195</b>

TABLE 4.5 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CARGO



Le diagramme nous donne une première impression que la loi d'arrivée des navires de type CARGO suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 28,47$  Navires/mois.

**Le test de KHI-DEUX :**

$H_0$  : " Le processus d'arrivée des navires de type CARGO suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 28,47$  Navires/Mois".

$H_1$  : " Le processus d'arrivée des navires de type CARGO ne suit pas une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 28,47$  Navires/Mois ".

```
> CARGO = c(4,2,3,4,2,3,5,5,5,3,5,4,4,2,2,2,2,1,5)
> Lambda = 28.47142857
> Poisson = c(ppois(19, Lambda), dpois(20:38, Lambda), 1 - ppois(38, Lambda))
> Poisson
 [1] 0.04002285 0.02173083 0.02946227 0.03812877 0.04719915 0.05599280
 [7] 0.06376780 0.06982925 0.07363476 0.07487453 0.07350982 0.06976432
 [13] 0.06407387 0.05700858 0.04918532 0.04118754 0.03350480 0.02649805
 [19] 0.02039019 0.01527732 0.03495718
> chisq.test(CARGO, p = Poisson)

Chi-squared test for given probabilities

data: CARGO
X-squared = 7.3518, df = 20, p-value = 0.9954
```

FIGURE 4.5 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CARGO

Le test de Khi-Deux indique que :

$$\chi^2 = 7,3518 \leq \chi_{(20)}^{0,05} = 31,41, \quad \text{et} \quad p - \text{value} = 0,9954 > 0,05.$$

**Conclusion** : On accepte alors l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire le processus d'arrivée des navires de type CARGO suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda_{Cargo} = 28,47$  Navires/Mois.

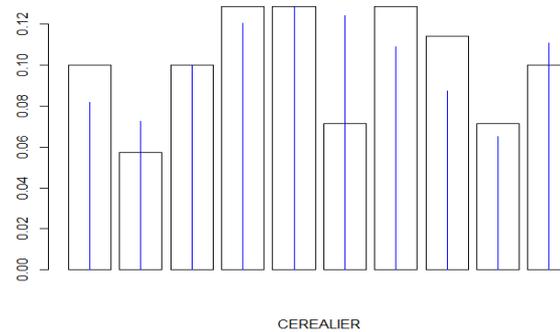
#### 4.1.6 Loi d'arrivée des navires de type CEREALIER

Nous avons recensés durant la période considérée 675 Navires de type CEREALIER. Le traitement des données concernant ces navires nous donne les résultats suivants :

$X_i$	Effectifs observés $O_k$	$P(X = k)$	Effectifs théoriques $E_k$	$(O_k - E_k)^2$	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
$\leq 5$	7	0,081862683	5,730387835	1,61191505	0,281292488
6	4	0,072453981	5,071778678	1,148709534	0,22649047
7	7	0,099809056	6,986633893	0,000178653	2,55707E-05
8	9	0,120305558	8,421389067	0,334790611	0,039754797
9	9	0,128898812	9,022916858	0,000525182	5,82054E-05
10	5	0,124295283	8,700669827	13,69495717	1,574011822
11	9	0,108960151	7,627210563	1,884550838	0,247082577
12	8	0,087557264	6,129008488	3,500609238	0,571154249
13	5	0,064946322	4,54624256	0,205895814	0,045289228
$\geq 14$	7	0,110910889	7,763762231	0,583332745	0,075135318
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>C (obs)</b>	<b>3,060294724</b>

TABLE 4.6 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CEREALIER

Le diagramme nous donne une première impression que la loi d'arrivée des navires de type CEREALIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 9,64$  Navires/mois.



### Le test de KHI-DEUX :

$H_0$  : " Le processus d'arrivée des navires de type CEREALIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 9,64$  Navires/Mois".

$H_1$  : " Le processus d'arrivée des navires de type CEREALIER ne suit pas une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 9,64$  Navires/Mois ".

```
> CEREALIER = c(7, 4, 7, 9, 9, 5, 9, 8, 5, 7)
> Lambda = 9.642857143
> Poisson = c(ppois(5, Lambda), dpois(6:13, Lambda), 1 - ppois(13, Lambda))
> Poisson
[1] 0.08186268 0.07245398 0.09980906 0.12030556 0.12889881 0.12429528
[7] 0.10896015 0.08755726 0.06494632 0.11091089
> chisq.test(CEREALIER, p = Poisson)

Chi-squared test for given probabilities

data: CEREALIER
X-squared = 3.0603, df = 9, p-value = 0.9619
```

FIGURE 4.6 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type CEREALIER

Le test de Khi-Deux indique que :

$$\chi^2 = 3,0603 \leq \chi_{(9)}^{0,05} = 16,92, \quad \text{et} \quad p - \text{value} = 0,9619 > 0,05.$$

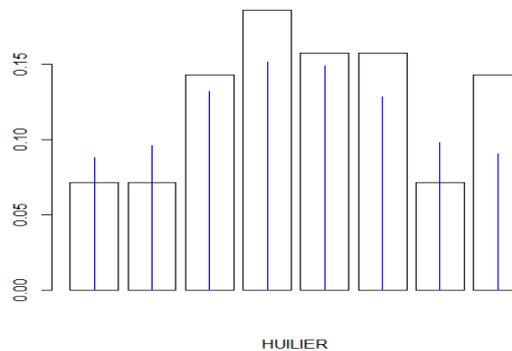
**Conclusion** : On accepte alors l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire le processus d'arrivée des navires de type CEREALIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda_{Cer} = 9,64$  Navires/Mois.

### 4.1.7 Loi d'arrivée des navires de type HUILIER

Nous avons recensés durant la période considérée 482 Navires de type HUILIER. Le traitement des données concernant ces navires nous donne les résultats suivants :

$X_i$	Effectifs observés $O_k$	$P(X = k)$	Effectifs théoriques $E_k$	$(O_k - E_k)^2$	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
$\leq 3$	5	0,087921044	6,154473079	1,332808091	0,216559253
4	5	0,095754024	6,702781664	2,899465396	0,432576435
5	10	0,13186697	9,230687892	0,59184112	0,064116686
6	13	0,151333046	10,59331325	5,792141126	0,546773327
7	11	0,148862303	10,42036119	0,335981145	0,032242754
8	11	0,128127911	8,968953742	4,125148901	0,459936468
9	5	0,09802802	6,861961434	3,466900384	0,505234606
$\geq 10$	10	0,158106682	11,06746775	1,13948739	0,102958275
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>C (obs)</b>	<b>2,360397804</b>

TABLE 4.7 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type HUILIER



Le diagramme nous donne une première impression que la loi d'arrivée des navires de type HUILIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 6,88$  Navires/mois.

**Le test de KHI-DEUX :**

$H_0$  : " Le processus d'arrivée des navires de type HUILIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 6,88$  Navires/Mois".

$H_1$  : " Le processus d'arrivée des navires de type HUILIER ne suit pas une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 6,88$  Navires/Mois ".

```
> HUILIER = c(5,5, 10, 13, 11, 11, 5, 10)
> Lambda = 6.885714286
> Poisson = c(ppois(3, Lambda), dpois(4:9, Lambda), 1 - ppois(9, Lambda))
> Poisson
[1] 0.08792104 0.09575402 0.13186697 0.15133305 0.14886230 0.12812791 0.09802802
[8] 0.15810668
> chisq.test(HUILIER, p = Poisson)

Chi-squared test for given probabilities

data: HUILIER
X-squared = 2.3604, df = 7, p-value = 0.9372
```

FIGURE 4.7 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type HUILIER

Le test de Khi-Deux indique que :

$$\chi^2 = 2,3604 \leq \chi_{(7)}^{0,05} = 14,07, \quad \text{et} \quad p - \text{value} = 0,9372 > 0,05.$$

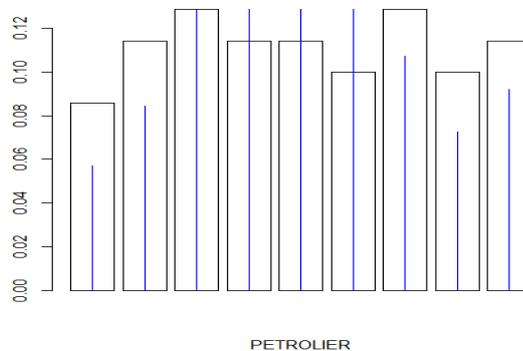
**Conclusion** : On accepte alors l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire le processus d'arrivée des navires de type HUILIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda_{Huiler} = 6,88 \text{ Navires/Mois}$ .

#### 4.1.8 Loi d'arrivée des navires de type PETROLIER

Nous avons recensés durant la période considérée 428 Navires de type PETROLIER. Le traitement des données concernant ces navires nous donne les résultats suivants :

$X_i$	Effectifs observés $O_k$	$P(X = k)$	Effectifs théoriques $E_k$	$(O_k - E_k)^2$	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
$\leq 2$	6	0,057059646	3,994175249	4,023332931	1,007300051
3	8	0,084233605	5,896352381	4,425333307	0,750520495
4	9	0,128757083	9,012995782	0,00016889	1,87385E-05
5	8	0,157451518	11,02160627	9,130104452	0,828382382
6	8	0,160450595	11,23154163	10,44286129	0,929779868
7	7	0,140148683	9,810407789	7,898391941	0,805103326
8	9	0,107113636	7,497954524	2,25614061	0,300900813
9	7	0,072769264	5,093848471	3,633413653	0,713294413
$\geq 10$	8	0,09201597	6,441117907	2,430113381	0,377281307
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>C (obs)</b>	<b>5,712581392</b>

TABLE 4.8 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type PETROLIER



Le diagramme nous donne une première impression que la loi d'arrivée des navires de type PETROLIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 6,11 \text{ Navires/mois}$ .

#### Le test de KHI-DEUX :

$H_0$  : " Le processus d'arrivée des navires de type PETROLIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 6,11 \text{ Navires/Mois}$ ".

$H_1$  : " Le processus d'arrivée des navires de type PETROLIER ne suit pas une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 6,11 \text{ Navires/Mois}$ ".

Le test de Khi-Deux indique que :

$$\chi^2 = 5,7126 \leq \chi_{(8)}^{0,05} = 15,51, \quad \text{et} \quad p\text{-value} = 0,6794 > 0,05.$$

```

> PETROLIER = c(6, 8, 9, 8, 8, 7, 9, 7, 8)
> Lambda = 6.114285714
> Poisson = c(ppois(2, Lambda), dpois(3:9, Lambda), 1 - ppois(9, Lambda))
> Poisson
[1] 0.05705965 0.08423361 0.12875708 0.15745152 0.16045059 0.14014868 0.10711364
[8] 0.07276926 0.09201597
> chisq.test(PETROLIER, p = Poisson)

Chi-squared test for given probabilities

data: PETROLIER
X-squared = 5.7126, df = 8, p-value = 0.6794
    
```

FIGURE 4.8 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type PETROLIER

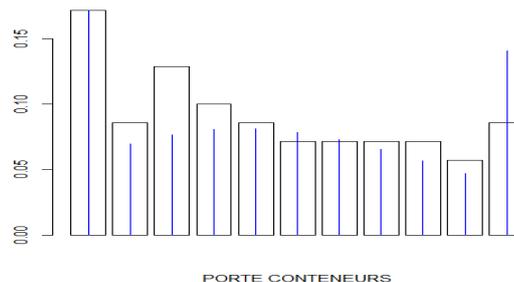
**Conclusion** : On accepte alors l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire le processus d'arrivée des navires de type PETROLIER suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda_{Petr} = 6,11$  Navires/Mois.

