

République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abderrahmane MIRA de Béjaïa
Faculté des Sciences Exactes

Département de Recherche Opérationnelle



Mémoire Présenté pour L'obtention du
Diplôme de Master en Mathématiques
Appliquées

Spécialité : Optimisation et Fiabilité des Réseaux de
Communication

*Analyse de l'impact du taux de pannes sur
les performances du terminal à conteneurs
BMT via les RDP*

Présenté par :
BENHACINE DJIDA
HANI SALOUA

Défendu le 29/06/2025, devant le jury composé de :

Mr S.Adjabi	Professeur	Président du jury	UAMB - Béjaïa
Mme S.Hakmi	M.C. Classe B	Promotricce	UAMB - Béjaïa
Mme Y.Djabali	M.C. Classe A	Co-Promotrice	UAMB - Béjaïa
Mme N.Bernine	M.C. Classe B	Examinatrice	UAMB - Béjaïa
Mr N.Khimoum	M.A. Classe B	Examineur	UAMB - Béjaïa

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Dr S. Hakmi**, notre encadrante, pour sa disponibilité, son accompagnement rigoureux, ainsi que pour ses conseils précieux qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail. Son engagement et son soutien constant ont été déterminants tout au long de notre parcours.

Nos remerciements s'adressent également à **Pr Y. Djabali**, co-encadrante de ce mémoire, pour ses orientations pertinentes, ses remarques constructives et l'intérêt qu'elle a porté à notre travail.

Nous remercions chaleureusement nos familles pour leur soutien moral, leur patience et leur encouragement sans faille durant toutes ces années d'études.

Nous exprimons également notre reconnaissance à nos amis pour leur présence bienveillante et leurs encouragements continus.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

À mes très chers parents,

À mon frère Boukhalfa et mes sœurs ,

Qui ont été là lors de mes heures les plus sombres et mes moments les plus
heureux,

Qui m'ont soutenu dans tout ce que j'ai entrepris,

Qui ont veillé jour et nuit pour que je réussisse,

Qu'ils trouvent dans ce modeste travail,

Toute mon affection,

Ma reconnaissance,

À ma famille,

À ma binôme,

À mes amis,

Je dédie ce mémoire.

DJIDA BENHACINE

Dédicaces

À mes très chers parents,

À mon frère et mes sœurs Céлина et Hanane,

Qui ont été là lors de mes heures les plus sombres et mes moments les plus
heureux,

Qui m'ont soutenu dans tout ce que j'ai entrepris,

Qui ont veillé jour et nuit pour que je réussisse,

Qu'ils trouvent dans ce modeste travail,

Toute mon affection,

Ma reconnaissance,

À ma famille,

À ma binôme,

À mes amis,

Je dédie ce mémoire.

Saloua

Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Dédicaces	iii
Liste des Figures	ix
Liste des Tables	x
Liste des Abréviations et Notations	xi
Introduction Générale	1
1 L'Entreprise BMT (Bejaia Mediterranean Terminal)	3
1.1 Introduction	3
1.2 Présentation de BMT	4
1.2.1 Fondation	4
1.2.2 Identification et Mission de BMT	4
1.2.3 Situation Géographique	4
1.2.4 Lignes Maritimes Desservant BMT	5
1.3 Organisation de BMT	6
1.3.1 Direction Générale (DG)	7
1.3.2 Direction des ressources humaines et Moyens (DRHM)	7
1.3.3 Direction Marketing (DM)	7
1.3.4 Direction des Finances et de la Comptabilité (DFC)	8
1.3.5 Direction des opérations (DO)	8
1.3.6 Transports et Logistique	11
1.3.7 Empotage et Dépotage	11
1.3.8 Direction Technique (DT)	12
1.4 Conteneurisation	12
1.4.1 Définition du conteneur	12

1.4.2	Type des conteneurs	13
1.4.3	Dimensions des conteneurs	16
1.5	Parc à conteneurs	17
1.5.1	Terminal à conteneur de BMT	17
1.5.2	Capacité du terminal	18
1.5.3	Outils de la gestion du terminal	18
1.6	Les procédures de BMT	20
1.6.1	A l'import	20
1.6.2	A l'export	20
1.7	Objectif de BMT	21
1.8	Position du problème	21
1.9	Conclusion	22
2	Réseaux de Petri	23
2.1	Introduction	23
2.2	Les Réseaux de Petri	23
2.3	Définition d'un réseau de Petri	23
2.4	Marquage d'un Réseau de Petri	25
2.5	Dynamique des Réseaux de Petri (Evolution du marquage)	25
2.5.1	Validation d'une transition :	25
2.5.2	Franchissement d'une transition :	26
2.5.3	Marquage accessible :	27
2.5.4	Conflits et parallélisme	27
2.6	Propriétés	29
2.6.1	Réseau vivant :	29
2.6.2	Réseau borné :	29
2.7	Extensions des réseaux de Petri	30
2.7.1	Réseaux de Petri généralisés	30
2.7.2	Réseaux de Petri temporisés	31
2.7.3	Les réseaux de Petri temporels	33
2.7.4	Les réseaux de Petri stochastique	34
2.8	Conclusion	35
3	Ajustement des processus de Débarquement et Embarquement	36
3.1	Introduction	36
3.2	Description des principaux mouvements des conteneurs	36
3.2.1	L'étape de mouillage	37
3.2.2	L'étape de service	37
3.3	Affectation des équipements au niveau de BMT	39
3.3.1	Décision d'affectation des Grues de Quai	39

3.3.2	Décision d'affectation des Mols	39
3.3.3	Décision d'affectation des RTGs	39
3.3.4	Choix du bloc de débarquement	39
3.4	Identification des lois des durées de service des différents engins	40
3.4.1	Collecte des données :	40
3.4.2	Identification de la loi de la durée de service de la grue lors de déchargement d'un conteneur	40
3.4.3	Identification de la loi de la durée de service de la grue lors de chargement d'un conteneur	41
3.4.4	Identification de la loi de la durée de service de QC lors de déchargement d'un conteneur	43
3.4.5	Identification de la loi de la durée de service de QC lors de chargement d'un conteneur	44
3.4.6	Identification de la loi de la durée de service des RTGs lors de déchargement d'un conteneur.	45
3.4.7	Identification de la loi de la durée de service des RTGs lors de chargement d'un conteneur	46
3.4.8	Identification de la loi de la durée de service des ca- mions de déchargement d'un conteneur	47
3.4.9	Identification de la loi de la durée de service des ca- mions lors de chargement d'un conteneur	48
3.4.10	Identification de la loi de la durée de service des stea- ckers lors de déchargement d'un conteneur	49
3.4.11	Identification de la loi de la durée de service des stea- ckers lors de chargement d'un conteneur	50
3.5	Conclusion	51
4	Modélisation et simulation des performances du terminal	52
4.1	Introduction	52
4.2	La modélisation du processus de débarquement et d'embar- quement des conteneurs via les réseaux de Petri (RDP) : . . .	52
4.2.1	Description de modèle de débarquement	53
4.2.2	Description de modèle d'embarquement	55
4.3	Résultats de la simulation et évaluation des performances . .	57
4.3.1	Présentation de l'interface GRIF	57
4.3.2	Présentation des résultats	58
4.3.3	Impact du taux de panne sur les performances du Ter- minal à Conteneurs BMT	60
4.3.4	Etude Comparative	62
4.4	Conclusion	63

Conclusion Générale	64
Résumé	67

Table des figures

1.1	Joint venture création de BMT.	4
1.2	Position géographique de BMT.	5
1.3	Les lignes Maritimes Desservant BMT.	6
1.4	Structure d'organisation de la BMT.	6
1.5	Acconage et Gestion des Conteneurs.	9
1.6	Manutention aux Navires	10
1.7	Traitement Frigorifique	10
1.8	Transports et Logistique	11
1.9	Opérations de Empotage et Dépotage des Conteneurs	12
1.10	Conteneur dry.	13
1.11	Conteneur Open top.	13
1.12	Conteneur ventilé.	14
1.13	Conteneur citerne.	14
1.14	conteneur reefer.	15
1.15	conteneur flat rack.	15
1.16	Conteneur 40/50 pallet Wide	16
1.17	Plan du terminal.	17
2.1	Exemple d'une représentation graphique d'un réseau de Petri.	24
2.2	Exemple d'un marquage d'un réseau de Petri.	25
2.3	Exemple de validation d'une transition.	26
2.4	Exemple de franchissement de transition	26
2.5	Exemple de graphe de marquage accessible d'un RdP.	27
2.6	Exemple de conflit structurel.	28
2.7	Exemple de conflit effectif.	28
2.8	Exemple d'un RDP vivant et borné	30
2.9	Exemple d'un réseau de Petri généralisé	31
2.10	Exemple d'un réseau de Petri P-temporisée.	32
2.11	Exemple d'un réseau de Petri T-temporisée	32

3.1	L’histogramme et la courbe de la densité de probabilité de la loi de la durée de service de la grue (déchargement d’un conteneur).	41
3.2	L’histogramme et la courbe de la densité de probabilité de la loi de la durée de service de la grue (chargement d’un conteneur).	42
3.3	L’histogramme et la courbe de la densité de probabilité de la loi de la durée de service du QC (déchargement d’un conteneur).	43
3.4	L’histogramme et la courbe de la densité de probabilité de la loi de la durée de service du QC (chargement d’un conteneur).	44
3.5	L’histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des RTGs (déchargement d’un conteneur).	45
3.6	L’histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des RTGs (chargement d’un conteneur).	46
3.7	L’histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des camions portuaire (déchargement d’un conteneur).	47
3.8	L’histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des camions portuaire (chargement d’un conteneur)	48
3.9	L’histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des steackers (déchargement d’un conteneur).	49
3.10	L’histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des steackers (chargement d’un conteneur).	50
4.1	– La modélisation du processus de débarquement avec les réseaux de Petri.	55
4.2	La modélisation du processus d’embarquement avec les réseaux de Petri.	56
4.3	L’interface de logiciel GRIF	57

Liste des tableaux

1.1	Dimensions extérieures maximales des conteneurs.	16
1.2	Dimensions intérieures minimales d'un conteneur.	16
1.3	Ouverture minimale des portes d'un conteneur.	17
1.4	Capacités du terminal à conteneurs de BMT.	18
3.1	Ajustement de la loi de service de la grue lors de déchargement d'un conteneur.	40
3.2	Ajustement de la loi de service de la grue lors de chargement d'un conteneur.	42
3.3	Ajustement de la loi de service du QC lors de déchargement d'un conteneur.	43
3.4	Ajustement de la loi de service du QC lors de chargement. . .	44
3.5	Ajustement de la loi de service des RTGs lors de déchargement d'un conteneur.	45
3.6	Ajustement de la loi de service des RTGs lors de chargement d'un conteneur.	46
3.7	Ajustement de la loi de service des camions remorques por- tuaire	47
3.8	Ajustement de la loi de service des camions.	48
3.9	Ajustement de la loi de service des stackers.	49
3.10	Ajustement de la loi de service des stackers.	50
4.1	Impact du temps de réparation sur le séjour des navires. . . .	60
4.2	Impact du temps de réparation sur le traitement mensuel et la saturation du parc	61
4.3	Comparaison des performances portuaires.	62

Liste des Abréviations et Notations

Abréviation	Signification
BMT	Bejaia Mediterranean Terminal
FIFO	First In First Out
QoS	Quality of Service
TCP	Transmission Control Protocol
RDP	Réseaux de Petri
QC	Quay Crane (Portique de quai)
RTG	Rubber Tyred Guntry (Portique sur pneus)
TC	Conteneur
EPB	Entreprise Portuaire de Béjaia

Introduction Générale

Dans un monde marqué par la mondialisation croissante et l'intensification des échanges internationaux, le transport maritime s'impose comme un vecteur essentiel du commerce mondial. La conteneurisation, en standardisant le transport des marchandises, a transformé en profondeur la logistique portuaire. Les ports doivent désormais faire face à des volumes croissants, à des exigences de performance accrues, et à des contraintes opérationnelles de plus en plus complexes.[19]

Dans ce contexte, les terminaux à conteneurs jouent un rôle central. Leur efficacité repose sur la coordination fluide entre les différentes zones (quai, parc, zone de livraison) et sur la disponibilité permanente des ressources, en particulier les engins de manutention tels que les grues mobiles et les portiques de quai (QC). Toute interruption, notamment liée à une panne, peut perturber le cycle logistique, générer des retards de traitement des navires et accroître la congestion du terminal.

Le terminal à conteneurs BMT (Bejaia Mediterranean Terminal), constitue une infrastructure stratégique pour le port de Béjaïa. Conscient des enjeux liés à la continuité des opérations, BMT a mis en place une politique de maintenance spécifique : lorsqu'un engin tombe en panne, il est réparé immédiatement si l'intervention peut être réalisée en moins de 45 minutes ; au-delà de ce délai, l'engin est mis temporairement hors service afin de ne pas bloquer l'ensemble du processus. Plusieurs études ont déjà été menées au sein du terminal BMT pour évaluer ses performances, notamment en ce qui concerne la gestion des flux, l'optimisation de l'accostage, la planification des ressources ou encore l'évaluation des durées moyennes de service des équipements. Ces travaux ont permis de mieux comprendre le fonctionnement du terminal et d'en améliorer certains aspects opérationnels. La nouveauté de notre étude par rapport aux recherches précédentes réside dans la prise en compte explicite des pannes d'équipements dans l'analyse des performances. Ce facteur, souvent négligé, a pourtant un impact significatif sur la fluidité des opérations et la productivité du terminal. Ce travail met en lumière l'im-

portance de la gestion des pannes dans l'optimisation du fonctionnement portuaire, et propose un cadre d'analyse pour la prise de décision en matière de maintenance et d'organisation des ressources.

Ce mémoire s'inscrit dans cette logique d'analyse des performances du terminal. Il vise à modéliser le processus de débarquement et d'embarquement des conteneurs en tenant compte de cette organisation de la gestion des pannes. Pour cela, nous utilisons les réseaux de Petri, un formalisme adapté aux systèmes à événements discrets comportant des ressources limitées, des files d'attente et des événements aléatoires.

Ce travail est structuré en quatre chapitres principaux, chacun abordant une étape clé de notre démarche :

- **Le premier chapitre** est consacré à la présentation du Bejaia Mediterranean Terminal (BMT). Il décrit l'organisation, les infrastructures, les équipements ainsi que les services offerts par le terminal, en soulignant son rôle stratégique dans la chaîne logistique portuaire.
- **Le deuxième chapitre** introduit les concepts fondamentaux des Réseaux de Petri. Nous y présentons leur définition, leur dynamique, leurs propriétés, ainsi que leurs extensions, afin de justifier leur pertinence dans la modélisation des systèmes à événements discrets complexes comme ceux d'un terminal à conteneurs.
- **Le troisième chapitre** traite de l'ajustement et de l'analyse des processus d'embarquement et de débarquement au sein du BMT.
- **Le quatrième chapitre** porte sur la modélisation et l'évaluation des performances du processus de débarquement et d'embarquement des conteneurs au sein du terminal BMT. en tenant compte des pannes et de l'affectation des ressources.

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale qui synthétise les résultats obtenus et propose des pistes d'amélioration.

Chapitre 1

L'Entreprise BMT (Bejaia Mediterranean Terminal)

1.1 Introduction

Béjaïa Mediterranean Terminal (BMT) est une joint-venture entre l'Entreprise Portuaire de Béjaïa (EPB) et Portek Systems Equipment, spécialisée dans la gestion et l'exploitation du terminal à conteneurs du port de Béjaïa. Grâce à des équipements modernes et des systèmes informatiques avancés, BMT optimise les opérations portuaires en offrant des services sécurisés, rapides et performants. Dans le cadre de son amélioration continue, un accord stratégique a été signé le 6 janvier 2020 pour la mise en place d'un système de fenêtres d'accostage, permettant une planification optimisée des escales via un espace web, réduisant ainsi les délais d'attente et améliorant l'efficacité du quai .[2]

Dans ce chapitre, nous allons présenter de manière détaillée l'entreprise BMT (Bejaia Mediterranean Terminal), en exposant sa fondation, ses missions, son organisation, ainsi que ses infrastructures et ses capacités opérationnelles. Nous aborderons également les différentes procédures en vigueur au sein du terminal, les types de conteneurs traités, les équipements disponibles et les objectifs stratégiques poursuivis par l'entreprise. Ce chapitre constitue ainsi une base essentielle pour comprendre le fonctionnement global du terminal.