#### 4.1.9 Loi d'arrivée des navires de type PORTE-CONTENEURS

Nous avons recensés durant la période considérée 1693 Navires de type PORTE-CONTENEURS. Le traitement des données concernant ces navires nous donne les résultats suivants :

$X_i$	Effectifs observés $O_k$	$P(X = k)$	Effectifs théoriques $E_k$	$(O_k - E_k)^2$	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
$\leq 20$	12	0,231233868	16,18637078	17,52570027	1,082744274
21	6	0,069609917	4,872694159	1,270818458	0,260804068
22	9	0,076525707	5,356799488	13,27290997	2,477768675
23	7	0,080470821	5,632957474	1,868805267	0,331762715
24	6	0,081093512	5,676545836	0,104622596	0,018430679
25	5	0,07845218	5,491652628	0,241722307	0,044016314
26	5	0,07297777	5,108443901	0,01176008	0,002302086
27	5	0,065371092	4,575976468	0,179795956	0,039291276
28	5	0,056465949	3,952616408	1,097012388	0,277540817
29	4	0,047092045	3,296443143	0,494992252	0,150159499
$\geq 30$	6	0,140707139	9,849499718	14,81864808	1,504507691
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>C (obs)</b>	<b>6,189328096</b>

TABLE 4.9 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type PORTE-CONTENEURS



Le diagramme nous donne une première impression que la loi d'arrivée des navires de type PORTE-CONTENEURS suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 24,18$  Navires/mois.

**Le test de KHI-DEUX :**

$H_0$  : " Le processus d'arrivée des navires de type PORTE-CONTENEURS suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 24,18$  Navires/Mois".

$H_1$  : " Le processus d'arrivée des navires de type PORTE-CONTENEURS ne suit pas une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 24,18$  Navires/Mois ".

```
> PORTECONTENEURS =c(12, 6, 9, 7, 6, 5, 5, 5, 5, 4, 6)
> Lambda = 24.18571429
> Poisson = c(ppois(20, Lambda), dpois(21:29, Lambda), 1 - ppois(29, Lambda))
> Poisson
 [1] 0.23123387 0.06960992 0.07652571 0.08047082 0.08109351 0.07845218
 [7] 0.07297777 0.06537109 0.05646595 0.04709204 0.14070714
> chisq.test(PORTECONTENEURS, p = Poisson)

Chi-squared test for given probabilities

data: PORTECONTENEURS
X-squared = 6.1893, df = 10, p-value = 0.7991
```

FIGURE 4.9 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type PORTE-CONTENEURS

Le test de Khi-Deux indique que :

$$\chi^2 = 6,1893 \leq \chi_{(10)}^{0,05} = 18,31, \quad \text{et} \quad p - \text{value} = 0,7991 > 0,05.$$

**Conclusion :** On accepte alors l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire le processus d'arrivée des navires de type PORTE-CONTENEURS suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda_{Cont} = 24,18$  Navires/Mois.

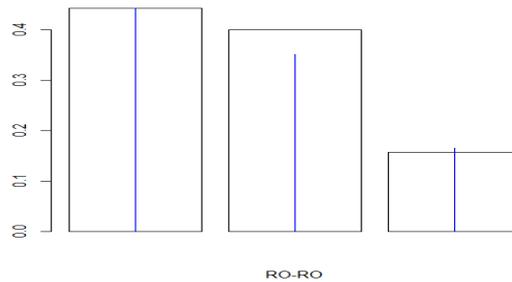
**4.1.10 Loi d'arrivée des navires de type RO-RO**

Nous avons recensés durant la période considérée 51 Navires de type RO-RO. Le traitement des données concernant ces navires nous donne les résultats suivants :

$X_i$	Effectifs observés $O_k$	$P(X = k)$	Effectifs théoriques $E_k$	$(O_k - E_k)^2$	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
0	31	0,482597923	33,78185464	7,738715259	0,229079053
1	28	0,351607059	24,6124941	11,47519624	0,466234596
$\geq 2$	11	0,165795018	11,60565126	0,366813447	0,031606451
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>C (obs)</b>	<b>0,726920099</b>

TABLE 4.10 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type RO-RO

Le diagramme nous donne une première impression que la loi d'arrivée des navires de type RO-RO suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 0,72$  Navires/mois.



**Le test de KHI-DEUX :**

$H_0$  : " Le processus d'arrivée des navires de type RO-RO suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 0,72$  Navires/Mois".

$H_1$  : " Le processus d'arrivée des navires de type RO-RO ne suit pas une loi Poisson de paramètre  $\lambda = 0,72$  Navires/Mois ".

```
> RORO = c(31, 28, 11)
> Lambda = 0.728571429
> Poisson = c(dpois(0:1, Lambda), 1 - ppois(1, Lambda))
> Poisson
[1] 0.4825979 0.3516071 0.1657950
> chisq.test(RORO, p = Poisson)

Chi-squared test for given probabilities

data: RORO
X-squared = 0.72692, df = 2, p-value = 0.6953
```

FIGURE 4.10 – Estimation de la loi d'arrivée des navires de type RO-RO

Le test de Khi-Deux indique que :

$$\chi^2 = 0,72692 \leq \chi_{(2)}^{0,05} = 18,31, \quad \text{et} \quad p - \text{value} = 0,6953 > 0,05.$$

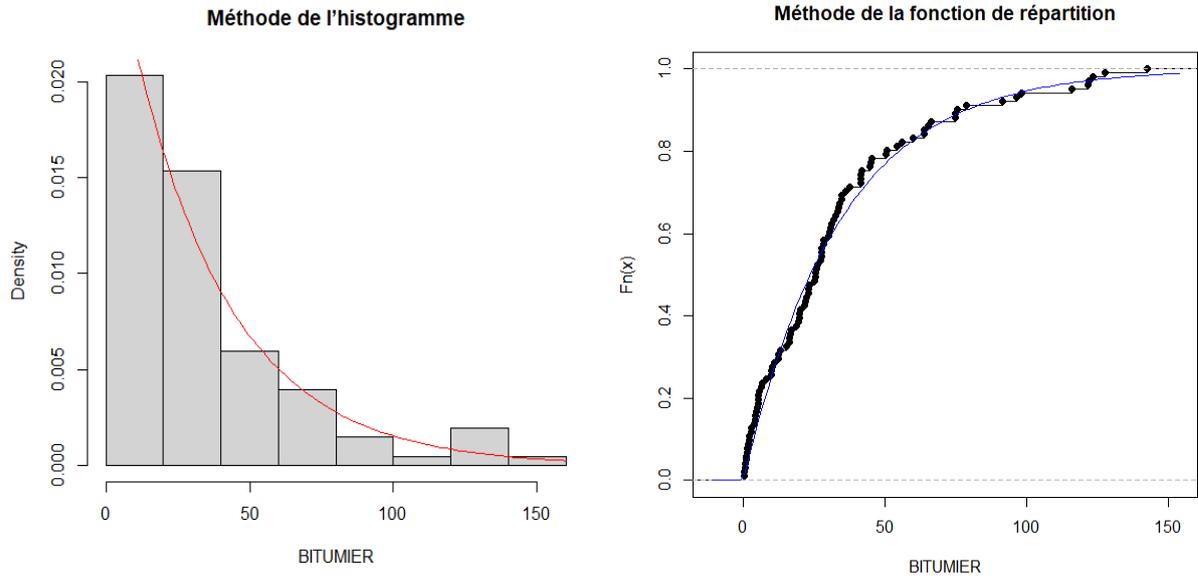
**Conclusion :** On accepte alors l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire le processus d'arrivée des navires de type RO-RO suit une loi Poisson de paramètre  $\lambda_{roro} = 0,72$  Navires/Mois.

## 4.2 Section 02 : Estimation des différentes lois de service des navires

Dans cette section on cherche à estimer les durées d'attente pour chaque type de navire selon une loi Exponentielle et ce en utilisant certains outils statistiques tels que la méthode de l'histogramme et la méthode de la fonction de répartition ainsi que le test statistique de KOLMOGOROV-SMIRNOV.

### 4.2.1 Loi de service des navires de type BITUMIER

On a fait le suivi de 101 navires de type BITUMIER à partir de 2017 jusqu'au mois d'octobre 2022, et on a obtenu les résultats ci-dessus :



L'histogramme et la fonction de répartition ressemble à la courbe de loi exponentielle ;

**Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV :**

$H_0$  : " La durée de service des navires de type BITUMIER suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/34,10$  Navires/heure".

$H_1$  : " La durée de service des navires de type BITUMIER ne suit pas une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/34,10$  Navires/heure".

```
> ks.test(BITUMIER, "pexp", 1/34.10)

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: BITUMIER
D = 0.0621, p-value = 0.8309
alternative hypothesis: two-sided
```

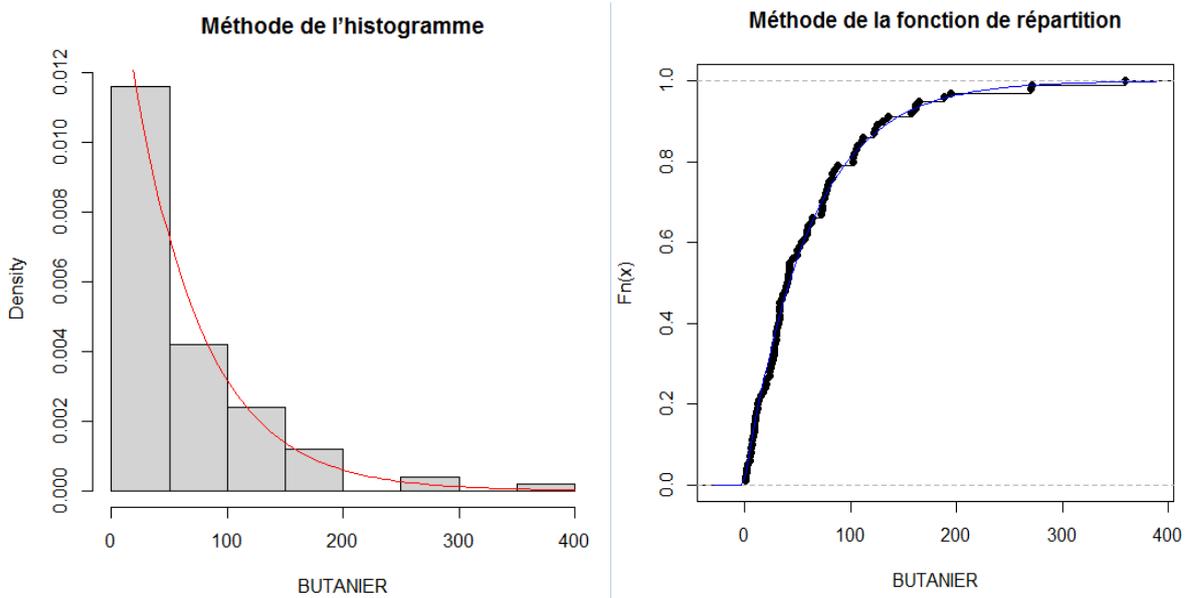
Le test de kolmogorov-Smirnov indique que :

$$D = 0,0621 < T^{(k)} = D_{101}^{(0,05)} = 0,136, \quad \text{et } p - \text{value} = 0,8309 > 0,05.$$

Donc l'hypothèse  $H_0$  est validée sur le plan statistique et cela signifie que la durée de service des navires de type BITUMIER suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/34,10$  Navires/heure.

**4.2.2 Loi de service des navires de type BUTANIER**

On a sélectionné un échantillon de 100 parmi 213 navires de type BUTANIER enregistrés durant l'année 2017 jusqu'au mois d'octobre 2022, et on a obtenu les résultats suivants :



L'histogramme et la fonction de répartition montrent qu'ils suivent la même tendance que la courbe de la loi exponentielle ;

**Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV :**

$H_0$  : " La durée de service des navires de type BUTANIER suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/60,20$  Navires/heure".

$H_1$  : " La durée de service des navires de type BUTANIER ne suit pas une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/60,20$  Navires/heure".

```
> ks.test(BUTANIER, "pexp", 1/60.20)

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: BUTANIER
D = 0.0692, p-value = 0.7245
alternative hypothesis: two-sided
```

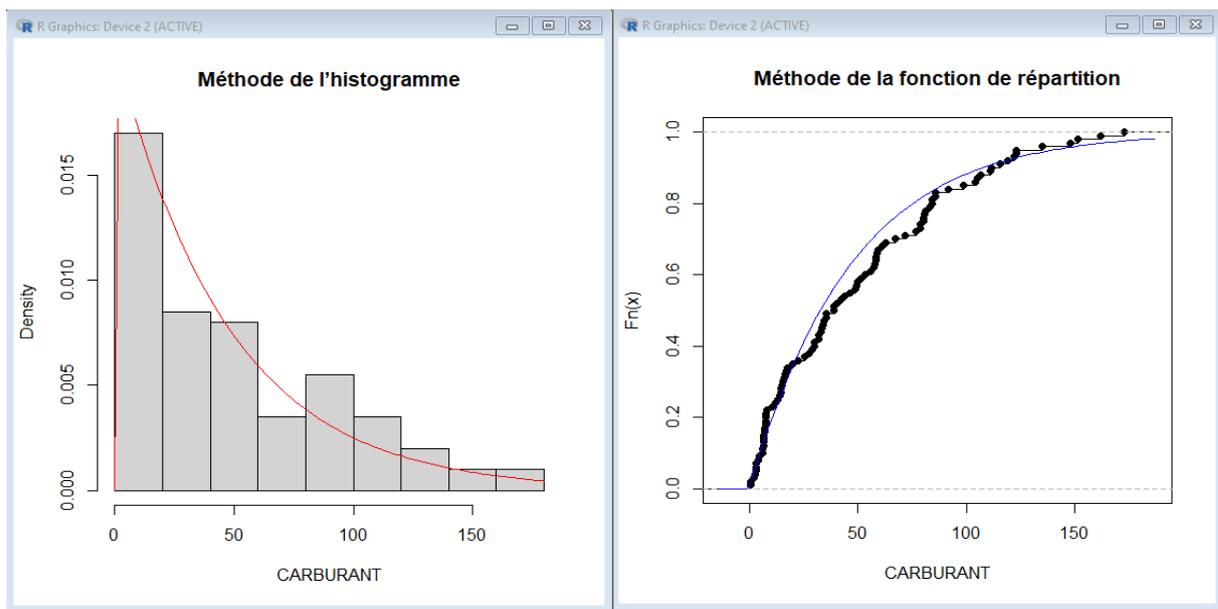
Le test de kolmogorov-Smirnov indique que :

$$D = 0,0692 < T^{(k)} = D_{100}^{(0,05)} = 0,136, \quad \text{et } p - \text{value} = 0,7245 > 0,05.$$

Donc l'hypothèse  $H_0$  est validée sur le plan statistique et cela signifie que la durée de service des navires BUTANIER suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/60,20$  Navires/heure.

**4.2.3 Loi de service des navires de type CARBURANT**

On a fait le suivi des durées de service de 100 navires de type CARBURANT parmi 508 navires enregistrés au cours de l'année 2017 jusqu'à octobre 2022, et on a obtenu les résultats suivants :



L'histogramme et la fonction de répartition montrent qu'ils ressemblent à la courbe de la loi exponentielle ;

#### Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV :

$H_0$  : " La durée de service des navires de type CARBURANT suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/46,90$  Navires/heure".

$H_1$  : " La durée de service des navires de type CARBURANT ne suit pas une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/46,90$  Navires/heure".

```
> ks.test(CARBURANT, "pexp", 1/46.90)

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: CARBURANT
D = 0.099079, p-value = 0.28
alternative hypothesis: two-sided
```

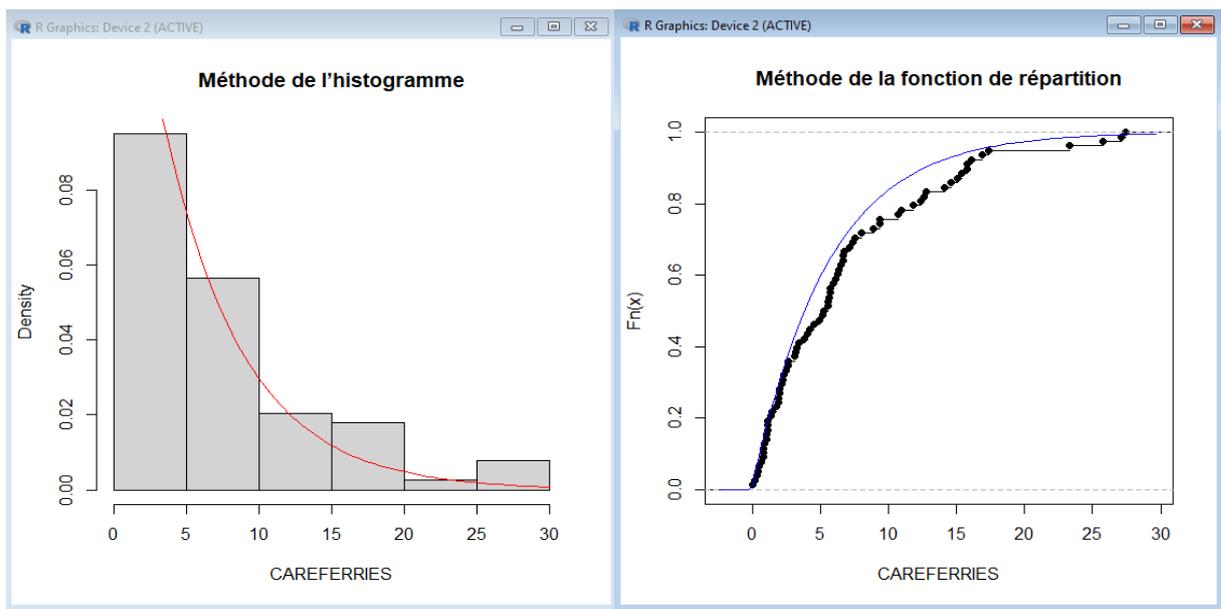
Le test de kolmogorov-Smirnov indique que :

$$D = 0,099079 < T^{(k)} = D_{100}^{(0,05)} = 0,136, \quad \text{et } p\text{-value} = 0,28 > 0,05.$$

Donc on accepte  $H_0$ , cela signifie que la durée de service des navires de type CARBURANT suit une loi exponentielle d'une moyenne  $\mu = 1/46,90$  Navires/heure.

#### 4.2.4 Loi de service des navires de type CAR-FERRIES

Les données collectées nous montrent l'absence totale des navire de type CAR-FERRIES durant la période 2020 et 2021, en raison de la crise du " COVID-19 ". Le suivi des 78 navires de type CAR-FERRIES enregistrés à partir de l'année 2017 jusqu'au mois d'octobre 2022, nous donne les résultats suivants :



L'histogramme et la fonction de répartition suivent la même tendance que la courbe de la loi exponentielle ;

#### Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV :

$H_0$  : " La durée de service des navires de type CAR-FERRIES suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/6$  Navires/heure".

$H_1$  : " La durée de service des navires de type CAR-FERRIES ne suit pas une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/6$  Navires/heure".

```
> ks.test(CAREFERRIES, "pexp", 1/6)

Exact one-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: CAREFERRIES
D = 0.10692, p-value = 0.3119
alternative hypothesis: two-sided
```

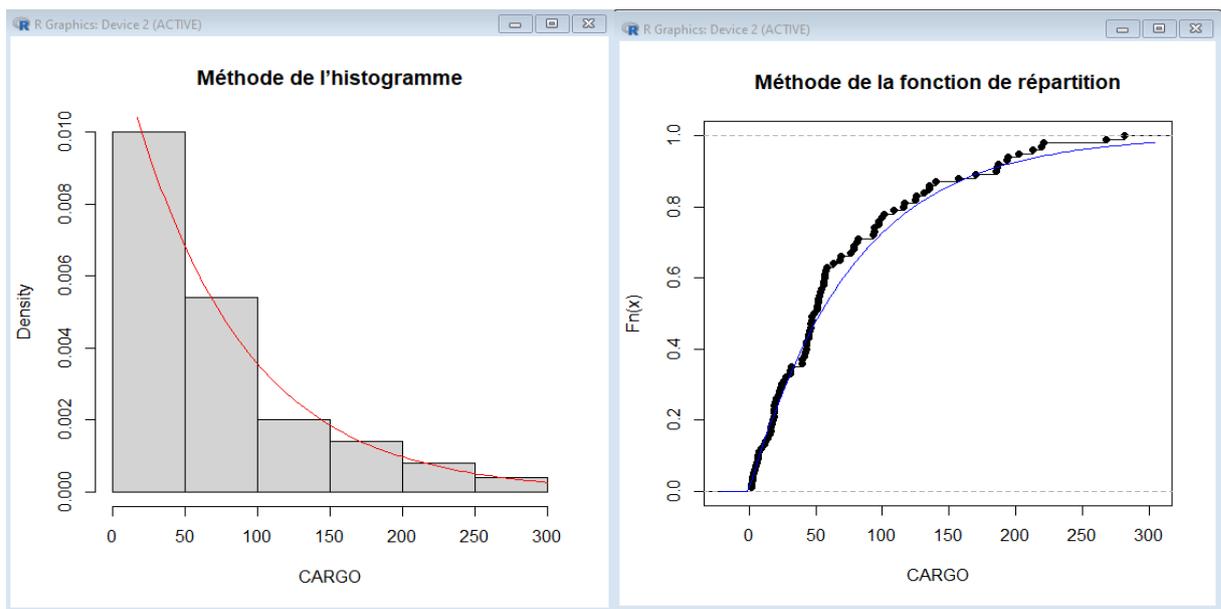
Le test de kolmogorov-Smirnov indique que :

$$D = 0,10692 < T^{(k)} = D_{100}^{(0,05)} = 0,136, \quad \text{et } p\text{-value} = 0,3119 > 0,05.$$

Donc on accepte  $H_0$ , cela signifie que la durée de service des navires de type CAR-FERRIES suit une loi exponentielle d'une moyenne  $\mu = 1/6$  Navires/heure.

#### 4.2.5 Loi de service des navires de type CARGO

On a sélectionné un échantillon de 100 parmi 1993 navires de type CARGO enregistrés durant l'année 2017 jusqu'au mois d'octobre 2022, et on a trouver les résultats suivants :



L'histogramme et la fonction de répartition suit la même tendance que la courbe de la loi exponentielle ;

#### Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV :

$H_0$  : " La durée de service des navires de type CARGO suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/77$  Navires/heure".