1.2 Présentation de BMT

1.2.1 Fondation

Dans le cadre de son développement 2004-2006, l'Entreprise Portuaire de Béjaïa (EPB) a initié un partenariat stratégique avec le groupe singapourien Portek pour la conception, le financement et l'exploitation d'un terminal à conteneurs moderne. Après approbation du Conseil de la Participation de l'État (CPE) en mai 2004, Béjaïa Mediterranean Terminal (BMT) a été créé sous forme de joint-venture, avec 51% des parts pour l'EPB et 49% pour Portek, apportant ainsi expertise et technologies avancées au projet.



FIGURE 1.1 – Joint venture création de BMT.

1.2.2 Identification et Mission de BMT

BMT est une société par actions dédiée à l'exploitation, la gestion et le développement du terminal à conteneurs du port de Béjaïa. Spécialisée dans l'optimisation des opérations portuaires, elle garantit un service rapide, sécurisé et efficace grâce à un personnel qualifié et des équipements modernes, assurant ainsi une manutention et un stockage performants des conteneurs. Fonctionnant en continu 24h/24 et 7j/7, BMT répond aux exigences des armateurs et des entreprises avec des solutions compétitives et adaptées.

1.2.3 Situation Géographique

Le terminal à conteneurs de Béjaïa (BMT) occupe une position géographique privilégiée, au nord de l'Algérie, au cœur de la Méditerranée. Cette

localisation stratégique lui permet de desservir un vaste hinterland et de faciliter le transport des marchandises grâce à des infrastructures modernes et bien connectées.

BMT est directement relié au réseau routier national, offrant un accès rapide aux principales villes du pays. Il se trouve également à proximité de la gare ferroviaire et à quelques minutes de l'aéroport international de Béjaïa, renforçant ainsi son efficacité logistique. Ce port dispose de sites de mouillage avec des profondeurs allant de 10 à plus de 20 mètres, ainsi qu'une passe d'accès sécurisée formée par les jetées Est et Sud. Grâce à ces atouts, BMT garantit des conditions optimales pour l'accostage des navires et le transit des conteneurs vers diverses destinations, contribuant ainsi au dynamisme du commerce maritime.[10]



FIGURE 1.2 – Position géographique de BMT.

1.2.4 Lignes Maritimes Desservant BMT

Grâce à sa position géographique stratégique, son infrastructure moderne et la qualité de ses services, le port de Béjaïa est un point clé pour le commerce national et international. Béjaïa Mediterranean Terminal (BMT) s'impose comme un opérateur incontournable dans la gestion des conteneurs. Le port est desservi par plusieurs lignes maritimes régulières reliant Béjaïa à divers ports européens, facilitant ainsi les échanges commerciaux et assurant un transit fluide des marchandises.[1]



FIGURE 1.3 – Les lignes Maritimes Desservant BMT.

1.3 Organisation de BMT

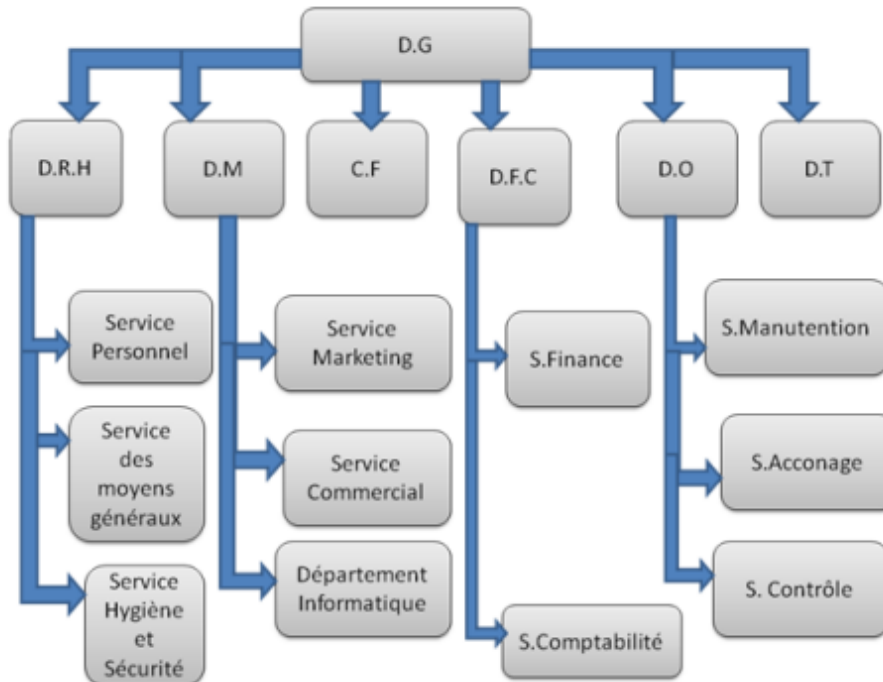


FIGURE 1.4 – Structure d'organisation de la BMT.

Dans la structure organisationnelle de BMT, on distingue six directions principales :

1.3.1 Direction Générale (DG)

La Direction Générale, sous la responsabilité du Directeur Général, supervise la gestion de l'entreprise, prend les décisions stratégiques et coordonne les différentes structures. Elle s'appuie sur 03 cellules :

- **cellule Audit et Contrôle de Gestion** : Suivi des procédures et veille réglementaire.
- **cellule Sécurité** : Protection des marchandises, du parc et maintien de la propreté.
- **cellule QHSE** : Mise en œuvre et suivi du plan Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement.

1.3.2 Direction des ressources humaines et Moyens (DRHM)

La DRHM assure la gestion du personnel et des ressources de l'entreprise en alignant les impératifs économiques avec le bien-être des employés. Elle se compose de :

- **Service des Ressources Humaines (RH)** : Gère le recrutement, la fidélisation et le développement des talents à travers des formations et des conditions de travail optimales.
- **Service des Moyens Généraux** : Assure les achats et la gestion des stocks pour garantir le bon fonctionnement de l'entreprise.
- **Service Hygiène et Sécurité** : Veille à la sécurité des marchandises, du parc à conteneurs et à la propreté des installations.

1.3.3 Direction Marketing (DM)

La Direction Marketing (DM) assure la promotion de l'image de BMT et entretient les relations avec les clients. Elle communique sur les activités et performances de l'entreprise tout en valorisant ses démarches d'amélioration des services. Elle comprend :

- **Service Marketing** : Déploie les actions de communication et de promotion.
- **Service Commercial** : Gère la facturation, le portefeuille clients et le recouvrement des créances.
- **Département Informatique** : Garantit le bon fonctionnement du système CTMS, la maintenance du parc informatique et le développement de nouvelles solutions adaptées aux besoins de l'entreprise.

1.3.4 Direction des Finances et de la Comptabilité (DFC)

La Direction des Finances et de la Comptabilité (DFC) gère l'enregistrement de toutes les opérations financières de l'entreprise et veille à l'adéquation de la politique financière avec les objectifs de BMT. Elle assure également le suivi des relations avec les banques et les administrations fiscales. Elle est composée de deux services :

- **Service des Finances** : Gère le règlement des factures et l'encaissement des créances.
- **Service de Comptabilité** : Contrôle et enregistre les factures d'achats, de prestations et d'investissements.

1.3.5 Direction des opérations (DO)

La Direction des Opérations gère la planification des escales, l'affectation des ressources et les opérations de maintenance des navires porte-conteneurs. Elle supervise également l'acconage, la gestion des conteneurs vides, le traitement des conteneurs frigorifiques et la sécurité du terminal. Elle est composée de quatre services :

Acconage et Gestion des Conteneurs

Une fois le conteneur placé dans le parc, BMT mobilise les ressources humaines et matérielles nécessaires pour assurer ses prestations, avec les portiques gerbeurs sur pneus (RTG) jouant un rôle clé. La qualité du service est évaluée par le nombre de livraisons et restitutions effectuées quotidiennement.

- **Visite** : Inspection de l'état du conteneur et de la conformité des marchandises.
- **Pesée** : Vérification du poids selon la réglementation.
- **Dépotage** : Déchargement du contenu pour distribution.
- **Livraison** : Acheminement des marchandises vers leur destination.
- **Mise à disposition** : Préparation des conteneurs pour retrait ou utilisation.
- **Restitution** : Retour des conteneurs pleins ou vides selon les besoins.



FIGURE 1.5 – Acconage et Gestion des Conteneurs.

Manutention aux Navires

Une fois le navire accosté, des équipes spécialisées prennent en charge l'ensemble des opérations de manutention, garantissant un service rapide et sécurisé :

- Débarquement et embarquement de conteneurs .
- Shifting de conteneurs et de cales .
- Réorganisation et optimisation des charges à bord .
- Travaux de régie et assistance technique aux navires .

Ces opérations sont réalisées avec des équipements adaptés et dans le respect des normes de sécurité portuaire.[10]



FIGURE 1.6 – Manutention aux Navires .

Traitement Frigorifique

Une équipe spécialisée s'occupe des conteneurs réfrigérés dans la zone REEFER. Elle assure le branchement, la surveillance et le suivi de la température pour garantir le bon fonctionnement des équipements. Si un conteneur présente un problème, l'équipe technique de BMT peut intervenir, à la demande du client, pour le réparer et s'assurer qu'il fonctionne correctement.[6]



FIGURE 1.7 – Traitement Frigorifique .

1.3.6 Transports et Logistique

BMT offre une prestation logistique complète à ses clients, incluant :

- Chargement et déchargement des conteneurs dans des espaces dédiés.
- Transport des marchandises par route.
- Acheminement ferroviaire.
- Stockage dans la zone extra-portuaire.
- Gestion et traitement des conteneurs.



FIGURE 1.8 – Transports et Logistique .

1.3.7 Empotage et Dépotage

BMT assure pour ses clients l'arrimage(Lashing) et le désarrimage (Un-lashing) des conteneurs sur les navires.

Ces opérations incluent la fixation et le retrait des conteneurs à bord, la manipulation des équipements d'arrimage sur le quai et la sécurisation des conteneurs à l'aide des dispositifs fournis par le navire.



FIGURE 1.9 – Opérations de Empotage et Dépotage des Conteneurs .

1.3.8 Direction Technique (DT)

La Direction Technique assure la maintenance des équipements du terminal pour garantir leur bon fonctionnement et leur performance. Elle gère l'entretien, la réparation des engins, la détection des pannes et l'optimisation des procédures de maintenance. Elle est organisée en trois services :

- **Engins** pour l'entretien des véhicules lourds .
- **Portiques** pour la maintenance des portiques et grues mobiles.
- **Méthodes** pour la mise en œuvre du plan de maintenance.

1.4 Conteneurisation

1.4.1 Définition du conteneur

Un conteneur est un équipement de transport robuste et réutilisable, conçu pour faciliter le déplacement des marchandises sans rupture de charge. Il est équipé de dispositifs permettant une manipulation aisée lors du transbordement entre différents modes de transport. Disponible en plusieurs types (sec, citerne, open top, frigorifique), il assure la protection et l'optimisation du transport des biens. Le conteneur standard de 20 pieds sert de référence pour mesurer la capacité des navires.[12]

1.4.2 Type des conteneurs

Les conteneurs dry :

Le conteneur dry est un conteneur fermé, robuste et sécurisé, conçu pour le transport de marchandises emballées (cartons, fûts, palettes) ou en vrac.



FIGURE 1.10 – Conteneur dry.

Conteneurs open top :

Le conteneur open top est un conteneur à toit amovible, conçu pour le transport de marchandises lourdes ou volumineuses nécessitant un chargement vertical par grue ou pont roulant.



FIGURE 1.11 – Conteneur Open top.

Conteneurs ventilés :

Le conteneur ventilé est équipé d'orifices assurant une aération naturelle, adapté au transport de marchandises sensibles à l'humidité comme le café ou le cacao.



FIGURE 1.12 – Conteneur ventilé.

Conteneur citerne :

Le conteneur citerne est utilisé pour transporter des liquides et gaz. Il est composé d'une citerne fixée à une ossature et équipé pour un chargement et un déchargement facilités.



FIGURE 1.13 – Conteneur citerne.

Conteneur reefer :

Le conteneur reefer est un conteneur réfrigéré utilisé pour le transport de marchandises périssables nécessitant une température contrôlée.



FIGURE 1.14 – conteneur reefer.

Conteneur flat rack :

Le conteneur flat rack est une plateforme ouverte, sans parois latérales ni toit, conçue pour le transport de marchandises volumineuses ou lourdes.



FIGURE 1.15 – conteneur flat rack.

Conteneurs 40/50 pallet wide :

Les conteneurs 40/50 pallet wide sont conçus pour transporter des palettes de 120 cm, optimisant l'espace et évitant les mouvements des marchandises sans chargement fractionné.



FIGURE 1.16 – Conteneur 40/50 pallet Wide .

1.4.3 Dimensions des conteneurs

Les dimensions des conteneurs, notamment ceux de 20 pieds, 40 pieds et 45 pieds, sont normalisées pour assurer une meilleure gestion du transport et du stockage des marchandises. Les tableaux ci-dessous montrent leurs différentes dimensions :

Type de conteneur	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Hauteur (mm)
20 pieds	6 058	2 438	2 591
40 pieds	12 192	2 438	2 591
45 pieds	13 716	2 438	2 896

TABLE 1.1 – Dimensions extérieures maximales des conteneurs.

Type de conteneur	20 pieds	40 pieds	45 pieds
Longueur(mm)	5 898	12 032	13 500
Largeur(mm)	2 350	2 350	2 350
Hauteur (mm)	2 390	2 390	2 700

TABLE 1.2 – Dimensions intérieures minimales d'un conteneur.

Type de conteneur	Largeur(mm)	Hauteur(mm)
20 pieds	2337	2286
40 pieds	2337	2286
45 pieds	2360	2580

TABLE 1.3 – Ouverture minimale des portes d'un conteneur.

1.5 Parc à conteneurs

1.5.1 Terminal à conteneur de BMT

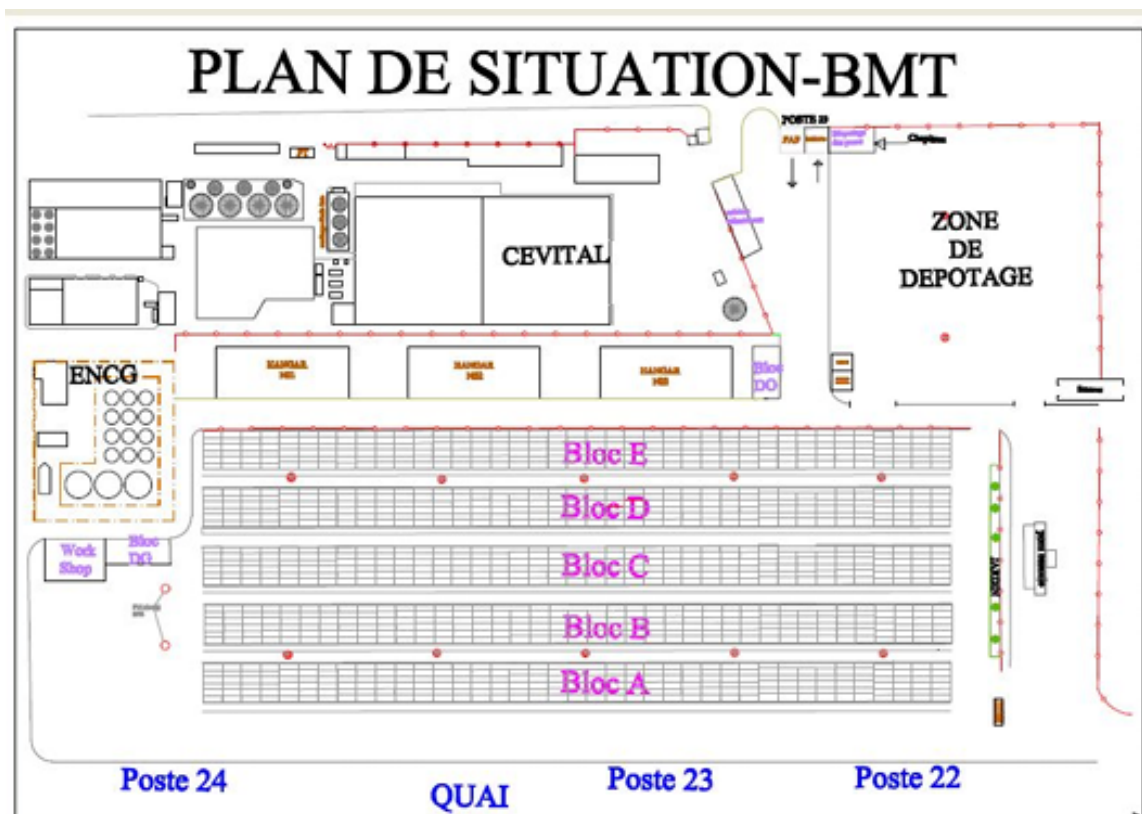


FIGURE 1.17 – Plan du terminal.