$H_1$  : " La durée de service des navires de type CARGO ne suit pas une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/77$  Navires/heure".

```
> ks.test(CARGO, "pexp", 1/77)

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: CARGO
D = 0.097806, p-value = 0.2943
alternative hypothesis: two-sided
```

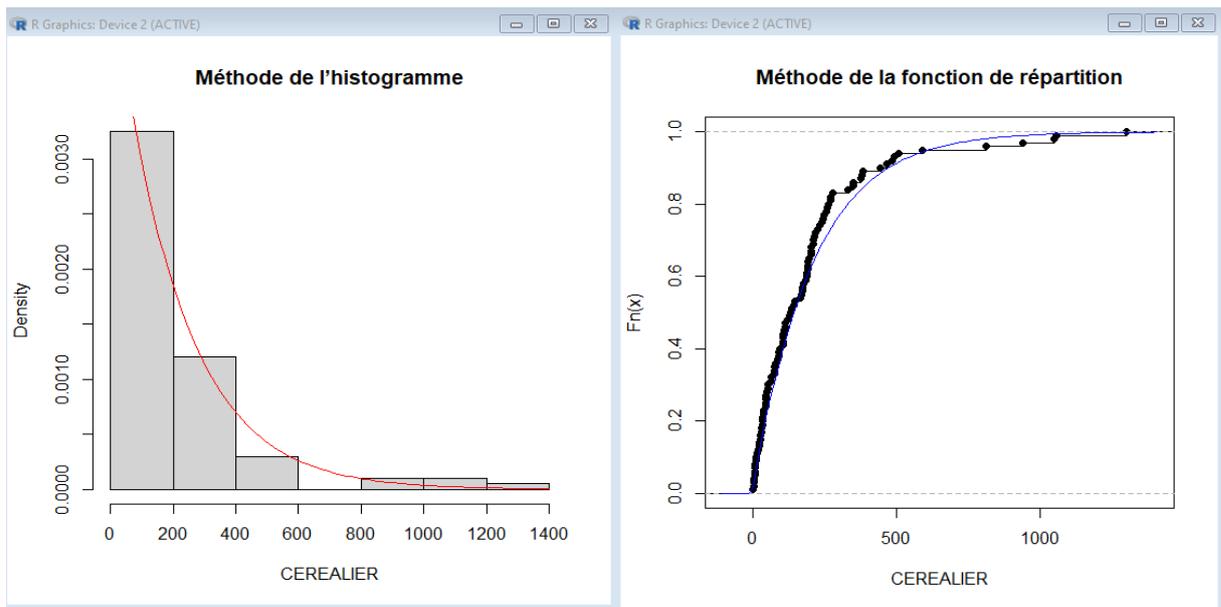
Le test de kolmogorov-Smirnov indique que :

$$D = 0,097806 < T^{(k)} = D_{100}^{(0,05)} = 0,136, \quad \text{et } p\text{-value} = 0,2943 > 0,05.$$

Donc on accepte  $H_0$ , cela signifie que la durée de service des navires de type CARGO suit une loi exponentielle d'une moyenne  $\mu = 1/77$  Navires/heure.

#### 4.2.6 Loi de service des navires de type CEREALIER

On a fait le suivi de 100 parmi 675 navires de type CEREALIER à partir de l'année 2017 jusqu'au mois d'octobre 2022, on a obtenu les résultats suivants :



L'histogramme et la fonction de répartition ressemble à la courbe de la loi exponentielle;

#### Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV :

$H_0$  : " La durée de service des navires de type *CEREALIER* suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/205,63$  Navires/heure".

$H_1$  : " La durée de service des navires de type *CEREALIER* ne suit pas une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/205,63$  Navires/heure".

```
> ks.test(CEREALIER, "pexp", 1/205.63)

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: CEREALIER
D = 0.089901, p-value = 0.3941
alternative hypothesis: two-sided
```

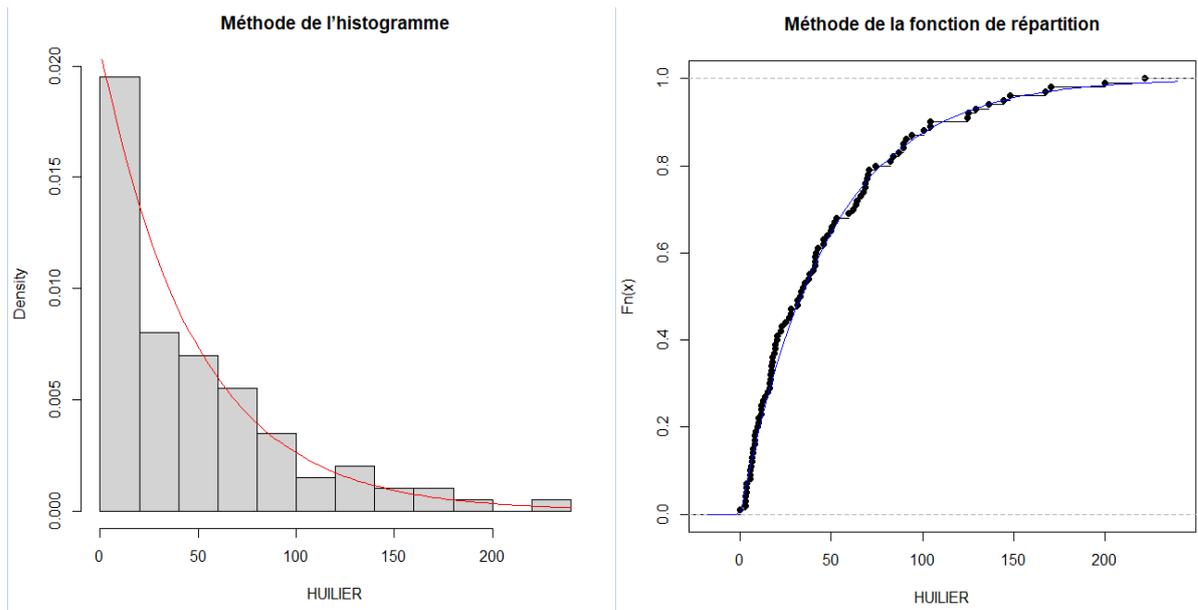
Le test de kolmogorov-Smirnov indique que :

$$D = 0,089901 < T^{(k)} = D_{100}^{(0,05)} = 0,136, \quad \text{et } p\text{-value} = 0,3941 > 0,05.$$

Donc on accepte  $H_0$ , cela signifie que la durée de service des navires de type *CEREALIER* suit une loi exponentielle d'une moyenne  $\mu = 1/205,63$  Navires/heure.

#### 4.2.7 Loi de service des navires de type HUILIER

On a pris le suivi d'un échantillon de 100 parmi 482 navires de type *HUILIER* à partir de l'année 2017 jusqu'à l'année 2022, et on a trouvé les résultats suivants :



On constate que l'histogramme et la fonction de répartition suit une même tendance que la courbe de la loi exponentielle ;

**Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV :**

$H_0$  : " La durée de service des navires de type HUILIER suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/48,10$  Navires/heure".

$H_1$  : " La durée de service des navires de type HUILIER ne suit pas une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/48,10$  Navires/heure".

```
> ks.test(HUILIER, "pexp", 1/48.10)

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: HUILIER
D = 0.063467, p-value = 0.8153
alternative hypothesis: two-sided
.
```

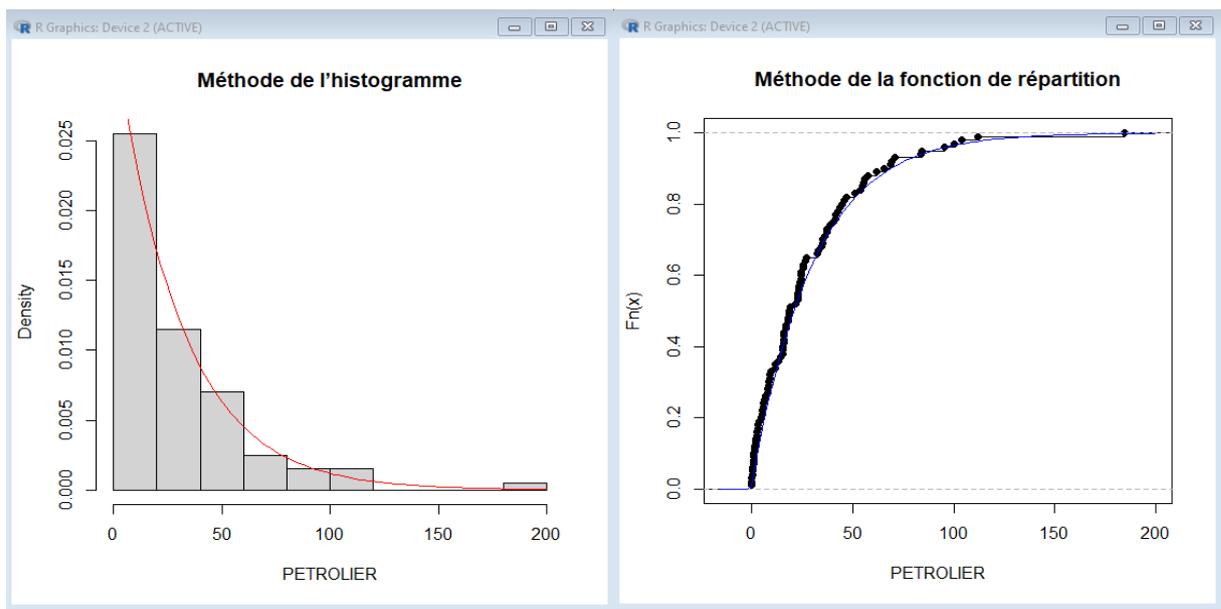
Le test de kolmogorov-Smirnov indique que :

$$D = 0,063467 < T^{(k)} = D_{100}^{(0,05)} = 0,136, \quad \text{et } p - \text{value} = 0,8153 > 0,05.$$

Donc on accepte  $H_0$ , cela signifie que la durée de service des navires de type HUILIER suit une loi exponentielle d'une moyenne  $\mu = 1/48,10$  Navires/heure.

**4.2.8 Loi de service des navires de type PETROLIER**

On a pris le suivi d'un échantillon de 100 navires parmi 428, de type PETROLIER à partir de l'année 2017 jusqu'au mois d'octobre 2022, et on a obtenu les résultats suivants :



L'histogramme et la fonction de répartition ressemblent à la courbe de la loi exponentielle;

#### Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV :

$H_0$  : " La durée de service des navires de type *PETROLIER* suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/30$  Navires/heure".

$H_1$  : " La durée de service des navires de type *PETROLIER* ne suit pas une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/30$  Navires/heure".

```
> ks.test(PETROLIER, "pexp", 1/30)

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test

data:  PETROLIER
D = 0.071119, p-value = 0.6925
alternative hypothesis: two-sided
```

Le test de kolmogorov-Smirnov indique que :

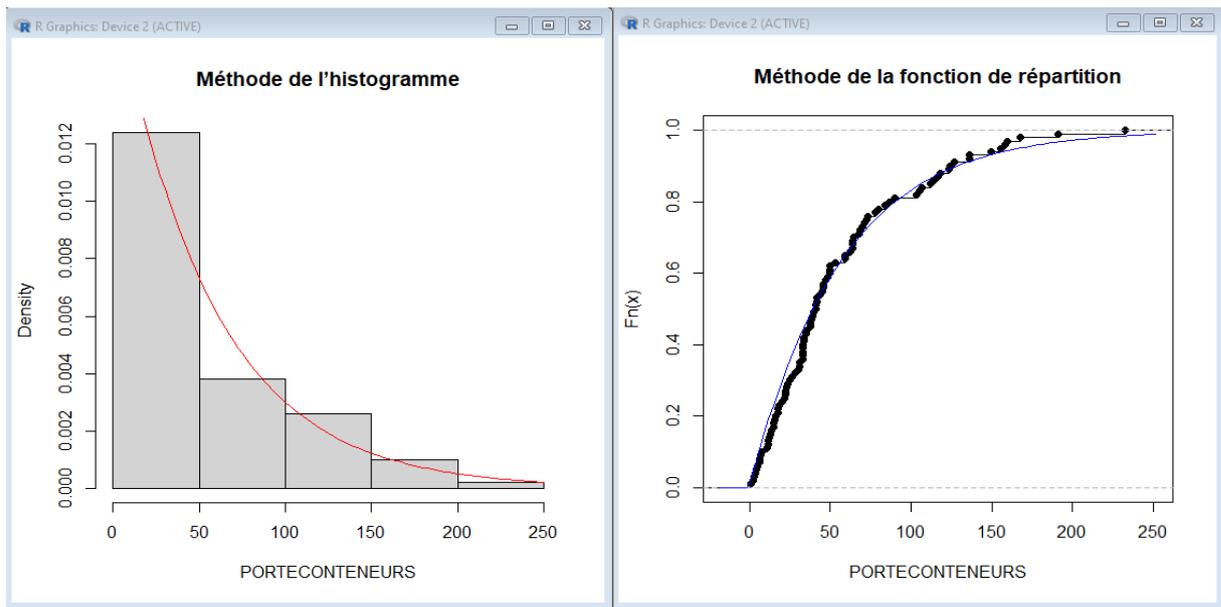
$$D = 0,071119 < T^{(k)} = D_{100}^{(0,05)} = 0,136, \quad \text{et } p\text{-value} = 0,6925 > 0,05.$$

Donc on accepte  $H_0$ , cela signifie que la durée de service des navires de type *PETROLIER* suit une loi exponentielle d'une moyenne  $\mu = 1/30$  Navires/heure.

#### 4.2.9 Loi de service des navires de type PORTE-CONTENEURS

On a sélectionné 100 navires parmi 1693, de type *PORTE-CONTENEURS* et on a trouvé les résultats suivants :

## Chapitre 04 : Évaluation des performances d'un système de file d'attente au sein de l'EPB



On constate que l'histogramme et la fonction de répartition suit la même tendance que la courbe de la loi exponentielle ;

### Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV :

$H_0$  : " La durée de service des navires de type *PORTE-CONTENEURS* suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/56.05$  Navires/heure".

$H_1$  : " La durée de service des navires de type *PORTE-CONTENEURS* ne suit pas une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/56.05$  Navires/heure".

```
> ks.test(PORTECONTENEURS, "pexp", 1/56.05)

Asymptotic one-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: PORTECONTENEURS
D = 0.098673, p-value = 0.2845
alternative hypothesis: two-sided
```

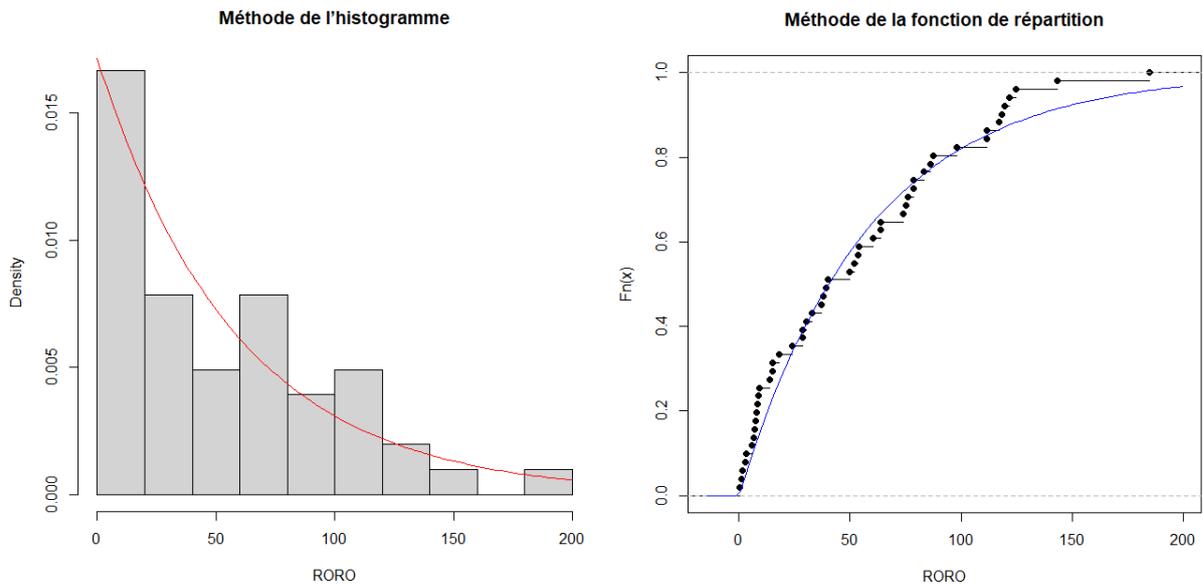
Le test de kolmogorov-Smirnov indique que :

$$D = 0,098673 < T^{(k)} = D_{100}^{(0,05)} = 0,136, \quad \text{et } p - \text{value} = 0,2845 > 0,05.$$

Donc on accepte  $H_0$ , cela signifie que la durée de service des navires de type *PORTE-CONTENEURS* suit une loi exponentielle d'une moyenne  $\mu = 1/56.05$  Navires/heure.

### 4.2.10 Loi de service des navires de type RO/RO

On fait une estimation de 51 navires durant l'année 2017 jusqu'au mois d'octobre 2022, et on a obtenu les résultats suivants :



L'histogramme et la fonction de répartition ressemble à la courbe de la loi exponentielle ;

**Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV :**

$H_0$  : " La durée de service des navires de type RORO suit une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/58.30$  Navires/heure".

$H_1$  : " La durée de service des navires de type RORO ne suit pas une loi exponentielle de paramètre  $\mu = 1/58.30$  Navires/heure".

```
> ks.test(RORO, "pexp", 1/58.30)

Exact one-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: RORO
D = 0.11105, p-value = 0.5195
alternative hypothesis: two-sided
.
```

Le test de kolmogorov-Smirnov indique que :

$$D = 0,11105 < T^{(k)} = D_{100}^{(0,05)} = 0,136, \quad \text{et } p - \text{value} = 0,5195 > 0,05.$$

Donc on accepte  $H_0$ , cela signifie que la durée de service des navires de type RORO suit une loi exponentielle d'une moyenne  $\mu = 1/58.30$  Navires/heure.

### 4.3 Modèle Proposé

En analysant les lois d'arrivées et lois de service de chaque type de navire et tenant compte des spécificités de chaque poste à quai, nous proposons dans cette section un nouveau modèle d'affectation des navires aux postes à quai. Ce modèle consiste à répartir

les navires par classes et spécifier ensuite les postes à quai réservés pour chaque classe ainsi que le modèle de files d'attente adéquat.

Nous avons retenu 06 Classes différentes réparties comme suit :

- **Classe 01** : Regroupe les navires de type BITUMIER et CARBURANT.
- **Classe 02** : Regroupe les navires de type BUTANIER et HUILIER.
- **Classe 03** : Regroupe les navires de Type CARGO et RORO.
- **Classe 04** : Regroupe les navires de type CEREALIER et CAR-FERRIES.
- **Classe 05** : Navires de type PETROLIER.
- **Classe 06** : Navires de type PORTE CONTENEURS.

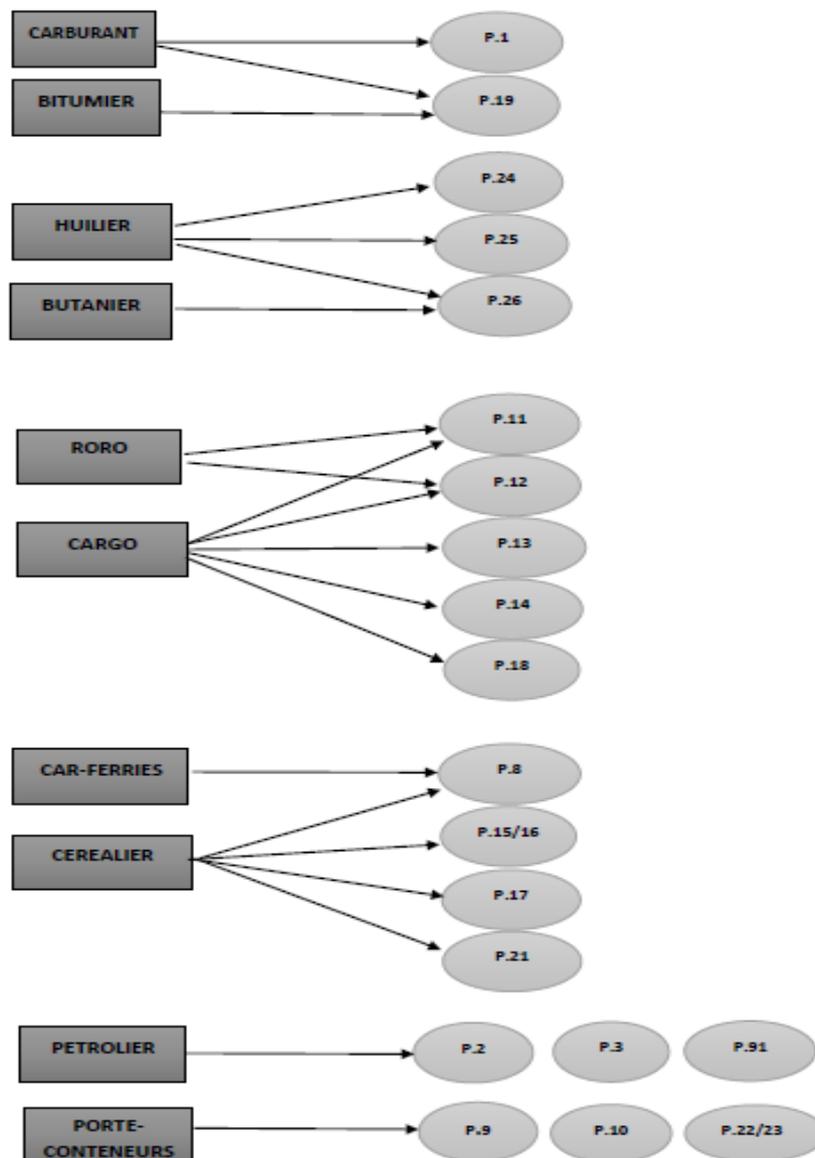


FIGURE 4.11 – Le nouveau modèle l'affectation des navires

## Classe 01 : Navires de type BITUMIER et CARBURANT

Cette classe regroupe les navires de type BITUMIER et CARBURANT, où les navires de cette classe seront affectés au postes à quai 01 et 19 (02 Postes à quai) avec une priorité accordée aux navires de type BITUMIER. Les navires BITUMIER sont systématiquement dirigés vers le poste 19, tandis que l'affectation des navires CARBURANT déterminée en fonction du type de marchandise qu'ils transportent.

Le modèle de files d'attente qui décrit adéquatement cette classe est M/M/2 tel que :

- Pour les navires de type BITUMIER :

Les navires de type BITUMIER arrivent selon un processus de Poisson de paramètre :

$$\lambda_{Bit} = 1,44 \text{ Navires/Mois} = 0,0480 \text{ Navires /Jour.}$$

La durée de service des navires de type BITUMIER suit une loi exponentielle de moyenne :

$$\frac{1}{\mu} = 34,1 \text{ Heures/Navire} = 1,4208 \text{ Jours/navire} \Rightarrow \mu = 0,7038 \text{ Navires/Jour.}$$

Les paramètres de performance pour ce type de navires sont donnés comme suit :

- ✓ Durée Moyenne d'attente :

$$\bar{T}_F = 0,1040 \text{ Jours /Navire} = 2,4959 \text{ Heures/Navire.}$$

- ✓ Durée Moyenne de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = 1,5146 \text{ Jours /Navire} = 36,3504 \text{ Heures/Navire.}$$

- Pour les navires de type CARBURANT :

Les navires de type CARBURANT arrivent selon un processus de Poisson de paramètre :

$$\lambda_{Carb} = 7,25 \text{ Navires/Mois} = 0,2417 \text{ Navires /Jour.}$$

La durée de service des navires de type CARBURANT suit une loi exponentielle de moyenne :

$$\frac{1}{\mu} = 46,9 \text{ Heures/Navire} = 1,9542 \text{ Jours/navire} \Rightarrow \mu = 0,5117 \text{ Navires/Jour.}$$

Les paramètres de performance pour ce type de navires sont donnés comme suit :

- ✓ Durée Moyenne d'attente :

$$\bar{T}_F = 1,1654 \text{ Jours /Navire} = 27,9696 \text{ Heures/Navire.}$$

- ✓ Durée Moyenne de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = 3,0158 \text{ Jours /Navire} = 72,3792 \text{ Heures/Navire.}$$

## Classe 02 : Navires de type BUTANIER et HUILIER

Cette classe regroupe les navires de type BUTANIER et HUILIER, où les navires de cette classe seront affectés aux postes à quai 24, 25 et 26 (03 Postes à quai) avec une priorité accordée aux navires de type BUTANIER. Les navires BUTANIER sont systématiquement dirigés vers le poste 26, tandis que les navires HUILIER seront affectés aux postes 24, 25 et 26 s'il n'est pas occupé.