1.5.2 Capacité du terminal

Quai/Accostage	
Longueur	500m
Profondeur	12m
Superficie du bassin	60ha
Nombre de postes à quai	04
Taux d'utilisation du quai	70%
Parc à conteneurs (Plein)	
Capacité	8300 EVP
Superficie	78500m ²
Parc à conteneurs (Vide)	
Capacité	900 EVP
Superficie	15200m ²
Parc à conteneurs (Plein) Frigorifiques	
Capacité	500 EVP
Superficie	2800m ²
Zone pour Dépotage/Empotage	
Capacité	600 EVP
Superficie	3500m ²
Zone Extra-Portuaire (à 3 Km du Port)	
Capacité	600 EVP
Superficie	3500m ²

TABLE 1.4 – Capacités du terminal à conteneurs de BMT.

1.5.3 Outils de la gestion du terminal

Pour améliorer la gestion et la manutention des conteneurs, BMT a mis en place des systèmes informatiques avancés assurant une meilleure traçabilité et sécurité. Ces outils incluent un CTMS , un OCR , un PDS et un environnement EDI pour optimiser le suivi et le traitement des opérations portuaires.

CTMS (Container Terminal Management System) :

Le CTMS est un système logiciel moderne utilisé par BMT pour optimiser la gestion du terminal à conteneurs en temps réel. Il améliore la planification, l'efficacité opérationnelle et le suivi des opérations portuaires, garantissant un service rapide et structuré.

Le CTMS assure plusieurs tâches essentielles :

- Le suivi du processus d'importation et d'exportation.
- La gestion du retour des conteneurs vides au terminal.
- La gestion des restitutions des conteneurs (vides ou pleins).
- Le suivi du dépotage des conteneurs.
- La planification des navires et du parc à conteneurs.
- Le suivi des opérations de chargement et de déchargement.
- La réception des conteneurs à l'exportation.
- Le suivi des opérations de shifting au niveau du parc à conteneurs.

PDS (Position Determining System) :

Le PDS est un dispositif permettant de suivre en temps réel les mouvements des conteneurs. Il utilise la technologie GPS (Gestion de Position par Satellite) pour détecter et fournir avec précision la position des équipements de manutention lors des différentes opérations.

Le PDS assure plusieurs fonctions :

- La détection en temps réel des mouvements des conteneurs.
- L'identification précise de la position des équipements de manutention.
- L'optimisation des opérations de chargement, déchargement et stockage.
- L'amélioration de la sécurité et de l'efficacité des manœuvres portuaires.

RDS (Radio Data System) :

Le RDS est un système de transmission sans fil qui assure une communication en temps réel entre les terminaux mobiles des opérateurs et le serveur central du CTMS. Il permet aux employés de recevoir des instructions et d'envoyer des rapports sans se déplacer, améliorant ainsi l'efficacité des opérations portuaires.

Le RDS optimise les cadences de chargement et de déchargement, réduit les délais et maximise l'utilisation des ressources.

OCR (Optical Character Recognition) :

Le OCR est un système de reconnaissance optique des caractères installé par BMT pour identifier en temps réel les conteneurs entrant et sortant du terminal. Grâce à des caméras haute résolution, il capture et archive automatiquement les numéros des conteneurs et les transmet au CTMS. Ce système améliore la gestion, réduit les délais et optimise la manutention en fournissant des informations précises et actualisées.

1.6 Les procédures de BMT

1.6.1 A l'import

La visite :

Pour assurer le suivi des visites des conteneurs, le transitaire doit fournir au service des opérations certains documents, comme la copie du connaissement avec la prestation demandée, le bon à délivrer et le bon de commande. Ensuite, un agent de BMT prépare la liste des conteneurs à visiter le lendemain et la transmet au chef de section exploitation, qui confirme leur mise à disposition.[3]

La pesée :

Le client doit fournir au service des opérations les documents suivants : le bon de commande validé, une copie du connaissement et le bon à délivrer. Une fois ces documents présentés, l'agent de BMT organise le chargement du conteneur sur un camion-remorque pour la pesée.

La livraison :

Le transitaire doit fournir les documents nécessaires pour valider la livraison, dont le bon à délivrer, la mise à quai, le connaissement, le bon de commande et le quitus BMT. L'agent commercial vérifie ces documents avant d'émettre et d'enregistrer le Container Delivery Order.

Le dépotage :

Le transitaire remet à BMT un dossier contenant les documents nécessaires avant 16h00. L'agent de BMT prépare ensuite le document de dépotage et transmet la liste des conteneurs à traiter. Après le dépotage, la lettre doit être signée pour clôturer le dossier.

1.6.2 A l'export

La restitution :

L'agent responsable doit vérifier quotidiennement la liste des conteneurs restitués et comparer les bons reçus avec les enregistrements du terminal.

Suivi des mises à quai :

L'agent en charge tient un fichier électronique mis à jour avec les restitutions journalières, en collaboration avec le pointeur et le chef de section.

Mise à disposition :

L'agent logistique gère un fichier dédié aux conteneurs mis à disposition et veille à la conformité des documents requis (demande signée, bon de commande, lettre d'empotage, bon d'embarquement).

Empotage :

Le client peut réaliser l'empotage sur le terminal ou en externe. Dans chaque cas, il doit fournir les documents nécessaires au service des opérations.

1.7 Objectif de BMT

L'objectif de BMT est de faire de son terminal à conteneurs une infrastructure moderne, capable de répondre aux exigences internationales en matière de qualité, de productivité et de compétitivité. Pour cela, BMT met en place des technologies avancées et des procédures efficaces afin de :

- Optimiser la productivité et réduire les coûts d'escale.
- Garantir la fiabilité des informations et améliorer le service client.
- Assurer la sécurité des marchandises et la satisfaction des clients.
- Renforcer sa compétitivité face à la concurrence nationale et internationale.
- Accroître sa part de marché et développer le transport de bout en bout.
- Améliorer le rendement, réduire les délais et assurer un service de qualité conforme aux normes universelles.
- Créer des emplois et propulser le terminal au niveau international.

1.8 Position du problème

Le terminal à conteneurs de BMT constitue un maillon stratégique de la logistique maritime nationale, en assurant la jonction opérationnelle entre les flux maritimes internationaux et les réseaux de transport terrestre. Toutefois, malgré l'automatisation croissante des opérations et la modernisation des équipements, le terminal reste fortement exposé aux aléas techniques liés aux engins de manutention.

En effet, les pannes fréquentes des grues, des portiques de quai perturbent régulièrement le déroulement des opérations, entraînant des retards, une saturation des zones de stockage et une baisse du rendement global. Ces interruptions non planifiées compromettent la régularité des flux, augmentent les temps de séjour des navires à quai et génèrent une instabilité dans la planification logistique. Ainsi, il devient indispensable d'analyser ces phénomènes de manière rigoureuse afin de mieux comprendre leur impact sur la performance du terminal.

Ce travail propose une évaluation des performances du terminal BMT en prenant en compte les pannes des équipements à travers une modélisation précise des processus de débarquement et d'embarquement à l'aide des réseaux de Petri. Cette approche permettra d'identifier les principales sources de blocage, de mesurer les temps de traitement réels et d'évaluer l'efficacité des ressources dans différentes conditions de fonctionnement. L'objectif de cette étude est de mettre à la disposition de l'entreprise un outil d'analyse fiable pour anticiper les dysfonctionnements, renforcer la stabilité des opérations et optimiser la réactivité face aux exigences croissantes du trafic maritime moderne.

1.9 Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un portrait détaillé de BMT, en abordant son histoire, son organisation et son rôle dans la conteneurisation. Nous avons mis en avant les différentes procédures mises en place, ainsi que les objectifs qui font de BMT un acteur clé du transport maritime. Son efficacité repose sur une gestion optimisée des flux de conteneurs et une infrastructure adaptée aux exigences du commerce international.

Le chapitre suivant s'intéressera aux réseaux de Petri, un outil puissant permettant de modéliser et évaluer les performances des systèmes.

Chapitre 2

Réseaux de Petri

2.1 Introduction

L'évaluation croissante des systèmes de production complique leur modélisation et leur évaluation. Face à ces défis il devient indispensable de recourir à des outils d'aide à la décision capable de simuler leur fonctionnement. Parmi les approches utilisées, on trouve les réseaux de Petri. La prise en compte des pannes complique, voir rend impossible, c'est pourquoi nous proposons l'utilisation des réseaux de Petri, une alternative particulièrement efficace et adaptée à la modélisation de ce type de systèmes dynamiques.[6]

Dans ce chapitre nous présentons les défis essentielles, les concepts fondamentaux ainsi que quelques notions de base relatives aux RDP.

2.2 Les Réseaux de Petri

Les Réseaux de Petri ont été inventés par Carl Maria Petri début des années soixante. Des travaux ultérieurs ont permis de développer les Réseaux de Petri comme un outil de modélisation des systèmes à événement discrets. Le modèle Réseaux de Petri est à l'origine du Grafset, qui est un langage graphique de spécification et de programmation d'automates industriels.[4]

2.3 Définition d'un réseau de Petri

Un Réseau de Petri (RdP) est un graphe orienté biparti permettant de modéliser des systèmes dynamiques et discrets. Il est défini par un quadruplet : $R = (P, T, Pre, Post)$ où :

- P est un ensemble fini de places : $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ représentant les états du système.
- T est un ensemble fini de transitions : $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ représentant les événements ou actions qui modifient ces états.
- $\text{Pre} : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est l'**application d'incidence avant**, associant à chaque arc reliant une place à une transition un poids entier représentant la quantité de jetons nécessaires à l'activation de la transition.
- $\text{Post} : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est l'**application d'incidence arrière**, définissant le nombre de jetons ajoutés dans une place après la réalisation d'une transition.

La **matrice d'incidence** C du réseau est donnée par :

$$C = \text{Post} - \text{Pre}.$$

Graphiquement, un Réseau de Petri est composé de :

- **Places** : représentées par des cercles, associées aux variables d'état du système.
- **Transitions** : représentées par des rectangles, correspondant aux événements ou actions.
- **Arcs** : reliant les places aux transitions (préconditions) ou les transitions aux places (postconditions). Chaque arc peut être pondéré par un entier strictement positif, par défaut égal à 1.

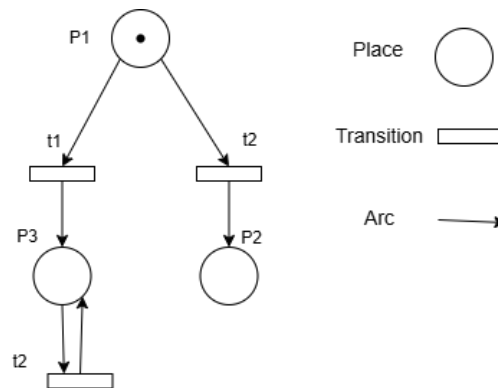


FIGURE 2.1 – Exemple d'une représentation graphique d'un réseau de Petri.

L'état d'un système modélisé par un RdP est défini par le **marquage**, qui indique la répartition des jetons dans les places à un instant donné.

2.4 Marquage d'un Réseau de Petri

Le marquage d'un RdP est précisé par la présence à l'intérieur des places d'un nombre fini (positif ou nul), de marques ou de jetons. Une place est donc vide ou marquée.

Le marquage M d'un RdP à un instant donné est un vecteur dont la valeur de la $i^{\text{ème}}$ composante est le nombre m_i de marques (jetons) dans la place p_i à cet instant

$$M(p) = (m_1, m_2, \dots, m_n).$$

Le marquage initial d'un RdP, $M_0(p)$, est le nombre de marques (jetons) contenues dans la place p .

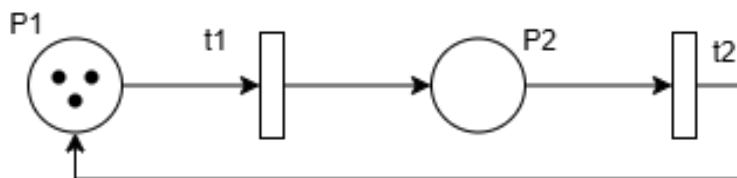


FIGURE 2.2 – Exemple d'un marquage d'un réseau de Petri.

On note $M(p)$ le nombre de jetons contenus dans la place p pour le marquage M , alors le marquage initial est dans l'exemple ci-dessus,

$$M_0 = (M_0(p_1), M_0(p_2)) = (3, 0).$$

2.5 Dynamique des Réseaux de Petri (Evolution du marquage)

2.5.1 Validation d'une transition :

Une transition est validée (on dit aussi sensibilisée ou franchissable ou encore tirable) si toutes ses places d'entrée contiennent au moins un jeton.[11]

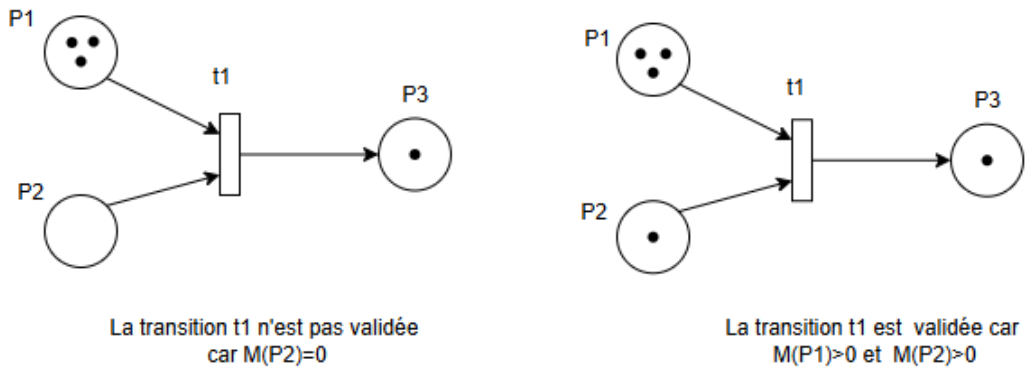


FIGURE 2.3 – Exemple de validation d’une transition.

2.5.2 Franchissement d’une transition :

Le franchissement d’une transition ou le tir d’une transition, consiste à enlever un jeton dans chacune des places d’entrée de la transition et à ajouter un jeton dans chacune des places de sortie de la même transition.[11] Une transition t est franchissable pour un marquage M si et seulement si :

$$\forall p \in P, \quad M(p) \geq \text{pre}(p, t).$$

Si t est franchissable pour le marquage M , le franchissement de t donne le nouveau marquage M' tel que

$$\forall p \in P, \quad M'(p) = M(p) - \text{pre}(p, t) + \text{post}(p, t).$$

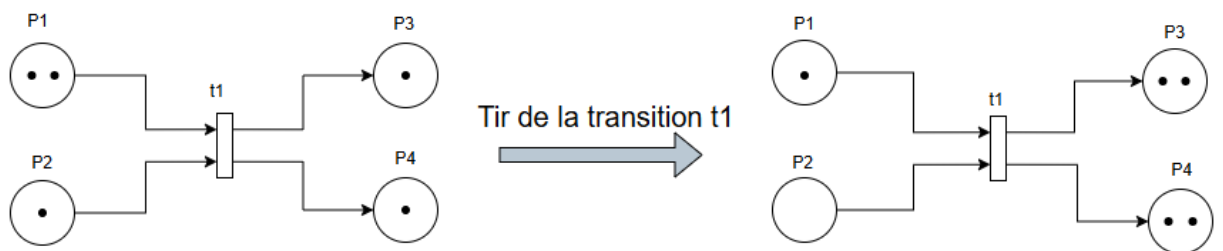


FIGURE 2.4 – Exemple de franchissement de transition .