Le modèle de files d'attente qui décrit adéquatement cette classe est M/M/3 tel que :

- Pour les navires de type BUTANIER :

Les navires de type BUTANIER arrivent selon un processus de Poisson de paramètre :

$$\lambda_{But} = 3,04 \text{ Navires/Mois} = 0,1013 \text{ Navires /Jour.}$$

La durée de service des navires de type BUTANIER suit une loi exponentielle de moyenne :

$$\frac{1}{\mu} = 60,2 \text{ Heures/Navire} = 2,5083 \text{ Jours/navire} \Rightarrow \mu = 0,3987 \text{ Navires/Jour.}$$

Les paramètres de performance pour ce type de navires sont donnés comme suit :

- ✓ Durée Moyenne d'attente :

$$\bar{T}_F = 0,8548 \text{ Jours /Navire} = 20,5163 \text{ Heures/Navire.}$$

- ✓ Durée Moyenne de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = 3,3632 \text{ Jours /Navire} = 80,7163 \text{ Heures/Navire.}$$

- Pour les navires de type HUILIER :

Les navires de type HUILIER arrivent selon un processus de Poisson de paramètre :

$$\lambda_{Huil} = 6,88 \text{ Navires/Mois} = 0,2293 \text{ Navires /Jour.}$$

La durée de service des navires de type HUILIER suit une loi exponentielle de moyenne :

$$\frac{1}{\mu} = 48,1 \text{ Heures/Navire} = 2,0042 \text{ Jours/navire} \Rightarrow \mu = 0,4990 \text{ Navires/Jour.}$$

Les paramètres de performance pour ce type de navires sont donnés comme suit :

- ✓ Durée Moyenne d'attente :

$$\bar{T}_F = 0,1439 \text{ Jours /Navire} = 3,4535 \text{ Heures/Navire.}$$

- ✓ Durée Moyenne de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = 2,1439 \text{ Jours /Navire} = 51,4535 \text{ Heures/Navire.}$$

### Classe 03 : Navires de type GARGO et RORO

Cette classe regroupe les navires de type GARGO et RORO, où les navires de cette classe seront affectés au postes à quai 11, 12, 13, 14 et 18 (05 Postes à quai) avec une priorité accordée aux navires de type RORO. Les navires RORO sont systématiquement dirigés vers le poste 11 et 12 (en même temps), tandis que les navires CARGO seront affectés aux postes 13, 14, 18 ainsi aux postes 11 et 12 s'ils ne sont pas occupés.

Le modèle de files d'attente qui décrit adéquatement cette classe est M/M/5 tel que :

- Pour les navires de type RORO :

Les navires de type RORO arrivent selon un processus de Poisson de paramètre :

$$\lambda_{roro} = 0,72 \text{ Navires/Mois} = 0,0240 \text{ Navires /Jour.}$$

La durée de service des navires de type RORO suit une loi exponentielle de moyenne :

$$\frac{1}{\mu} = 58,3 \text{ Heures/Navire} = 2,4292 \text{ Jours/navire} \Rightarrow \mu = 0,4117 \text{ Navires/Jour.}$$

Les paramètres de performance pour ce type de navires sont donnés comme suit :

- ✓ Durée Moyenne d'attente :

$$\bar{T}_F = 0,1504 \text{ Jours /Navire} = 3,6093 \text{ Heures/Navire.}$$

- ✓ Durée Moyenne de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = 2,5796 \text{ Jours /Navire} = 61,9093 \text{ Heures/Navire.}$$

- Pour les navires de type GARGO :

Les navires de type GARGO arrivent selon un processus de Poisson de paramètre :

$$\lambda_{Cargo} = 28,47 \text{ Navires/Mois} = 0,9490 \text{ Navires /Jour.}$$

La durée de service des navires de type GARGO suit une loi exponentielle de moyenne :

$$\frac{1}{\mu} = 77 \text{ Heures/Navire} = 3,2083 \text{ Jours/navire} \Rightarrow \mu = 0,3117 \text{ Navires/Jour.}$$

Les paramètres de performance pour ce type de navires sont donnés comme suit :

- ✓ Durée Moyenne d'attente :

$$\bar{T}_F = 1,6101 \text{ Jours /Navire} = 38,6428 \text{ Heures/Navire.}$$

- ✓ Durée Moyenne de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = 4,8184 \text{ Jours /Navire} = 115,6428 \text{ Heures/Navire.}$$

## Classe 04 : Navires de type CEREALIER et CAR-FERRIES

Cette classe regroupe les navires de type CEREALIER et CAR-FERRIES, où les navires de cette classe seront affectés aux postes à quai 08, 15/16, 17 et 21 (04 Postes à quai) avec une priorité accordée aux navires de type CAR-FERRIES. Les navires CAR-FERRIES sont systématiquement dirigés vers le poste 08, tandis que les navires CEREALIER seront affectés aux postes 15/16, 17, 21 et 08 s'il n'est pas occupé.

Le modèle de files d'attente qui décrit adéquatement cette classe est M/M/4 tel que :

- Pour les navires de type CAR-FERRIES :

Les navires de type CAR-FERRIES arrivent selon un processus de Poisson de paramètre :

$$\lambda_{Ferr} = 4,58 \text{ Navires/Mois} = 0,1527 \text{ Navires /Jour.}$$

La durée de service des navires de type CAR-FERRIES suit une loi exponentielle de moyenne :

$$\frac{1}{\mu} = 6 \text{ Heures/Navire} = 0,2500 \text{ Jours/navire} \Rightarrow \mu = 4,0000 \text{ Navires/Jour.}$$

Les paramètres de performance pour ce type de navires sont donnés comme suit :

- ✓ Durée Moyenne d'attente :

$$\bar{T}_F = 0,0100 \text{ Jours /Navire} = 0,2400 \text{ Heures/Navire} = 14,4 \text{ Minutes /Navire.}$$

- ✓ Durée Moyenne de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = 0,2599 \text{ Jours /Navire} = 6,2381 \text{ Heures/Navire.}$$

- Pour les navires de type CEREALIER :

Les navires de type CEREALIER arrivent selon un processus de Poisson de paramètre :

$$\lambda_{Cer} = 9,64 \text{ Navires/Mois} = 0,3213 \text{ Navires /Jour.}$$

La durée de service des navires de type CEREALIER suit une loi exponentielle de moyenne :

$$\frac{1}{\mu} = 205,63 \text{ Heures/Navire} = 8,5679 \text{ Jours/navire} \Rightarrow \mu = 0,1167 \text{ Navires/Jour.}$$

Les paramètres de performance pour ce type de navires sont donnés comme suit :

- ✓ Durée Moyenne d'attente :

$$\bar{T}_F = 3,2563 \text{ Jours /Navire} = 78,1512 \text{ Heures/Navire.}$$

- ✓ Durée Moyenne de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = 11,8132 \text{ Jours /Navire} = 283,5168 \text{ Heures/Navire.}$$

### **Classe 05 : Navires de type PETROLIER**

Cette classe est composée seulement par les navires de type PETROLIER, où ces navires seront affectés aux postes à quai 01, 02 ou 91 situé dans la rade (03 Postes). Le modèle de files d'attente qui décrit adéquatement cette classe est M/M/3, tel que :

Les navires de type PETROLIER arrivent selon un processus de Poisson de paramètre :

$$\lambda_{Petr} = 6,11 \text{ Navires/Mois} = 0,2037 \text{ Navires /Jour.}$$

La durée de service des navires de type PETROLIER suit une loi exponentielle de moyenne :

$$\frac{1}{\mu} = 30 \text{ Heures/Navire} = 1,2500 \text{ Jours/navire} \Rightarrow \mu = 0,8000 \text{ Navires/Jour.}$$

Les paramètres de performance pour ce type de navires sont donnés comme suit :

✓ Durée Moyenne d'attente :

$$\bar{T}_F = 0,4269 \text{ Jours /Navire} = 10,2459 \text{ Heures/Navire.}$$

✓ Durée Moyenne de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = 1,6769 \text{ Jours /Navire} = 40,2459 \text{ Heures/Navire.}$$

### **Classe 06 : Navires de type PORTE-CONTENEURS**

Cette classe est composée seulement par les navires de type PORTE-CONTENEURS, où ces navires seront affectés aux postes à quai 09, 10 et 22/23. Le modèle de files d'attente qui décrit adéquatement cette classe est M/M/3, tel que :

Les navires de type PORTE-CONTENEURS arrivent selon un processus de Poisson de paramètre :

$$\lambda_{Cont} = 24,18 \text{ Navires/Mois} = 0,8060 \text{ Navires /Jour.}$$

La durée de service des navires de type PORTE-CONTENEURS suit une loi exponentielle de moyenne :

$$\frac{1}{\mu} = 56,05 \text{ Heures/Navire} = 2,3354 \text{ Jours/navire} \Rightarrow \mu = 0,4282 \text{ Navires/Jour.}$$

Les paramètres de performance pour ce type de navires sont donnés comme suit :

✓ Durée Moyenne d'attente :

$$\bar{T}_F = 0,6600 \text{ Jours /Navire} = 15,8412 \text{ Heures/Navire.}$$

✓ Durée Moyenne de séjour dans le système :

$$\bar{T}_S = 2,9900 \text{ Jours /Navire} = 71,7612 \text{ Heures/Navire.}$$

En résumé, les mesures de performances obtenues pour chaque type de navire avec le nouveau modèle d'affectation proposé sont résumées dans le tableau suivant :

Type de Navire	Taux d'arrivée		Taux de service		Durée d'attente		Durée de Sejour	
	Nav / Mois	Nav/Jour	$\frac{1}{\mu}$ (H/Nav)	$\mu$ (Nav/J)	J/Nav	H/Nav	J /Nav	H/Nav
BITUMIER	1,44	0,0480	34,1	0,7038	0,1040	2,4959	1,5146	36,3504
BUTANIER	3,04	0,1013	60,2	0,3987	0,8548	20,5163	3,3632	80,7163
CARBURANT	7,25	0,2417	46,9	0,5117	1,1654	27,9696	3,0158	72,3792
CARE-FERRIES	4,58	0,1527	6	4,0000	0,0100	0,2400	0,2599	6,2381
CARGO	28,47	0,9490	77	0,3117	1,6101	38,6428	4,8184	115,6428
CEREALIER	9,64	0,3213	205,63	0,1167	3,2563	78,1512	11,8132	283,5168
HUILIER	6,88	0,2293	48,1	0,4990	0,1439	3,4535	2,1439	51,4535
PETROLIER	6,11	0,2037	30	0,8000	0,4269	10,2459	1,6769	40,2459
PORTE-CONTENEURS	24,18	0,8060	56,05	0,4282	0,6600	15,8412	2,9900	71,7612
RO/RO	0,72	0,0240	58,3	0,4117	0,1504	3,6093	2,5796	61,9093