Le franchissement de la transition t_1 à partir du marquage $M_1 = (2, 1, 1, 1)$ conduit au marquage $M_2 = (1, 0, 2, 2)$, ce qui se note :

$$M_1 \xrightarrow{t_1} M_2.$$

2.5.3 Marquage accessible :

Soit (R, M_0) un réseau de Petri marqué. Un marquage M est accessible si et seulement s'il existe une séquence de franchissement $s \in T^*$ telle que :

$$M_0(s > M).$$

L'ensemble des marquages accessibles, ou ensemble d'accessibilité d'un réseau de Petri, est noté $A(R, M_0)$, où A est l'ensemble des marquages atteints par une séquence de franchissement :

$$A(R, M_0) = \{M \in \mathbb{N}^p, \exists s \in T^*, M_0(s > M)\}.$$

On note $G(R, M_0)$ graphe des marquages accessibles (ou graphe d'accessibilité) de ce réseau de Petri $A(R, M_0)$

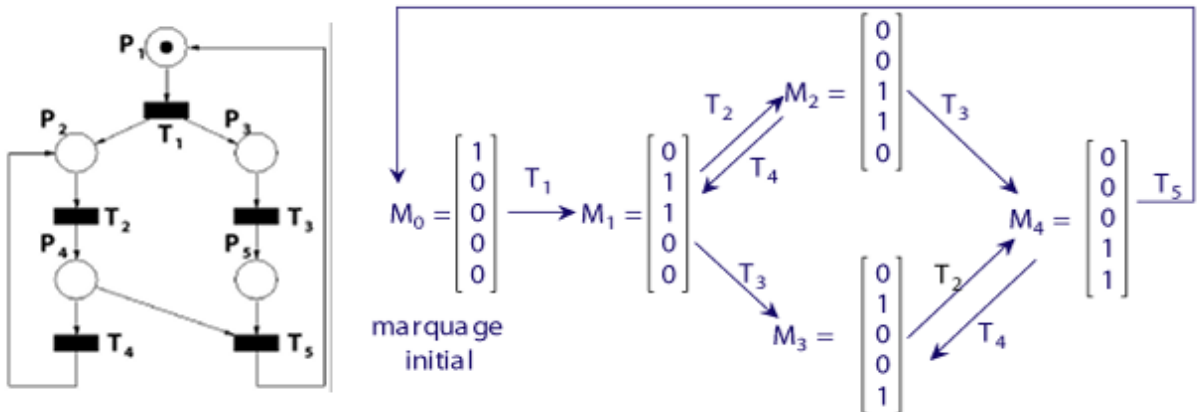


FIGURE 2.5 – Exemple de graphe de marquage accessible d'un RdP.

2.5.4 Conflits et parallélisme

Conflit structurel :

Deux transitions t_1 et t_2 sont en conflit structurel si et seulement si elles ont au moins une place d'entrée en commun. On parle de conflit structurel, car cela ne dépend pas du marquage.[7]

$$\exists p \in P \text{ tel que } \text{pre}(p, t_1) \times \text{pre}(p, t_2) \neq 0.$$

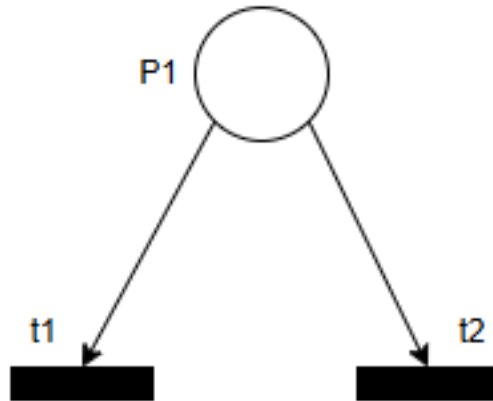


FIGURE 2.6 – Exemple de conflit structurel.

Conflit effectif :

Dans un réseau de Petri, deux transitions t_1 et t_2 sont en conflit effectif pour un marquage M si et seulement si :

$$M \geq \text{pre}(p, t_1) \text{ et } M \geq \text{pre}(p, t_2).$$

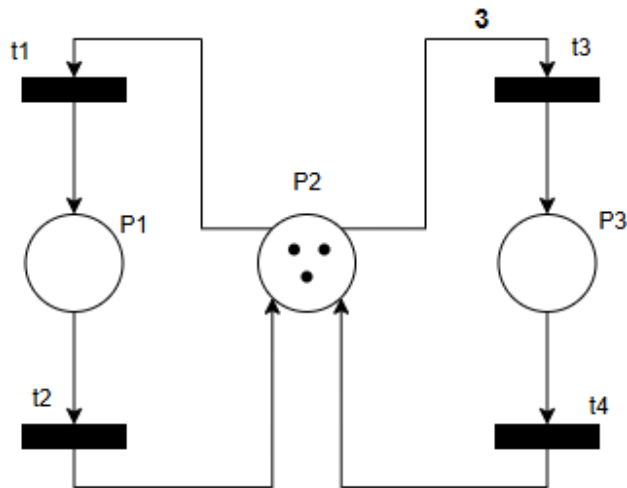


FIGURE 2.7 – Exemple de conflit effectif.

2.6 Propriétés

Cette section décrit les propriétés essentielles des réseaux de Petri, telles que la vivacité et la bornitude.

2.6.1 Réseau vivant :

La propriété de vivacité examine si une partie ou l'ensemble du réseau peut ou non évoluer.[7] Une transition T est vivante pour un marquage initial M_0 si, pour tout marquage accessible M_k , il existe une séquence de franchissements à partir de M contenant T , c'est-à-dire :

$$\forall M \in A(R, M_0), \forall t \in T, \quad \exists s \in T^* \text{ tel que } M(st) > .$$

Une transition T est vivante pour un marquage initial M_0 si pour tout marquage accessible M' , il existe une séquence de franchissement S qui contient la transition T à partir de M' .

Autrement dit, quelle que soit l'évolution du réseau, il subsistera toujours une possibilité de franchir T à nouveau. Un réseau de Petri est vivant pour un marquage initial M_0 si toutes ses transitions sont vivantes pour M_0 , c'est-à-dire si pour toute transition $T_j \in T$, T_j est vivante pour M_0 . [16]

$$\forall M \in A(R, M_0), \quad \forall t \in T, \quad \exists M' \in A(R, M) \text{ tel que } M \xrightarrow{t} M'.$$

2.6.2 Réseau borné :

La bornitude est une propriété essentielle dans l'analyse des réseaux de Petri. Elle permet de vérifier si le nombre de jetons pouvant apparaître dans chaque place du réseau reste limité, quelles que soient les évolutions possibles du système à partir du marquage initial. [13]

Soit un réseau de Petri R avec un marquage initial M_0 . On dit qu'une place P_i est **k -bornée** s'il existe un entier naturel k tel que, pour tout marquage accessible M_j , le nombre de jetons dans cette place ne dépasse jamais k . Formellement :

$$\exists k \in \mathbb{N}, \forall M_j \in A(R, M_0), \quad M_j(P_i) \leq k$$

Dans ce cas, la place P_i est considérée comme bornée. Un réseau de Petri est dit **borné** si toutes ses places sont bornées, c'est-à-dire s'il existe une borne commune $k \in \mathbb{N}$ telle que :

$$\forall M_j \in A(R, M_0), \quad \forall P_i \in P, \quad M_j(P_i) \leq k$$

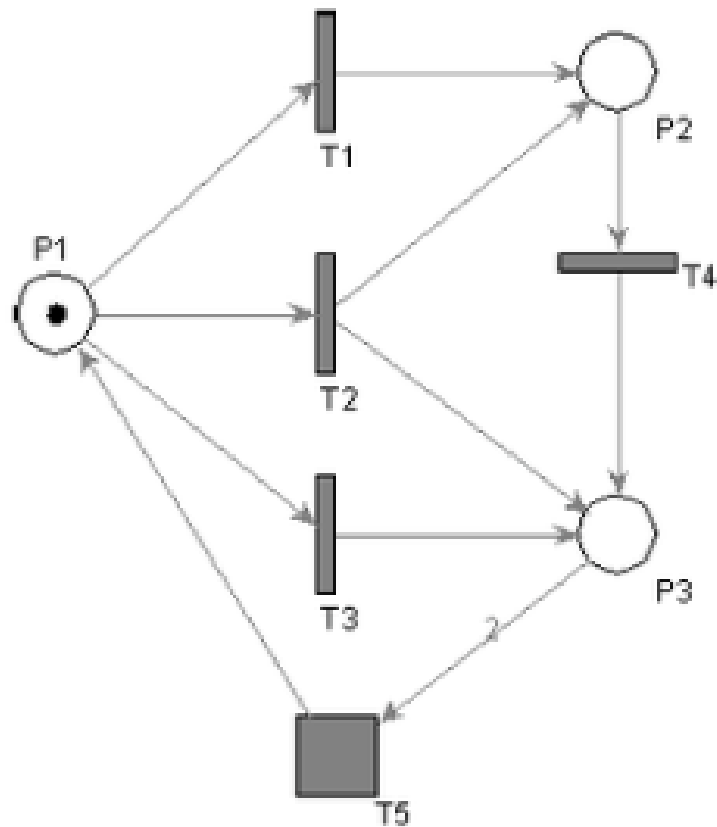


FIGURE 2.8 – Exemple d'un RDP vivant et borné .

2.7 Extensions des réseaux de Petri

2.7.1 Réseaux de Petri généralisés

Un réseau de Petri généralisé est un réseau de Petri dans lequel des poids (nombres entiers strictement positifs) sont associés aux arcs.

- Si un arc (P_i, T_j) a un poids k , alors la transition T_j n'est franchie que si la place P_i possède au moins k jetons. Le franchissement consiste à retirer k jetons de la place P_i .

- Si un arc (T_j, P_i) a un poids k , alors le franchissement de la transition ajoute k jetons à la place P_i .

-Le poids est par défaut est égal à 1 .

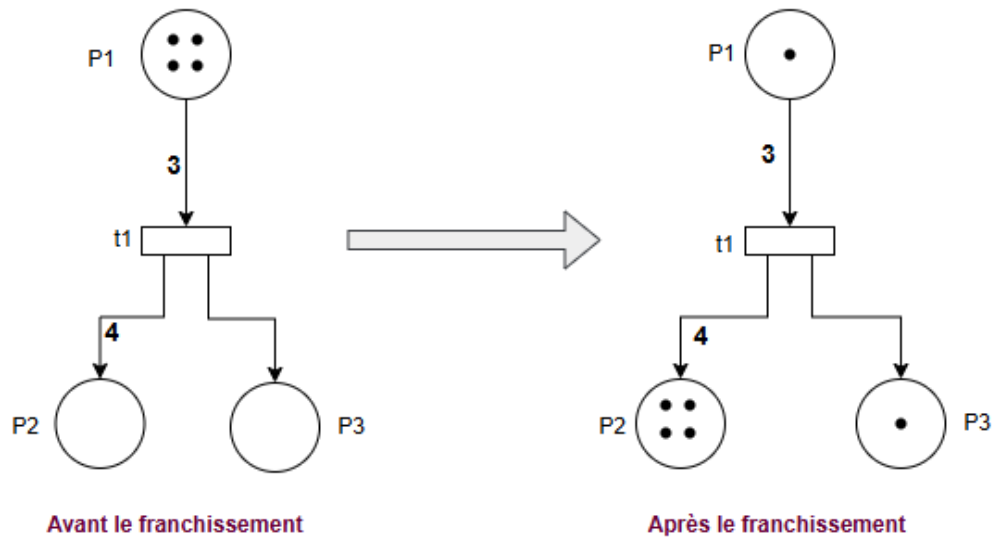


FIGURE 2.9 – Exemple d’un réseau de Petri généralisé .

2.7.2 Réseaux de Petri temporisés

Les RdP temporisés sont une extension des RdP ordinaires. Cette extension est caractérisée par l’introduction de la variable temps. Il existe deux sortes de RdP temporisés :

Les réseaux de Petri P-temporisés

- Un réseau de Petri P -temporisé est défini par le couple (R, d) avec :
- $R = (P, T, Pre, Post)$ est un réseau de Petri classique.
 - $d : T \rightarrow \mathbb{Q}^+$ est la fonction de temporisation.

La règle de tir doit tenir compte du temps. Soit t_j l’instant où une marque est déposée dans une place p . La marque est indisponible (on dit qu’elle est gelée) pendant une durée égale à $D(p)$, c’est-à-dire dans l’intervalle $[t_j; t_j + D(p)]$. Ensuite, la marque peut être utilisée pour le tir d’une transition. [7]

Les réseaux temporisés sont souvent utilisés pour la représentation formelle des synchronisations dans les systèmes.

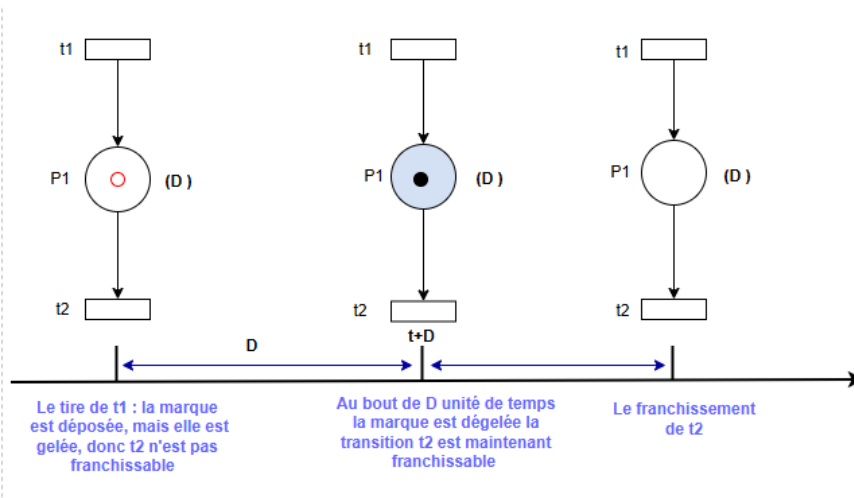


FIGURE 2.10 – Exemple d'un réseau de Petri P-temporisée.

Les réseaux de Petri T-temporisées

La temporisation des transitions consiste à associer une durée de temps à chaque transition. Le tir d'une transition est décomposé en deux durées de temps :

l'enclenchement du tir et la fin du tir, séparés par la durée spécifiée par la fonction de temporisation.[14]

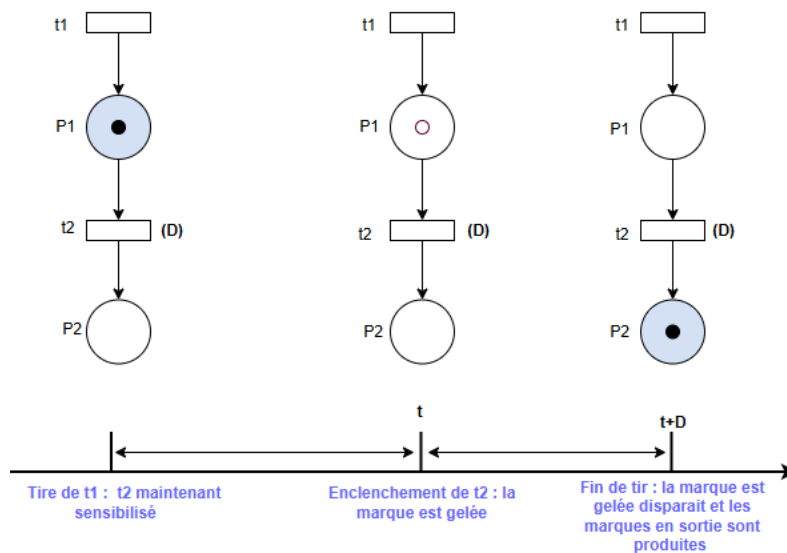


FIGURE 2.11 – Exemple d'un réseau de Petri T-temporisée .

2.7.3 Les réseaux de Petri temporels

Dans les réseaux de Petri temporels, le temps est représenté par un intervalle $[a_i, b_i]$ associé à la transition ou à la place. [5]

Il existe deux formes de réseaux de Petri temporels :

- **Réseaux de Petri à places temporelles** : Les RdP T -temporels qui associent un intervalle temporel de sensibilisation aux transitions, ces modèles sont principalement utilisés pour l'étude des systèmes de télécommunication.
- **Réseaux de Petri à transitions temporelles** : Les RdP P -temporels qui associent un intervalle de temps aux places. Ces intervalles temporels spécifient des durées de séjour.

Les réseaux de Petri T -temporels

Un réseau de Petri T -temporel est un 6-uplet $(P, T, Pre, Post, M_0, IS)$ tel que :

- P est un ensemble fini de places.
- T est un ensemble fini de transitions.
- $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est la fonction de préconditions, indiquant le nombre de jetons requis pour qu'une transition soit franchie.
- $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est la fonction de postconditions, indiquant le nombre de jetons ajoutés après le franchissement d'une transition.
- $M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$ est le marquage initial, spécifiant le nombre initial de jetons dans chaque place.
- $IS : T \rightarrow \mathbb{Q}^+ \times \mathbb{Q}^+$ est une fonction d'intervalle associant à chaque transition $t \in T$ un intervalle temporel $[a_t, b_t]$, où :
 - a_t est le temps minimal avant que t puisse être franchie.
 - b_t est le temps maximal avant que t doive être franchie (si elle est activée).

Les réseaux de Petri P -Temporels

Un réseau de Petri P -temporel est un 6-uplet $(P, T, Pre, Post, M_0, IS)$ dans lequel :

- P est un ensemble fini de places.
- T est un ensemble fini de transitions.
- $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est la fonction de préconditions, indiquant le nombre de jetons requis pour qu'une transition soit franchie.
- $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est la fonction de postconditions, indiquant le nombre de jetons ajoutés après le franchissement d'une transition.

- $M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$ est le marquage initial, spécifiant le nombre initial de jetons dans chaque place.
- $IS : P \rightarrow \mathbb{Q}^+ \times \mathbb{Q}^+$ est une fonction d'intervalle associant à chaque place $p \in P$ un intervalle temporel $[a_p, b_p]$, où :
 - a_p est le temps minimal avant que les jetons de p puissent être utilisés.
 - b_p est le temps maximal avant que les jetons de p doivent être utilisés.

2.7.4 Les réseaux de Petri stochastique

Un réseau de Petri stochastique est le couple (R, Λ) avec :

- R est un réseau de Petri défini par le 5-uplet $(P, T, Pre, Post, M_0)$, où :
 - P est un ensemble fini de places.
 - T est un ensemble fini de transitions.
 - $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est la fonction de préconditions.
 - $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est la fonction de postconditions.
 - $M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$ est le marquage initial.
- $\Lambda : T \rightarrow \mathbb{R}^+$ est une fonction qui associe à chaque transition $t \in T$ un taux de tir (paramètre d'une loi exponentielle), modélisant ainsi le comportement stochastique du réseau.[8]

Les réseaux de Petri stochastique généralisé

Un réseau de Petri stochastique généralisé est un huit-uplet $(P, T, Pre, Post, Inh, pri, W, M_0)$ où :

- P : est l'ensemble des places.
- T : est l'ensemble des transitions temporisées et des transitions immédiates.
- $Pre, Post, Inh : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ sont les fonctions d'incidence avant, d'incidence arrière et d'inhibition respectivement.
- $pri : T \rightarrow \{0, 1\}$ est la fonction de priorité qui associe :
 - la valeur 0 à chaque transition temporisée ;
 - la valeur 1 à chaque transition immédiate.
- $W : T \rightarrow \mathbb{R}^+$ est une fonction qui associe à chaque transition temporisée un taux de franchissement.
- $M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$ est le marquage initial du réseau.

2.8 Conclusion

L'évaluation des performances vise à déterminer les forces et les faiblesses d'un système pour une fonction ou un environnement donné. Face à la complexité de certains systèmes, les réseaux de Petri s'avèrent être un outil précieux. Ils permettent de combiner l'analyse qualitative et l'analyse quantitative, ce qui facilite l'obtention de résultats pour les indicateurs de performance. De plus, ils permettent d'intégrer facilement les différentes structures de synchronisation et de partage des ressources.

Chapitre 3

Ajustement des processus de Débarquement et Embarquement

3.1 Introduction

Le bon fonctionnement d'un terminal à conteneurs repose sur la coordination efficace de plusieurs opérations, en particulier celles liées au débarquement et à l'embarquement des conteneurs. Ces opérations mobilisent différents équipements, tels que les portiques de quai (QC), les grues mobiles, les camions remorqueurs (Mols), les RTGs et les stackers, chacun jouant un rôle stratégique dans la chaîne logistique portuaire.

Ce chapitre est dédié à l'analyse détaillée de ces processus au sein du terminal BMT. Nous y décrivons d'abord les principaux mouvements des conteneurs dans le terminal, depuis l'arrivée du navire jusqu'à la livraison ou l'entreposage des conteneurs. Nous présentons ensuite les règles d'affectation des équipements aux postes à quai, ainsi que les stratégies d'exploitation adoptées par le terminal. Enfin, nous procédons à l'identification des lois de durée de service des différents engins, à partir de données réelles collectées sur le terrain, ce qui constituera une base essentielle pour la modélisation ultérieure.

3.2 Description des principaux mouvements des conteneurs

Le terminal à conteneurs est constitué d'une zone de stockage où les conteneurs sont empilés et entreposés, ainsi que de postes à quai destinés à l'accostage des navires. Les conteneurs y sont déchargés, transférés, stockés et

livrés à l'aide de divers équipements de manutention et de transport, tels que les navires, les portiques de quai, les RTG, les stackers, les chariots élévateurs, les remorques et les trains.

Lorsqu'un porte-conteneurs arrive au port, il suit les deux étapes successives suivantes :

3.2.1 L'étape de mouillage

À l'exception des car-ferries et des porte-conteneurs, tout navire arrivant au port de Béjaïa est d'abord mis en attente dans la zone de mouillage (rade) pour une durée variable en fonction de plusieurs facteurs tels que le type de navire, son tirant d'eau, sa cargaison, ainsi que les conditions météorologiques et le trafic portuaire. Toutefois, en cas d'occupation des postes à quai ou d'indisponibilité de pilotes ou de remorqueurs, certains porte-conteneurs peuvent également être contraints de mouiller avant d'accoster.[9]

3.2.2 L'étape de service

Après le mouillage, vient l'étape d'accostage des navires qui est assuré par les sections opérationnelles de l'EPB, telles que les sections de pilotage et de remorquage.[18]

Traitement du navire

Le traitement du navire commence par le débarquement des conteneurs. Cette opération est réalisée à l'aide de deux types d'équipements :

- **Les deux portiques de quai (QC)** : équipés de chariots capables de soulever les conteneurs directement depuis le porte-conteneurs et de les déposer sur les camions remorqueurs de BMT.
- **Les trois grues mobiles (MHC , MHC3 et LIEBHERR)** : également dotées de chariots permettant de soulever les conteneurs depuis le navire, mais nécessitant l'intervention des stackers pour les transférer sur les camions remorqueurs de BMT.

Une fois le débarquement terminé, les opérations sont inversées pour procéder à l'embarquement des conteneurs à bord du navire.

Le transfert

Une fois le conteneur débarqué sur le camion remorqueur (Mol), il est acheminé vers sa zone d'entreposage en fonction de sa nature.

Si le conteneur contient des matières dangereuses, il est dirigé vers le Centre de Transit de Matières Dangereuses (C.T.M.D.), une zone spécialement aménagée pour assurer la sécurité du stockage de ce type de cargaison.

S'il s'agit d'un conteneur réfrigéré (reefer), il est transporté vers la zone des conteneurs frigorifiques, où il sera branché sur une alimentation électrique pour maintenir la température requise.

Dans le cas des conteneurs standards, ils sont entreposés au parc plein, en attente de leur prochaine affectation

Stockage

Les conteneurs déplacés sont rangés, empilés et entreposés dans le parc à conteneurs pour une durée variable, en fonction du temps nécessaire au client pour effectuer les démarches de dédouanement et réclamer son conteneur.[12]

L'équipement utilisé pour ces opérations est le RTG (Rubber-Tyred Gantry Crane). Lors du stockage, le camion se positionne sous le RTG, qui soulève ensuite le conteneur pour le déposer à l'emplacement prévu dans le parc.

Il est parfois nécessaire de déplacer un conteneur déjà stocké, notamment lorsqu'un client réclame un conteneur situé en bas d'une pile. Dans ce cas, les conteneurs empilés au-dessus doivent être déplacés vers d'autres emplacements avant d'accéder au conteneur demandé.

Livraison

La livraison concerne aussi bien les conteneurs pleins que les marchandises dépotées. Deux méthodes sont utilisées pour cette opération :

- **Livraison directe** : Le conteneur plein est chargé directement sur le camion du client à l'aide d'un RTG, lorsque ce dernier accède au parc plein.
- **Dépotage** : Le conteneur est d'abord déplacé du parc plein vers la zone de dépotage. À l'aide d'un RTG, il est chargé sur un camion de BMT pour être transporté, puis déchargé avec un stacker dans la zone dédiée. Le dépotage peut être effectué à l'aide de chariots élévateurs si nécessaire, ou bien manuellement par un groupe de travailleurs, qui transfèrent la marchandise directement sur le camion du client. Une fois vidé, le conteneur est stocké dans le parc des vides.

3.3 Affectation des équipements au niveau de BMT

3.3.1 Décision d'affectation des Grues de Quai

L'entreprise BMT dispose de cinq postes à quai, de trois grues mobiles (MHC) et de deux portiques de quai (QC). L'affectation des équipements est organisée comme suit : deux grues (MHC, LIEBHERR) sont dédiées au poste 24, tandis que le poste 22 est équipé de deux QC et d'une grue mobile (MHC3).

3.3.2 Décision d'affectation des Mols

L'affectation des camions remorqueurs (Mols) dépend du nombre de navires accostés. BMT emploie en moyenne 12 Mols par shift de travail, avec une répartition standard de 3 Mols par grue de quai (QC ou grue mobile).

Lorsque un seul navire est accosté, davantage de Mols peuvent être affectés à chaque moyen de débarquement. En revanche, si deux navires sont accostés et que d'autres arrivages de l'EPB sont prévus, le nombre de Mols par équipement diminue, car BMT prend également en charge le transfert des conteneurs débarqués par l'EPB vers les blocs de stockage.

Ainsi, l'affectation des Mols est ajustée en fonction de la situation opérationnelle du terminal.

3.3.3 Décision d'affectation des RTGs

BMT possède 5 RTGs fonctionnels durant chaque shift de travail, elle emploie un RTG par bloc de stockage des conteneurs pleins. Un bloc de stockage contient les TCs débarqués et ceux destinés à la livraison au client final. Sachant qu'un TC doit passer par le processus visite avant qu'il soit livré. Les opérations de préparation visite et retour visite se font durant les shifts nuit et double nuits, durant les shifts nuit et double nuits il y a pas de livraison au client final. Au final, on conclut que les RTGs servent trois types de clients, le client final, Mols affectés au débarquement et les Mols affectés à la zone visite (livraison à la zone visite ou retour de la zone visite).

3.3.4 Choix du bloc de débarquement

Durant les shifts de livraison aux clients finaux, la décision du bloc de débarquement est conditionnée par la saturation aux niveaux des blocs de stockage. Une saturation en terme des camions des clients finaux. Ainsi, le

bloc le moins saturé sera choisi pour le débarquement. Durant les shifts où il n'y a pas de livraison aux clients finaux, le débarquement se fait sur tous les blocs, le bloc A est préféré car c'est le plus proche du quai, et il rassure la continuité du processus de débarquement.

3.4 Identification des lois des durées de service des différents engins

3.4.1 Collecte des données :

Pour réaliser la présente étude, nous avons collecté les données auprès des services de manutention, d'aconage ainsi que du service technique de la BMT, dans le but d'analyser le fonctionnement du processus de débarquement et d'évaluer ses performances. Le service technique nous a fourni des données prêtes à l'exploitation pour chaque engin, incluant la durée de service, la durée de réparation ainsi que la durée de panne, recueillies sur plusieurs jours, à différents moments de la journée, couvrant l'ensemble des quatre shifts. L'analyse statistique visant à identifier les lois de distribution des temps observés a été réalisée à l'aide du logiciel R.

3.4.2 Identification de la loi de la durée de service de la grue lors de déchargement d'un conteneur

On note X_1 la variable aléatoire correspondant à la durée de service(en minutes) de la grue pour décharger un conteneur, en incluant les interruptions dues aux pannes.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sont représentés dans le tableau Table 3.1 :

Loi	Statistique D	valuer P	Valeur critique	Décision ($\alpha = 0,05$)
Exponentielle	0.2238	0.0004	0.1484	Rejeter
Normale	0.1181	0.1768	0.1484	Accepter
Erlang	0.0638	0.8624	0.1484	Accepter
Weibull	0.0863	0.5309	0.1484	Accepter

TABLE 3.1 – Ajustement de la loi de service de la grue lors de déchargement d'un conteneur.

L'interprétation des résultats : Le test de Kolmogorov-Smirnov valide l'ajustement de la loi de la variable aléatoire X_1 par une loi Erlang de paramètres $k = 3$ et $m = 0.016045$.

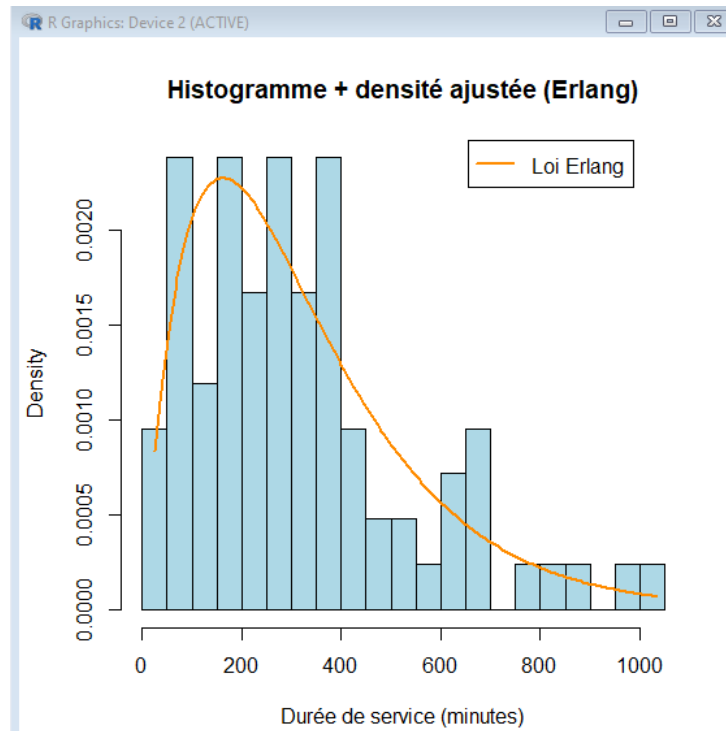


FIGURE 3.1 – L’histogramme et la courbe de la densité de probabilité de la loi de la durée de service de la grue (déchargement d’un conteneur).

3.4.3 Identification de la loi de la durée de service de la grue lors de chargement d’un conteneur

On note X_2 la variable aléatoire correspondant à la durée de service (en minutes) de la grue pour charger un conteneur, en incluant les interruptions dues aux pannes.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sont représentés dans le tableau Table 3.2 :

Loi	Statistique D	valueur P	Valeur critique	Décision ($\alpha = 0,05$)
Exponentielle	0.1787	0.0081	0.1484	Rejeter
Normale	0.1017	0.3276	0.1484	Accepter
Erlang	0.0658	0.8371	0.1484	Accepter
Weibull	0.0472	0.9878	0.1484	Accepter

TABLE 3.2 – Ajustement de la loi de service de la grue lors de chargement d'un conteneur.

L'interprétation des résultats : Le test de Kolmogorov-Smirnov valide l'ajustement de la loi de la variable aléatoire X_2 par une loi Weibull de paramètres $\alpha = 1.82$ et $\beta = 29.90$.

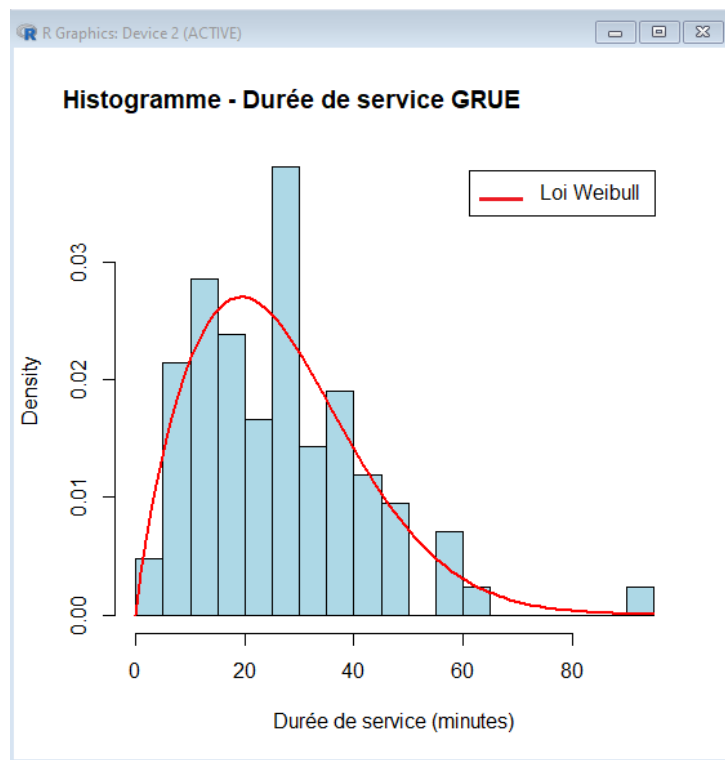


FIGURE 3.2 – L'histogramme et la courbe de la densité de probabilité de la loi de la durée de service de la grue (chargement d'un conteneur).