TABLE 4.11 – Mesures de performance des navires avec le modèle proposé

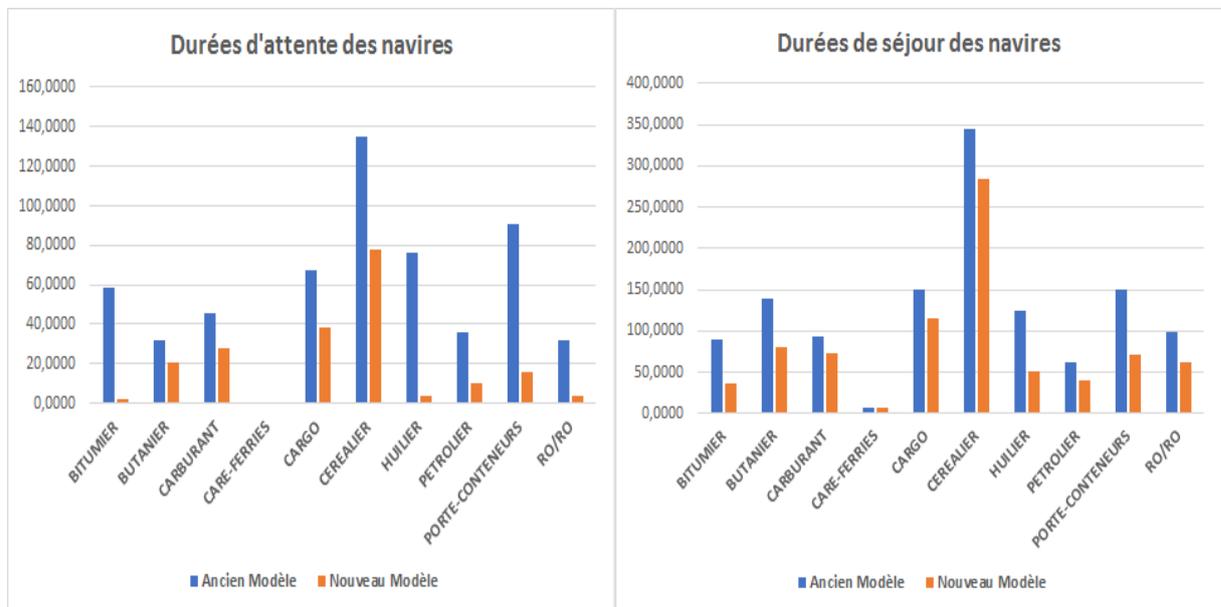


FIGURE 4.12 – Résultats Comparatifs

Les résultats obtenus montrent que le nouveau modèle d'affectation des navires qu'on a proposé est nettement meilleur de celui appliqué par l'EPB car il permet d'améliorer les différentes mesures de performances de tous les types de navires.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons évalué les performances du système d'affectation des navires aux postes à quai au niveau de l'EPB et ce en utilisant la théorie des files d'attente ; ce qui nous a permis de proposer ensuite un nouveau plan d'affectation des navires. Les résultats obtenus avec le nouveau modèle proposé montrent une nette amélioration par rapport à celui appliqué par l'EPB ; car il permet de réduire considérablement les durées d'attente et de séjour pour tous les types de navires.

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les exploitants portuaires sont à la recherche d'une politique d'ordonnement des postes à quais qui permette d'augmenter le trafic et la compétitivité du port, de réduire les durées de séjour et d'attente des navires ; ce qui entraîne une hausse des revenus tout en préservant la satisfaction des clients. La gestion de l'affectation des navires aux postes à quais relève de la Recherche Opérationnelle et vise à améliorer l'efficacité d'un port en termes de temps de manutention, de séjour, d'attente et de traitement des navires. La planification des ressources pour affecter une grande variété de navires et les servir dans des délais stricts est un élément clé de la compétitivité d'un port, ce qui explique pourquoi les problèmes d'affectation des navires aux postes à quais sont devenus plus complexes et plus importants.

Les ports sont souvent confrontés à des problèmes de congestion et de longues files d'attente de navires, ce qui peut entraîner des retards et des coûts supplémentaires pour les navires et les marchandises. Pour remédier à cela, les ports peuvent mettre en place des systèmes de file d'attente efficaces en utilisant des technologies telles que les systèmes de gestion des opérations portuaires et les logiciels de planification des opérations portuaires. Ces systèmes peuvent aider à optimiser les mouvements des navires et des cargaisons, à réduire les temps d'attente et à améliorer la productivité globale du port.

Cette étude nous a permis d'évaluer les performances des postes à quais au sein de l'Entreprise Portuaire de Bejaia. Malgré les difficultés liées à l'exploitation des données disponibles entre 2017 et octobre 2022, en raison du manque d'informations complètes sur certains navires. Ces données ont tout de même été utilisées pour définir les lois régissant le processus d'arrivée au port et de service pour chaque type de navire et dans chaque poste à quai. L'ajustement de ces lois a été réalisé en utilisant les tests de khi-deux et de Kolmogorov-Smirnov.

L'objectif de cette étude est de proposer une meilleure affectation des navires aux postes à quais pour mieux les exploiter et minimiser le temps d'attente et le temps de séjour des navires. Pour cela, un nouveau plan d'affectation des navires a été proposé, où on suggère de répartir les différents types de navires par groupe et de les affecter ensuite

aux postes à quai adéquats. Les résultats obtenus nous montrent que le modèle proposé permet d'améliorer considérablement les différents paramètres de performances à savoir la durée moyenne d'attente en rade et la durée moyenne de séjour de tous types de navires ainsi que le taux d'utilisation des différents postes à quai.

### **Perspectives :**

- Envisager de réduire les durées moyennes de service des navires en renforçant cette étape par les moyens humaines et logistiques nécessaires.
- Appliquer la démarche suivie pour le problème d'affectation des moyens logistiques sur les différents postes à quai afin d'améliorer la qualité de service.

---

# BIBLIOGRAPHIE

## • Les ouvrages :

1. B.V. GNEDENKO, I.N. KOVALENKO. Introduction to Queuing Theory, Birkhäuser, Boston, 1989.
2. DIMITRI LOZOVANU, STEFAN PICKEL, Optimization of Stochastic Discrete Systems and control on Complex Networks, Springer Cham, Switzerland, 2015.
3. PHILIPPE ROBERT, Réseaux et Files D'attente : Méthodes probabilistes, Springer Berlin, Heidelberg, 2000.

## • Les articles et documents :

1. ANNE-LISEPIETRI-LEVY, JOHN BARZMAN, ERIC BARRE, 2018.
2. Brochure-EPB, 2018.
3. Code maritime Algérien article 13.
4. Code maritime Algérien article 888.
5. Document interne de l'entreprise portuaire de Mostaganem, 2019.
6. Document série gestion portuaire (volume 04), 2016.
7. GURLET G, 2014.
8. KERMA.A, Novembre 2012.
9. La gestion portuaire (volume 06), 2015-2018.
10. Le nouveau code maritime Algérien présenté par NEFFOUS MOHAND MANKOUR, 1976.
11. Présentation-EPB-2021.
12. Société des histoires médiévistes. De l'enseignement public. Ports maritimes et fluviaux au moyen âge. Publication universitaire. Frome 2005.
13. TIGHILT FOUJIL, Expert maritime. Formation, 2021.

## • Mémoires :

1. BOUZAHHER Abdelhakim. : " *Contribution à l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des risques liés à la manœuvre portuaire en Algérie* ", Thèse doctorat en science hygiène, sécurité industrielle, option : Gestion des risques, université de Batna 2, 2016.
2. GREGORY GROLET. " *La gestion des ports par une entité publique : aspect européens et environnementaux* ", Thèse de doctorat. Université de LILLE, 2013.
3. I.LEFKIR et A. ALDJI, " *Modélisation et évaluation des performances du mouvement de la navigation cas E.P.B*", Mémoire de Master, université Abderrahmane MIRA, Bejaïa, 2018.
4. L.MAKHLOUF et S.BEDDER, " *Modélisation et simulation des mouvements de la navigation au port de Bejaïa*", Mémoire d'ingénieur en recherche opérationnelle, Université Abderrahmane MIRA, Bejaïa, 1998.
5. M.HADJI et I.MODJAHDI, " *Minimisation du temps de séjour des navires dans le port de Bejaïa*", Mémoire de Master en Recherche Opérationnelle, Université Abderrahmane MIRA, Bejaïa, 2015.

## • Les sites web :

1. <https://www.larouse.fr/dictionnaire/français/port/62676>
2. <https://www.portdebejaia.dz>
3. <https://journals.openedition.org/mediterranee/5410>
4. <https://www.cnrtl.fr/definition/port>
5. <https://www.cnrtl.fr/etymologie/port>
6. <https://www.togo-port.net/les-avantages-du-port-sec/>
7. <http://math.univ-lyon1.fr>
8. <https://www.lajauneetlarouge.com/etymologie-a-propos-des-ports/>
9. <https://www.bbdp.fr/lexpert-comptable/comment-gerer-son-entreprise/levolution-du-commerce-de-lantiquite-a-aujourd'hui/>

## Annexe 01 : Processus d'arrivée des navires

Type de navire	2017											
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
BITUMIER	0	2	2	2	0	1	2	3	0	1	1	0
BUTANIER	4	3	2	3	5	4	1	4	2	4	3	3
CARBURANT	6	6	9	9	12	7	10	11	10	11	9	11
CAR-FERRIES	0	0	0	0	0	1	5	5	1	0	0	0
CARGO	28	22	30	24	20	21	26	19	22	29	34	31
CEREALIER	12	8	6	16	11	7	4	12	10	5	8	9
HUILIER	7	5	10	8	5	9	7	6	5	8	7	6
PETROLIER	6	8	12	11	11	9	6	8	9	5	4	8
PORTE-CONTENEURS	31	21	37	32	31	28	27	29	26	32	27	29
RORO	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0

Type de navire	2018											
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
BITUMIER	1	1	1	0	1	1	2	1	2	1	2	1
BUTANIER	4	3	3	5	2	3	3	2	3	1	5	4
CARBURANT	9	6	7	11	6	6	5	10	12	12	14	12
CAR-FERRIES	0	0	0	0	0	3	8	6	5	0	0	0
CARGO	28	25	36	29	32	30	31	33	24	27	30	37
CEREALIER	11	8	11	13	12	7	15	9	8	9	7	11
HUILIER	8	6	9	6	9	5	6	8	6	10	5	3
PETROLIER	9	9	6	8	7	4	7	7	7	10	6	7
PORTE-CONTENEURS	29	23	27	28	30	26	28	24	22	26	27	25
RORO	1	0	0	0	0	1	1	1	2	1	2	2

## Annexe 01 : Processus d'arrivée des navires

Type de navire	2019											
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
BITUMIER	1	1	1	1	0	0	1	0	2	1	0	2
BUTANIER	5	3	4	2	4	2	1	3	3	0	5	3
CARBURANT	10	10	11	11	7	7	9	7	8	8	8	10
CAR-FERRIES	0	0	0	0	0	2	6	6	5	0	0	0
CARGO	36	32	42	41	37	40	45	35	22	38	31	33
CEREALIER	13	9	3	12	8	9	10	15	8	9	9	12
HUILIER	9	3	8	10	6	12	8	4	7	4	3	5
PETROLIER	5	13	8	6	9	7	8	10	9	8	10	10
PORTE-CONTENEURS	23	19	22	17	29	25	22	26	19	24	19	21
RORO	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1