3.4.4 Identification de la loi de la durée de service de QC lors de déchargement d'un conteneur

On note X_3 la variable aléatoire correspondant à la durée de service (en minutes) de QC pour décharger un conteneur, en incluant les interruptions dues aux pannes.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sont représentés dans le tableau Table 3.3 :

Loi	Statistique D	valeur P	Valeur critique	Décision
Exponentielle	0.1782	0.0084	0.146	Rejeter
Normale	0.1285	0.1142	0.146	Accepter
Erlang	0.0617	0.8866	0.146	Accepter
Weibull	0.0765	0.6810	0.146	Accepter

TABLE 3.3 – Ajustement de la loi de service du QC lors de déchargement d'un conteneur.

L'interprétation des résultats : Le test de Kolmogorov-Smirnov valide l'ajustement de la loi de la variable aléatoire X_3 par une loi Erlang de paramètres $k=3$ et $m=0.028$.

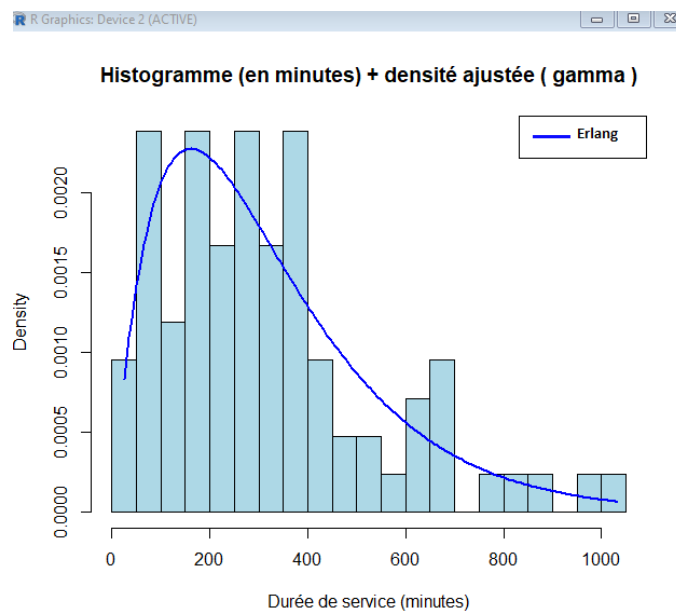


FIGURE 3.3 – L'historgramme et la courbe de la densité de probabilité de la loi de la durée de service du QC (déchargement d'un conteneur).

3.4.5 Identification de la loi de la durée de service de QC lors de chargement d'un conteneur

On note X_4 la variable aléatoire correspondant à la durée de service (en minutes) de QC pour charger un conteneur, en incluant les interruptions dues aux pannes.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sont représentés dans le tableau Table 3.4 :

Loi	Statistique D	valeur P	Valeur critique	Décision
Exponentielle	0.1350	0.0851	0.1485	Accepter
Normale	0.0708	0.7662	0.1485	Accepter
Erlang	0.3356	0.0001	0.1485	Rejeter
Weibull	0.1093	0.2491	0.1485	Accepter

TABLE 3.4 – Ajustement de la loi de service du QC lors de chargement.

L'interprétation des résultats : Le test de Kolmogorov-Smirnov valide l'ajustement de la loi de la variable aléatoire X_4 par une loi Normale de paramètres $\mu = 7.69$ et $\sigma = 13.64$

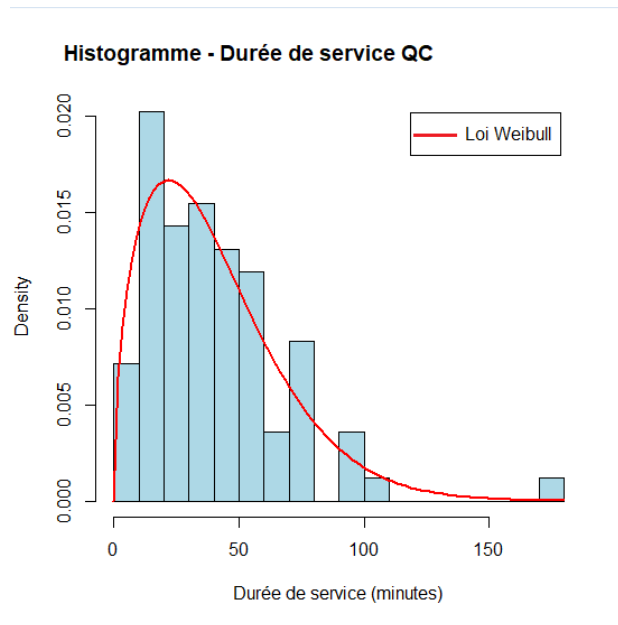


FIGURE 3.4 – L'historgramme et la courbe de la densité de probabilité de la loi de la durée de service du QC (chargement d'un conteneur).

3.4.6 Identification de la loi de la durée de service des RTGs lors de déchargement d'un conteneur.

On note X_5 la variable aléatoire correspondant à la durée de service (en minutes) de la RTG, incluant les interruptions dues aux pannes.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sont représentés dans le tableau Table 3.5 :

Loi	Statistique D	Valeur p	Valeur critique	Décision
Normale	0.0593	0.8738	0.134	Acceptée
Exponentielle	0.2728	6.84e-07	0.134	Rejetée
Weibull	0.0504	0.9616	0.134	Acceptée
Erlang	0.0844	0.4751	0.134	Acceptée

TABLE 3.5 – Ajustement de la loi de service des RTGs lors de déchargement d'un conteneur.

L'interprétation des résultats : Le test de Kolmogorov-Smirnov valide l'ajustement de la loi de la variable aléatoire X_5 par la loi Weibull de paramètres $\alpha=2.2721$ et $\beta=45.1716$.

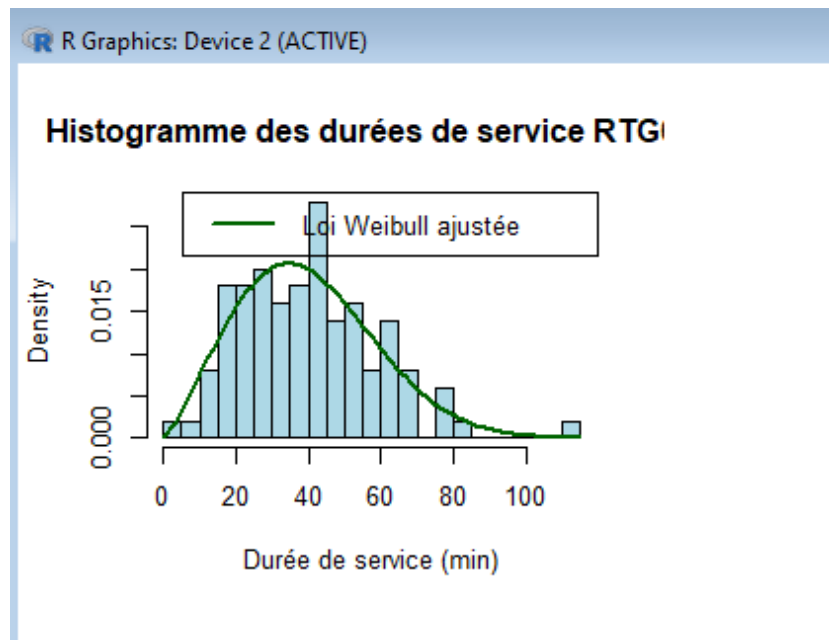


FIGURE 3.5 – L'histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des RTGs (déchargement d'un conteneur).

3.4.7 Identification de la loi de la durée de service des RTGs lors de chargement d'un conteneur

On note X_6 la variable aléatoire correspondant à la durée de service (en minutes) de la RTG pour charger un conteneur, en incluant les interruptions dues aux pannes.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sont représentés dans le tableau Table 3.6 :

Loi	Statistique D	Valeur p	Valeur critique	Décision
Normale	0.0722	0.8351	0.1581	Acceptée
Exponentielle	0.4962	2.99e-16	0.1581	Rejetée
Weibull	0.0840	0.6729	0.1581	Acceptée
Erlang	0.0814	0.7112	0.1581	Acceptée

TABLE 3.6 – Ajustement de la loi de service des RTGs lors de chargement d'un conteneur.

L'interprétation des résultats : Le test de Kolmogorov-Smirnov valide l'ajustement de la loi de la variable aléatoire X_6 par la loi Normale de paramètres $\mu=97.47$ et $\beta=13.64$

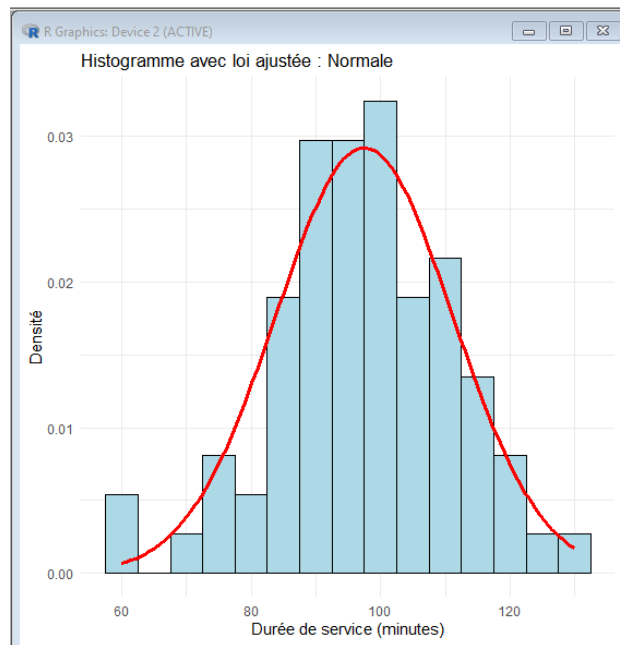


FIGURE 3.6 – L'historgramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des RTGs (chargement d'un conteneur).

3.4.8 Identification de la loi de la durée de service des camions de déchargement d'un conteneur

On note X_7 la variable aléatoire correspondant à la durée de service (en minutes) du camion, incluant les interruptions dues aux pannes.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sont représentés dans le tableau Table 3.7 :

Loi	Statistique D	Valeur p	Valeur critique	Décision
Normale	0.0763	0.5759	0.143	Acceptée
Exponentielle	0.3686	7.11e-07	0.143	Rejetée
Weibull	0.0672	0.7413	0.143	Acceptée
Erlang	0.0872	0.4115	0.143	Acceptée

TABLE 3.7 – Ajustement de la loi de service des camions remorques portuaire

L'interprétation des résultats : Le test de Kolmogorov-Smirnov valide l'ajustement de la loi de la variable aléatoire X_7 par la loi weibull de paramètres $\alpha=2.342126$ et $\beta=41.078870$.

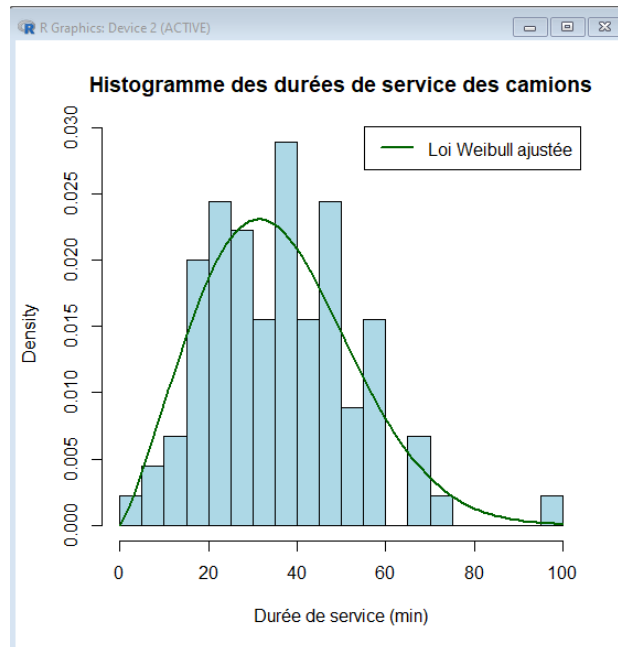


FIGURE 3.7 – L'histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des camions portuaire (déchargement d'un conteneur).

3.4.9 Identification de la loi de la durée de service des camions lors de chargement d'un conteneur

On note X_8 la variable aléatoire correspondant à la durée de service (en minutes) des camions pour charger un conteneur, en incluant les interruptions dues aux pannes.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sont représentés dans le tableau Table 3.8 :

Loi	Statistique D	Valeur p	Valeur critique	Décision
Normale	0.0838	0.5673	0.1485	Acceptée
Exponentielle	0.2530	0.006	0.1485	Rejetée
Weibull	0.0711	0.7618	0.1485	Acceptée
Erlang	0.1376	0.0754	0.1485	Acceptée

TABLE 3.8 – Ajustement de la loi de service des camions.

L'interprétation des résultats : Le test de Kolmogorov-Smirnov valide l'ajustement de la loi de la variable aléatoire X_8 par la loi Weibull de paramètres $\alpha=1.512345$ et $\beta=45.678901$

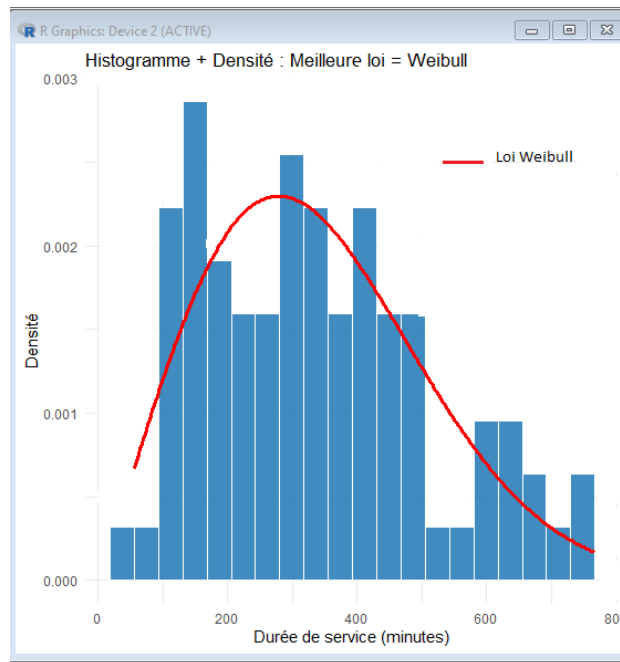


FIGURE 3.8 – L'histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des camions portuaire (chargement d'un conteneur) .

3.4.10 Identification de la loi de la durée de service des steackers lors de déchargement d'un conteneur

On note X_9 la variable aléatoire correspondant à la durée de service (en minutes) de Steackers pour décharger un conteneur, en incluant les interruptions dues aux pannes.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sont représentés dans le tableau Table 3.9 :

Loi	Statistique D	Valeur p	Valeur critique	Décision
Normale	0.0540	0.943	0.143	Acceptée
Exponentielle	0.2795	1.04e-06	0.143	Rejetée
Weibull	0.0554	0.931	0.143	Acceptée
Erlang	0.0894	0.443	0.143	Acceptée

TABLE 3.9 – Ajustement de la loi de service des steackers.

L'interprétation des résultats : Le test de Kolmogorov-Smirnov valide l'ajustement de la loi de la variable aléatoire X_9 par la loi normale de paramètres $\mu = 37.59$ et $\sigma = 19.23$.