Type de navire	2020											
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
BITUMIER	0	0	1	1	2	1	2	3	1	3	2	0
BUTANIER	5	4	3	5	2	2	4	2	4	3	3	3
CARBURANT	7	6	6	6	5	8	5	6	8	5	4	3
CAR-FERRIES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CARGO	27	21	35	25	20	41	30	27	22	31	30	32
CEREALIER	8	12	14	14	15	11	5	11	5	13	12	16
HUILIER	6	11	10	8	4	9	5	8	13	5	6	7
PETROLIER	9	6	8	6	8	5	5	7	5	6	3	3
PORTE-CONTENEURS	22	18	23	23	23	28	20	19	22	28	24	23
RORO	1	1	0	2	1	0	0	0	0	0	1	2

## Annexe 01 : Processus d'arrivée des navires

Type de navire	2021											
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
BITUMIER	2	2	1	3	1	2	3	3	2	3	2	1
BUTANIER	4	1	3	3	2	1	2	5	2	2	5	5
CARBURANT	6	5	7	7	7	5	4	5	4	6	5	6
CAR-FERRIES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CARGO	23	26	26	26	34	28	25	25	27	23	21	32
CEREALIER	9	11	12	13	13	7	9	10	6	11	8	7
HUILIER	7	8	5	10	13	7	4	3	6	7	7	8
PETROLIER	2	4	4	3	3	4	5	3	3	5	2	4
PORTE-CONTENEURS	24	25	24	22	26	24	22	21	20	20	16	19
RORO	1	1	2	1	2	2	2	2	3	1	1	1

Type de navire	2022											
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
BITUMIER	2	0	1	2	0	3	2	1	3	0		
BUTANIER	5	5	1	0	3	2	3	1	4	3		
CARBURANT	5	5	4	5	3	6	6	4	5	2		
CAR-FERRIES	0	0	1	0	0	3	9	9	3	0		
CARGO	29	28	26	27	24	16	16	28	17	25		
CEREALIER	5	7	5	11	12	8	7	10	6	6		
HUILIER	6	4	7	6	10	3	6	8	5	7		
PETROLIER	1	4	3	1	3	4	5	4	2	1		
PORTE-CONTENEURS	25	22	23	21	27	25	21	22	21	19		
RORO	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0		

## Annexe 02 : Table de KHI-DEUX

$k$	$\gamma$										
	<b>0.995</b>	<b>0.990</b>	<b>0.975</b>	<b>0.950</b>	<b>0.900</b>	<b>0.500</b>	<b>0.100</b>	<b>0.050</b>	<b>0.025</b>	<b>0.010</b>	<b>0.005</b>
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

TABLE 4.12 – Table khi-deux avec  $k$  degrés de liberté : Quantiles d'ordre  $1 - \gamma$ 

Si  $30 < k < 100$  mais n'est pas un multiple de 10, on utilise la table ci-haut et on fait une interpolation linéaire. Si  $k > 100$ , on peut, grâce au théorème de la limite centrale, approximer la loi  $\chi^2(k)$  par la loi normale  $N(k, 2k)$ .

## Annexe 03 : Table de Kolmogorov-Smirnov

Seuils critiques $D_\alpha(n)$					
<b>n</b>	$\alpha = 0.20$	$\alpha = 0.15$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.210	0.220	0.240	0.270	0.320
30	0.190	0.200	0.220	0.240	0.290
35	0.180	0.190	0.210	0.230	0.270
> 35	$\frac{1.07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.14}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{n}}$

TABLE 4.13 – Table de Kolmogorov-Smirnov

### Annexe 04 : Files d'attente à serveurs multiples M/M/m

$\lambda$  : Taux d'arrivée ;  $\mu$  : Taux de service ;  $\overline{N}_F$  : Nombre moyen des clients dans la file ;  $P_0$  : Probabilité d'avoir aucun client dans le système.

$\lambda/\mu$	$m$	$\overline{N}_F$	$P_0$	$\lambda/\mu$	$m$	$\overline{N}_F$	$P_0$	$\lambda/\mu$	$m$	$\overline{N}_F$	$P_0$	$\lambda/\mu$	$m$	$\overline{N}_F$	$P_0$		
0,15	1	0,026	0,850	1.2	2	0.675	0.250	3.6	4	7.090	0.011	5.2	6	4.301	0.003		
	2	0,001	0,860		3	0.094	0.294		5	1.055	0.023		7	1.081	0.005		
0,20	1	0,050	0,800		4	0.016	0.300		6	0.295	0.026		8	0.368	0.005		
		2	0,002		0,818	5	0.003		0.301	7	0.019		0.027	9	0.135	0.005	
0,25	1	0,083	0,750	1.4	2	1.345	0.176	3.8	4	16.937	0.005		10	0.049	0.005		
		2	0,004		0,778	3	0.177		0.236	5	1.519		0.212	11	0.017	0.006	
0,30	1	0,129	0,700		4	0.032	0.245		6	0.412	0.021	5.3	6	5.303	0.003		
		2	0,006		0,739	5	0.006		0.246	7	0.129		0.022	7	1.249	0.004	
0,35	1	0,118	0,650	1.6	2	2.844	0.111	4.0	5	2.216	0.013		8	0.422	0.005		
		2	0,011		0,702	3	0.313		0.187	6	0.570		0.017	9	0.155	0.005	
0,40	1	0,267	0,600		4	0.060	0.199		7	0.180	0.018		10	0.057	0.005		
		2	0,017		0,667	5	0.012		0.201	8	0.041		0.022	11	0.021	0.005	
0,45	1	0,368	0,550	1.8	2	7.674	0.053	4.2	5	3.327	0.009	5.5	6	8.590	0.002		
		2	0,024		0,633	3	0.532		0.146	6	0.784		0.013	7	1.674	0.003	
		3	0,002		0,637	4	0.105		0.162	7	0.180		0.018	8	0.553	0.004	
0,50	1	0,500	0,500	2.0	5	0.023	0.165		8	0.248	0.014		9	0.204	0.004		
		2	0,033		0,600	4	0.174		0.130	9	0.083		0.015	10	0.077	0.004	
		3	0,003		0,606	5	0.040		0.134	11	0.027		0.015	11	0.028	0.004	
0,55	1	0,672	0,450	2.2	6	0.009	0.135	4.4	5	5.268	0.006	5.6	6	11.519	0.001		
		2	0,045		0,569	3	1.491		0.081	6	1.078		0.010	7	1.944	0.003	
		3	0,004		0,576	4	0.277		0.105	7	0.337		0.012	8	0.631	0.003	
0,60	1	0,900	0,400		5	0.066	0.109		8	0.114	0.012		9	0.233	0.004		
		2	0,059		0,538	6	0.016		0.111	9	0.039		0.012	10	0.088	0.004	
		3	0,006		0,548	7	0.007		0.091	11	0.033		0.012	11	0.033	0.004	
0,65	1	1,207	0,350	2.4	3	2.589	0.056	4.5	5	6.862	0.005	5.7	6	16.446	0.001		
		2	0,077		0,509	4	0.431		0.083	6	1.265		0.009	7	2.264	0.002	
		3	0,008		0,521	5	0.105		0.089	7	0.391		0.010	8	0.721	0.003	
0,70	1	1,633	0,300		6	0.027	0.090		8	0.133	0.011		9	0.266	0.003		
		2	0,098		0,481	7	0.007		0.091	9	0.046		0.011	10	0.102	0.003	
		3	0,011		0,495	2.6	3		4.944	0.035	4.6		5	9.289	0.004	11	0.038
0,75	1	2,250	0,250		4	0.658	0.065		6	1.487	0.008	5.8	12	0.014	0.003		
		2	0,123		0,455	5	0.161		0.072	7	0.453		0.009	6	26.373	0.001	
		3	0,015		0,471	6	0.043		0.074	8	0.156		0.010	7	2.648	0.002	
0,80	1	3,200	0,200	2.8	7	0.011	0.074	4.8	9	0.054	0.010		8	0.823	0.003		
		2	0,152		0,429	3	12.273		0.016	5	21.641		0.002	9	0.303	0.003	
		3	0,019		0,447	4	1.000		0.050	6	2.071		0.006	10	0.116	0.003	
0,85	1	4,817	0,150		5	0.241	0.058		7	0.607	0.008	5.9	11	0.044	0.003		
		2	0,187		0,404	6	0.066		0.060	8	0.209		0.008	12	0.017	0.003	
		3	0,024		0,425	7	0.018		0.061	9	0.074		0.008	6	56.300	0.000	
0,90	1	8,100	0,100	3.0	4	1.528	0.038	5.0	6	2.938	0.005		7	3.113	0.002		
		2	0,229		0,379	5	0.354		0.047	7	0.810		0.006	8	0.939	0.002	
		3	0,030		0,403	6	0.099		0.049	8	0.279		0.006	9	0.345	0.003	
0,95	1	18,050	0,050	3.2	7	0.028	0.050		9	0.101	0.007		10	0.133	0.003		
		2	0,277		0,356	8	0.008		0.050	10	0.036		0.007				
		3	0,037		0,383	4	2.386		0.027	11	0.013		0.007	5.1	6	3.536	0.004
		4	0,005		0,386	5	0.513		0.037	6	3.536		0.004		7	0.936	0.005
1.0	2	0,333	0,333	3.4	6	0.145	0.040		7	0.936	0.005		8	0.321	0.006		
		3	0,045		0,364	7	0.043		0.040	8	0.321		0.006	9	0.117	0.006	
		4	0,007		0,367	8	0.019		0.033	9	0.117		0.006	10	0.042	0.006	
					8	0.019	0.033		10	0.042	0.006						
									11	0.015	0.006						

---

## Résumé

Ce travail est réalisé dans le but d'obtenir un Master en Économie Quantitative. Il vise à trouver une solution optimale qui minimise la durée d'attente, la durée de séjour des navires et les mouvements au port de Bejaia. Le projet se compose de deux étapes principales ; la première étape consiste à faire une présentation détaillée de l'EPB, en mettant en évidence ses caractéristiques physiques et économiques, et en fournissant des schémas permettant de comprendre le mécanisme actuel d'attribution des postes à quais. Cela permettra d'évaluer les performances du système actuel. La deuxième étape consiste à développer un modèle plus efficace répondant aux critères souhaités.

**Mots clés :** EPB, Théorie des files d'attente ; Problème d'affectation

---

## Abstract

This work is carried out in order to obtain a Master's degree in Quantitative Economics. It aims to find an optimal solution to minimize waiting time, vessel stay duration, and movements at the port of Bejaia. The project consists of two main stages. The first stage involves giving a detailed presentation of the EPB, highlighting its physical and economic characteristics, and providing diagrams to help understand the current mechanism of berth allocation. This will enable the evaluation of the performance of the current system. The second stage involves developing a more efficient model that meets the desired criteria.

**Keywords :** EPB ; Queuing theory ; Assignment problem.

---

## ملخص

يتم تنفيذ هذا العمل بهدف الحصول على درجة الماستر في الاقتصاد الكمي، ويهدف الى البحث عن حل أمثل بغرض التقليل من مدة الانتظار ومدة بقاء السفن وكذلك تحركاتها على مستوى ميناء بجاية. ينقسم هذا العمل على مرحلتين رئيسيتين، الأولى تتمثل في تقديم عرض تفصيلي لمرفأ ميناء بجاية مع إبراز خصائصه المادية والاقتصادية وتقديم الرسوم البيانية التي تساعد على فهم آلية سير العمل الحالي للأرصفة بطريقة أسهل. لفهم النظام الحالي لتخصيص السفن للأرصفة من أجل تقييم أدائها، تتضمن الخطوة الثانية تطوير نموذج أكثر كفاءة يلبي المعايير المطلوبة

**الكلمات المفتاحية :** نظرية الطابور ; مشكلة التخصيص.

---