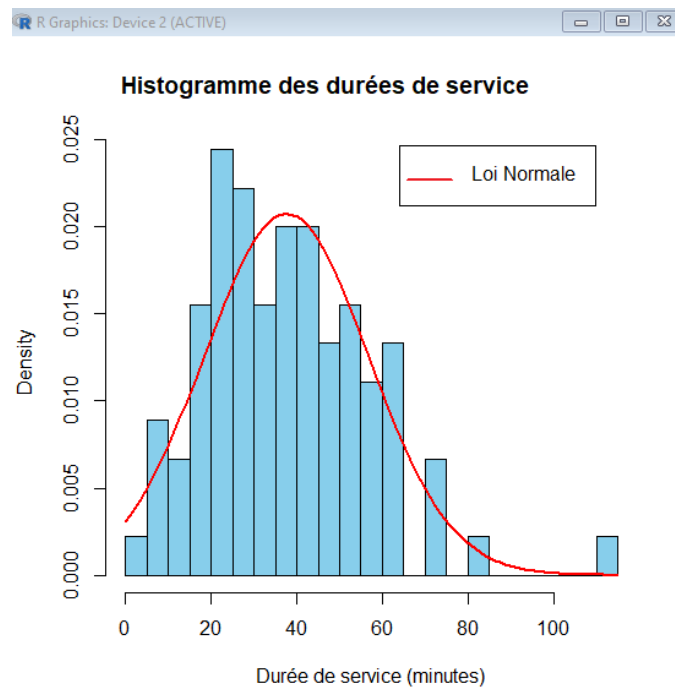


FIGURE 3.9 – L'histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des steackers (déchargement d'un conteneur).

3.4.11 Identification de la loi de la durée de service des steackers lors de chargement d'un conteneur

On note X_{10} la variable aléatoire correspondant à la durée de service (en minutes) de Steakers pour charger un conteneur, en incluant les interruptions dues aux pannes.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sont représentés dans le tableau Table 3.10 :

Loi	Statistique D	Valeur p	Valeur critique	Décision
Normale	0.1108	0.1719	0.136	Acceptée
Exponentielle	0.1896	0.0015	0.136	Rejetée
Weibull	0.0653	0.7871	0.136	Acceptée
Erlang	0.0528	0.9436	0.136	Acceptée

TABLE 3.10 – Ajustement de la loi de service des steackers.

L'interprétation des résultats : Le test de Kolmogorov-Smirnov valide l'ajustement de la loi de la variable aléatoire X_{10} par la loi Erlang de paramètres $k = 1$ et $m = 19.32$.

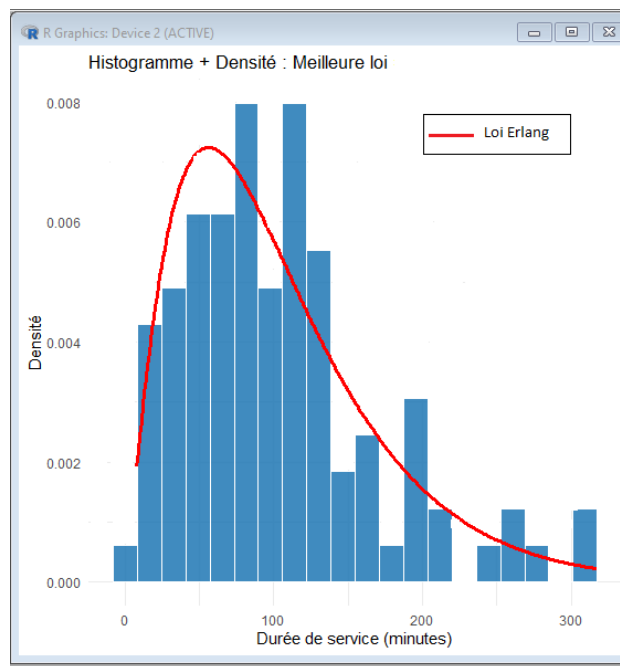


FIGURE 3.10 – L'histogramme et la courbe de densité de probabilité de la loi de la durée de service des steackers (chargement d'un conteneur).

3.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'analyse détaillée des opérations de débarquement et d'embarquement des conteneurs au sein du terminal BMT. Nous y avons décrit les différentes étapes logistiques, les itinéraires suivis par les conteneurs, ainsi que les règles d'affectation des équipements de manutention tels que les portiques de quai (QC), les grues mobiles, les camions remorqueurs (Mols), les RTGs et les stackers.

À partir de données réelles collectées sur une période d'observation, nous avons procédé à l'identification des lois de durée de service de chaque type d'équipement. L'ajustement statistique, réalisé à l'aide de l'outil R, a permis de déterminer les distributions les plus appropriées pour modéliser ces durées, en distinguant les opérations d'embarquement de celles de débarquement.

L'ensemble de ces résultats constitue une base solide pour la modélisation du fonctionnement du terminal. Ils seront utilisés dans le chapitre suivant pour construire et simuler un modèle dynamique du système à l'aide des réseaux de Petri.

Chapitre 4

Modélisation et simulation des performances du terminal

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons modéliser le mouvement du débarquement des conteneurs au niveau du terminal à conteneurs (BMT) en utilisant les réseaux de Petri, un formalisme particulièrement adapté à ce type de système. Une nouveauté importante de cette modélisation, par rapport aux études précédentes, réside dans la prise en compte des pannes des équipements de manutention, notamment les grues de quai (QC) et les grues mobiles, dont l'indisponibilité temporaire peut perturber le bon déroulement des opérations. L'intégration de ces défaillances permet d'analyser plus finement l'impact de la disponibilité des ressources sur les performances du terminal.

4.2 La modélisation du processus de débarquement et d'embarquement des conteneurs via les réseaux de Petri (RDP) :

Étant donné la complexité du processus étudié, marquée par des phénomènes de parallélisme, de synchronisation et de partage de ressources, l'utilisation des Réseaux de Petri (RdP) s'est imposée comme une approche appropriée pour l'évaluation rigoureuse et fiable des indicateurs de performance du terminal.

4.2.1 Description de modèle de débarquement

Dans ce modèle on a :

- La place **p1** concerne la rade.
- La place **p2** correspond aux cinq postes à quai.
- Les places **p3** et **p4** représentent le groupe de conteneurs transportés par un navire.
- La place **p5** est marquée initialement par deux jetons représentant les deux QCs.
- La place **p6** est marquée initialement par trois jetons représentant les trois grues.
- La place **p7** représente les conteneurs sur le quai (conteneurs débarqués avec la grue).
- La place **p8** représente les conteneurs sur le camion portuaire (conteneurs débarqués avec le QC).
- Les places **p9** et **p14** sont marquées initialement par six jetons représentant les deux camions à remorque.
- La place **p10** est marquée initialement par neuf jetons représentant les steackers.
- La place **p11** représente les conteneurs sur le camion portuaire (conteneurs débarqués avec la grue).
- La place **p12** est marquée initialement par six jetons représentant les RTGs.
- La place **p13** représente les blocs de stockage de capacité maximale 10 300 EVP.
- La place **p15** contient les conteneurs livrés.
- La place **p16** représente la file des clients qui arrivent.
- La place **p17** et **p18** sont marquées initialement par un jeton représentant l'engin qui est en réparation.

La présence d'un jeton dans la place **p1** indique qu'un navire est en attente dans la rade, tandis qu'un jeton dans la place **p2** signifie qu'un poste à quai est disponible. Ces deux jetons permettent le franchissement de la transition **t2**, représentant l'accostage du navire. Une fois cette transition franchie, un nombre **k** de jetons est ajouté à la place **p4** et un nombre **k'** à la place **p3**, correspondant respectivement aux conteneurs à débarquer.

L'affectation des engins au sein de BMT se fait comme suit : deux portiques de quai (QC) et une grue sont dédiés au débarquement d'un navire, et deux grues sont affectées au débarquement d'un autre.

Dans notre modélisation, le débarquement avec les deux QC est représenté par la transition **t3** pour QC1 : elle est franchie si la place **p5** (QC disponible), **p3** (conteneur à débarquer), et **p14** (camion libre) contiennent chacune un jeton. De manière analogue, la transition **t4** représente le débarquement avec QC2.

La transition immédiate **t16** modélise une panne du QC. Dans ce cas, un jeton est placé dans **p18**. Si la réparation dure au moins 45 minutes, la transition **t17** est franchie et le QC reprend son activité. Sinon, c'est la transition **t18** qui sera franchie, alors la place **p5** reçoit un jeton.

Le débarquement avec une grue est représenté par les transitions **t5**, **t6** et **t7**. **t6** et **t5** sont franchies si la place **p6** (grue) et la place **p4** (conteneur) ont chacun un jeton ; la transition **t7** est franchie si la place **p6** (grue) et la place **p3** (conteneur) ont chacun un jeton. Dans les deux cas, un jeton est ajouté à la place **p7**, représentant un conteneur déposé sur le quai.

La transition immédiate **t13** modélise une panne de grue. Un jeton est alors placé dans **p17**. Si la réparation prend moins de 45 minutes, la transition **t14** est franchie et la grue reprend son activité. Sinon, c'est la transition **t15** qui sera franchie alors la place **p6** reçoit un jeton.

La transition **t8**, représentant l'opération du steacker qui charge un conteneur sur un camion, est franchie si un jeton est présent dans la place **p9** (camion portuaire), **p10** (steacker), et **p7** (conteneur sur le quai). En conséquence, la place **p11** reçoit un jeton, représentant un conteneur sur le camion.

Les transitions **t9** et **t10** sont franchies lorsque la place **p12** contient un jeton, indiquant la disponibilité d'un RTG pour le déchargement des conteneurs sur les camions.

La transition **t12** modélise l'arrivée des clients, entraînant l'augmentation du nombre de jetons dans la place **p16**.

À la fin du débarquement d'un navire, lorsque les places **p3** et **p4** ne contiennent plus de jetons, la transition de libération du quai **t19** peut être franchie. Lors de son franchissement, un jeton est ajouté dans la place **p2**.

Enfin, la transition **t11** représente la livraison d'un conteneur. Elle est franchie lorsqu'un jeton est présent dans **p13** (conteneur demandé). Le jeton est alors retiré de **p13** et ajouté à **p15**, représentant un conteneur livré.

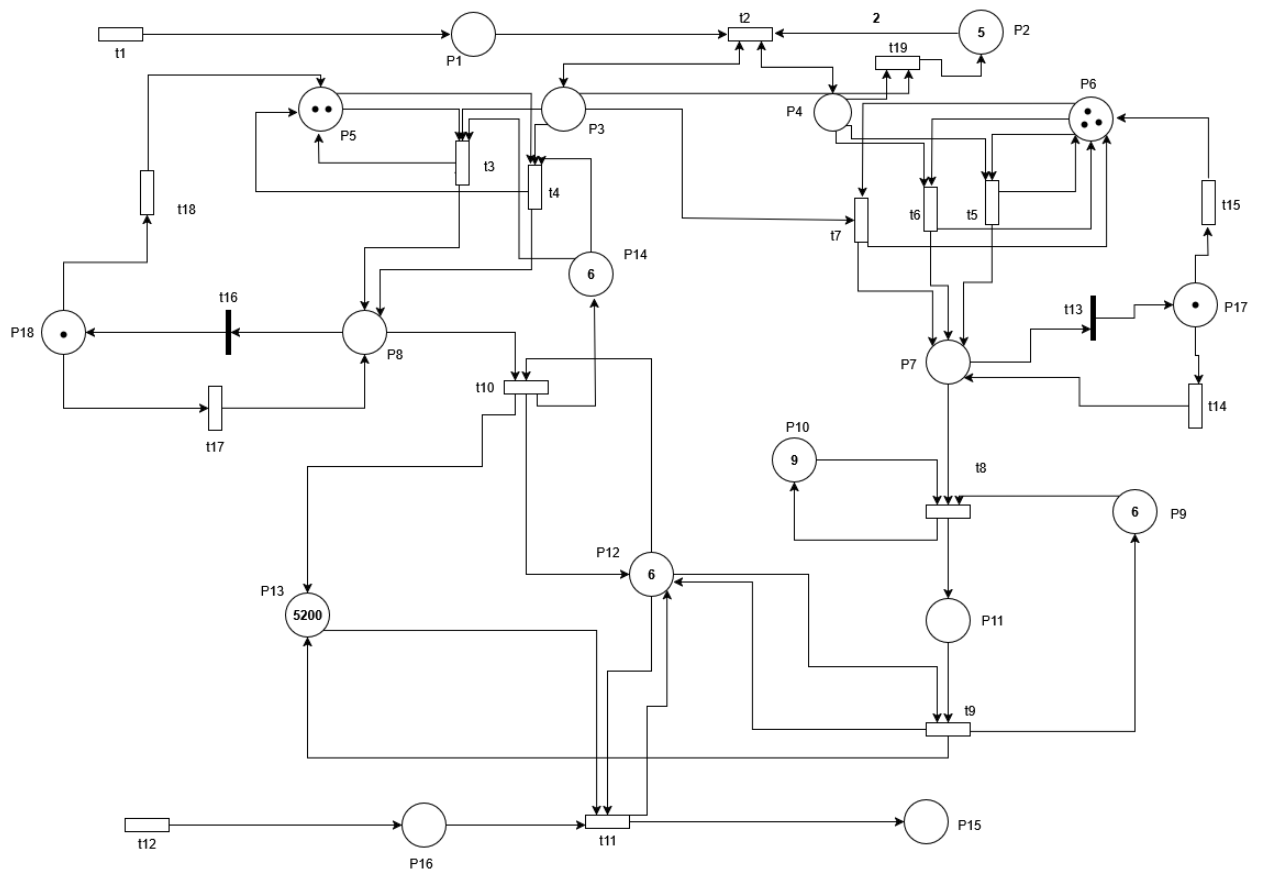


FIGURE 4.1 – – La modélisation du processus de débarquement avec les réseaux de Petri.

4.2.2 Description de modèle d'embarquement

La restitution des conteneurs vides au parc vide de BMT se fait par le franchissement de la transition τ_1 . Ainsi, un jeton est ajouté à la place p_1 , représentant un conteneur vide retourné.

Le transfert de ce conteneur vers le quai est modélisé par la transition τ_2 . Cette transition n'est tirable que si un steacker (jeton en p_2) et un camion (jeton en p_3) sont simultanément disponibles. Son franchissement retire les jetons de la place p_2 et de la place p_3 , puis dépose un jeton dans la place p_4 , indiquant qu'un conteneur vide a été acheminé au quai.

L'embarquement à bord du navire est assuré par les grues mobiles et les portiques de quai (QC). Les transitions τ_3 et τ_4 en rendent compte : cha-

cune déplace un jeton de la place p_4 vers la place p_7 , ce qui correspond à un conteneur effectivement embarqué.

La transition immédiate t_6 modélise une panne de grue. Dans ce cas, un jeton est placé dans la place p_8 . Si la réparation est effectuée en moins de 45 minutes, la transition t_8 est franchie et la grue reprend son activité. Sinon, c'est la transition t_7 qui sera franchie et la place p_5 reçoit un jeton.

La transition immédiate t_9 représente une panne de portique de quai (QC). Un jeton est alors déposé dans p_9 . Si la durée de réparation est inférieure à 45 minutes, la transition t_{10} est franchie, autorisant la reprise du fonctionnement. Dans le cas contraire, c'est la transition t_{11} qui est franchie, et la place p_6 reçoit un jeton.

Enfin, la transition t_5 représente à la fois l'embarquement des M conteneurs restants et la libération du poste à quai.

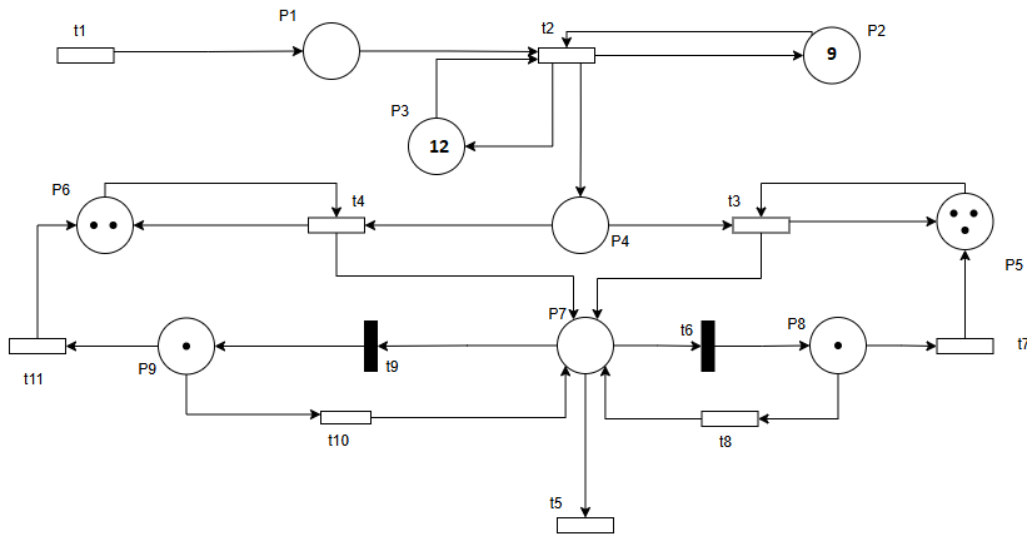


FIGURE 4.2 – La modélisation du processus d'embarquement avec les réseaux de Petri.

4.3 Résultats de la simulation et évaluation des performances

Pour modéliser et calculer les performances, nous avons utilisé le logiciel GRIF.

4.3.1 Présentation de l'interface GRIF

GRIF est une plate-forme logicielle dédiée à l'analyse des systèmes, permettant le calcul d'indicateurs clés liés à la fiabilité, à la disponibilité, à la performance et à la sécurité. Le module *Petri* de GRIF permet de modéliser des systèmes dynamiques complexes à l'aide des Réseaux de Petri.

Ce module repose sur le moteur **MOCA-RP** (pour *Monte Carlo Réseaux de Petri*), un outil de simulation performant basé sur la méthode de Monte Carlo, permettant une exécution rapide et efficace des calculs.

L'interface de modélisation est intuitive et conviviale. Elle permet la création graphique des composants essentiels d'un RdP : les places, transitions, arcs, jetons, ainsi que l'intégration de variables mathématiques et d'opérateurs logiques (tels que AND, OR, IF-THEN-ELSE, MIN(), MAX(), etc.). Ces éléments permettent de formuler les conditions de validation (prédicats) des transitions et d'enrichir la dynamique du système modélisé. Les variables peuvent être modifiées lors du tir des transitions, ce qui accroît la flexibilité et la précision de la simulation.[15]

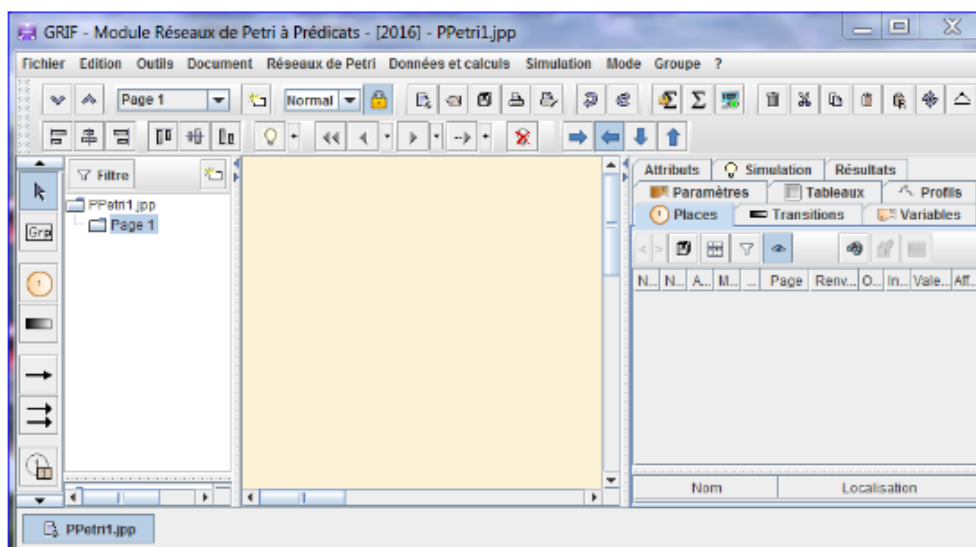


FIGURE 4.3 – L'interface de logiciel GRIF .

4.3.2 Présentation des résultats

Les résultats issus de la simulation du RdP développé, sont présentés ci-dessous :

● **Le Temps de séjours moyen d'un navire** : Le tableau ci-dessous présente le temps moyen de séjour des navires en rade et à quai, permettant d'évaluer les délais d'attente globaux dans le terminal.

<i>Séjour moyen en rade</i>	<i>Séjour moyen à quai</i>
3420 min = 2.30 jours	2100 min = 1.46 jours

● **Durées moyennes du service** : Ce tableau synthétise les durées moyennes de service des principaux engins de manutention utilisés dans le processus de traitement des conteneurs.

<i>QC</i>	2.2425 min
<i>Grue</i>	2.9533 min
<i>RTG</i>	1.6214 min
<i>Steacker</i>	1.1125 min
<i>Camion à remorque</i>	11.5326 min

● **Le pourcentage de taux de livraison** : Le taux de livraison donne une indication sur la proportion de conteneurs livrés avec succès dans le système, reflétant l'efficacité des opérations de sortie.

<i>Le taux de livraison</i>
86.40%

● **Le pourcentage de taux de saturation de parc BMT** : Ce pourcentage indique le taux moyen d'occupation du parc à conteneurs, un indicateur clé pour surveiller les risques de congestion.

<i>Le taux de saturation de parc BMT</i>
90.73%

● **Traitement des EVPs** : Le tableau suivant détaille les performances du terminal en matière de traitement des conteneurs (EVPs), en précisant les moyennes horaires, par navire et mensuelles, ainsi que la fréquence d'arrivée des conteneurs au parc.

<i>Le nombre moyen des EVPs / heure</i>	32
<i>Nombre moyen des EVPs/navire</i>	400
<i>Nombre moyen des EVPs débarqués /mois</i>	8150
<i>Nombre moyen des EVPs embarqués /mois</i>	8200
<i>Durée moyen d'inter-arrivées des EVPs au parc BMT</i>	2.3566 min

● **Traitement des navires** : Ce tableau présente le nombre moyen de navires traités par jour et par mois, ce qui permet d'évaluer la capacité du terminal à gérer le trafic maritime.

<i>Nombre moyen de navires traités/jour</i>	2 navires
<i>Nombre moyen de navires traités/mois</i>	35 navires

Interprétation

Les résultats de la simulation montrent que les navires connaissent un délai d'attente avant accostage, suivi d'un temps de traitement à quai. Cela souligne l'importance d'une gestion efficace du trafic maritime au sein du terminal.

Les équipements de manutention présentent des performances variables selon leur type. Certains, comme les camions, peuvent ralentir le processus global en raison de temps de service plus élevés.

Enfin, la fréquence soutenue d'arrivée des conteneurs exerce une pression importante sur le parc de stockage, dont le taux de saturation élevé indique un risque de congestion nécessitant une gestion rigoureuse.

4.3.3 Impact du taux de panne sur les performances du Terminal à Conteneurs BMT

Cette section présente les résultats obtenus à partir des simulations réalisées à l'aide des RdP, mettant en évidence l'impact du taux de pannes sur les performances du terminal à conteneurs de BMT.

Nous avons fait varier le temps de réparation des engins selon plusieurs scénarios, Les tableaux suivants présentent l'évolution de chaque indicateur clé en fonction de cette variation.

- **Impact du temps de réparation sur le séjour moyen des navires (en rade et à quai) :**

Ce tableau illustre l'impact du temps de réparation des équipements sur le séjour moyen des navires. Plus les grues et QC restent indisponibles, plus les opérations de manutention ralentissent, ce qui allonge à la fois le temps d'attente en rade et le traitement à quai.

Temps de réparation (min)	Séjour moyen en rade	Séjour moyen à quai
5	2800 = 1,94 jours	1800 = 1,25 jours
10	2900 = 2,01 jours	1850 = 1,29 jours
15	3000 = 2,08 jours	1900 = 1,32 jours
20	3100 = 2,15 jours	1950 = 1,35 jours
25	3200 = 2,22 jours	2000 = 1,39 jours
30	3300 = 2,29 jours	2050 = 1,42 jours
35	3350 = 2,33 jours	2075 = 1,44 jours
40	3400 = 2,36 jours	2090 = 1,45 jours
50	3500 = 2,45 jours	2150 = 1,49 jours

TABLE 4.1 – Impact du temps de réparation sur le séjour des navires.

- **Impact du temps de réparation sur le volume de traitement et la saturation du parc à conteneurs :**

Le tableau ci-dessous met en évidence que l’allongement des temps de réparation des équipements entraîne une baisse du nombre moyen de conteneurs traités par mois, ainsi qu’une hausse progressive du taux de saturation du parc. Cette évolution traduit une diminution de la productivité globale du terminal et un risque accru de congestion.

Temps de réparation (min)	Nombre moyen d’EVPs traités/mois	Taux de saturation du parc (%)
5	8600 EVPs	85%
10	8550 EVPs	86,10%
15	8500 EVPs	87,20%
20	8450 EVPs	88,30%
25	8400 EVPs	89,20%
30	8350 EVPs	90,00%
35	8300 EVPs	90,30%
40	8250 EVPs	90,60%
50	8100 EVPs	91,30%

TABLE 4.2 – Impact du temps de réparation sur le traitement mensuel et la saturation du parc .

Discussion et Interprétation

L’objectif de cette étude était d’analyser l’impact de la variation du temps de réparation des engins critiques, à savoir les QCs et les grues, sur les performances opérationnelles du terminal à conteneurs BMT. Pour ce faire, différents scénarios ont été simulés en faisant varier la durée de réparation de ces engins de 5 minutes à plus de 45 minutes. Les indicateurs observés sont le temps de séjour moyen des navires en rade, le temps de séjour moyen à quai, le nombre d’EVPs traités et le taux de saturation du parc. L’augmentation du temps de réparation des engins portuaires a un impact négatif marqué sur

les performances du terminal. Plus les réparations sont longues, plus le temps de séjour des navires en rade et à quai s'allonge, en raison de l'indisponibilité temporaire des QCs et grues, ralentissant les opérations de manutention. Cela se traduit par une hausse du temps d'attente avant accostage (de 2800 à plus de 3500 minutes) et un allongement du séjour à quai (de 1800 à plus de 2150 minutes). Par conséquent, le nombre moyen de conteneurs (EVPs) traités diminue, passant de 8600 à 8100 EVP/mois, en lien direct avec la baisse de disponibilité des engins. En parallèle, le taux de saturation du parc augmente (de 85% à plus de 91%), illustrant une accumulation des conteneurs due aux retards dans les opérations, risquant de provoquer une congestion du terminal. Néanmoins ; La réduction du temps de réparation des engins permet une remise en service plus rapide des ressources critiques telles que les grues et les QCs. Cette amélioration se traduit directement par une augmentation de la disponibilité des équipements, ce qui contribue à une meilleure fluidité des opérations. En conséquence, la qualité de service du terminal s'améliore de manière significative, notamment en réduisant les temps d'attente, en augmentant la cadence de traitement des conteneurs, et en évitant la saturation du parc.

4.3.4 Etude Comparative

Le tableau suivant présente une comparaison des performances portuaires entre les résultats obtenus dans ce travail et ceux issus d'une étude antérieure. Cette analyse permet de mesurer l'évolution de différents indicateurs clés, tels que les temps de séjour, le taux de saturation du parc et le nombre d'EVPs traités.

	Résultats obtenus en 2016	Résultats obtenus	Var %
Séjour moyen en rade	2.8 jours	2.35 jours	-16.07%
Séjour moyen à quai	1.75 jours	1.46 jours	-16.57%
Nombre d'EVP traité	7904 EVP	8150 EVP	+3.11%
Taux de saturation du parc BMT	98.52%	90.73%	-7.90%

TABLE 4.3 – Comparaison des performances portuaires.

Interprétation et discussion :

Les résultats obtenus sont globalement satisfaisants pour l'entreprise BMT, révélant une amélioration mesurable de la qualité de service. En effet, le temps moyen de séjour d'un navire en rade a diminué de 16,07%, tandis que le séjour moyen à quai a enregistré une baisse de 16,57%. Cette optimisation opérationnelle a contribué à une augmentation du trafic de conteneurs de l'ordre de 3,11%.

Ces performances positives peuvent être attribuées à la stratégie mise en place par l'entreprise concernant la gestion des pannes. En fixant un seuil de 45 minutes pour les interventions de maintenance, les engins légèrement défectueux sont rapidement remis en service, ce qui réduit les interruptions et améliore la continuité des opérations.

Cependant, malgré cette amélioration, certaines limites subsistent. Le taux de saturation du parc BMT reste élevé, atteignant 90,73%, ce qui indique une situation proche de la saturation permanente. Bien qu'une légère baisse par rapport à la situation sans panne, mais elle ne suffit pas à garantir un fonctionnement fluide et optimal du système.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de modéliser et simuler le processus de débarquement et d'embarquement des conteneurs au sein du terminal BMT en utilisant les réseaux de Petri. Grâce à cette approche, nous avons pu reproduire avec précision la dynamique réelle du terminal, tout en intégrant des éléments essentiels tels que la disponibilité des équipements, la gestion des pannes et l'affectation des ressources. Les résultats de simulation obtenus à l'aide de GRIF ont fourni des indicateurs pertinents sur les performances du système : temps de séjour des navires, taux de livraison, saturation du parc et capacité de traitement des EVPs. L'analyse de la variation du temps de réparation des engins a, quant à elle, mis en évidence l'impact significatif de la disponibilité des ressources sur la fluidité des opérations portuaires. Cette modélisation constitue ainsi une base solide pour l'aide à la décision dans la gestion et l'optimisation des performances du terminal.

Conclusion Générale

Dans un contexte de mondialisation croissante et d'intensification des échanges maritimes, les ports sont amenés à renforcer leurs capacités opérationnelles pour répondre aux exigences de performance, de rapidité et de fiabilité. Le terminal à conteneurs BMT s'inscrit dans cette dynamique, où la maîtrise des flux logistiques et la gestion des ressources techniques jouent un rôle essentiel dans la compétitivité globale du port.[17]

Ce mémoire a porté sur l'évaluation des performances du terminal à travers la modélisation du processus de débarquement et d'embarquement à l'aide des Réseaux de Petri . Cette approche a permis de représenter fidèlement la complexité du système portuaire, notamment en tenant compte des phénomènes de parallélisme, de partage de ressources et des aléas d'exploitation.

L'originalité de ce travail réside dans l'intégration explicite des pannes des engins de manutention, en particulier les grues de quai (QC) et les grues mobiles. En simulant différents scénarios selon des durées de réparation variables, nous avons pu analyser l'impact direct de l'indisponibilité des équipements sur les indicateurs de performance du terminal.

Les résultats de simulation ont montré que plus la durée de réparation est longue, plus les performances du système se dégradent : les temps de séjour des navires en rade et à quai augmentent, le nombre moyen d'EVPs traités diminue, et le taux de saturation du parc devient plus élevé. À partir d'un seuil de 45 minutes, ces effets deviennent particulièrement significatifs, traduisant une perte d'efficacité notable dans le fonctionnement du terminal.

Ainsi, ce travail met en évidence l'importance de la gestion des pannes dans l'organisation portuaire. Réduire les temps de réparation et améliorer la disponibilité des engins sont des leviers essentiels pour optimiser la fluidité des opérations et garantir des niveaux de service élevés.

Pour aller plus loin, des perspectives de recherche pourraient inclure l'intégration de politiques de maintenance préventive, l'étude des priorités d'affectation des ressources en cas de panne.

Bibliographie

- [1] Z. Akkouche and A. Amri. Gestion optimale des équipements de manutention au niveau du terminal à conteneurs bmt. Mémoire d'ingénieur, Université de Béjaïa, Département Recherche Opérationnelle, 2011.
- [2] Bejaia Mediterranean Terminal (BMT). Site officiel de l'entreprise bmt béjaïa. url<https://www.bmt.dz>, 2025.
- [3] A. Benghalia. *Modélisation et Évaluation des Performances des Terminaux Portuaires*. Thèse de doctorat, Université du Havre, 2015.
- [4] N. Bennis. Les réseaux de petri : Théorie, propriétés et applications, 2015. Document pédagogique, 1^{re} édition.
- [5] B. Bernard and M. Diaz. *Modélisation et vérification des systèmes temporels par les réseaux de Petri*. CNRS LAAS, Toulouse, 1983. Introduction aux réseaux de Petri temporisés.
- [6] S. Boulghobra and A. Larbi. L'impact de l'extension du port sur les performances du terminal à conteneurs. Master's thesis.
- [7] M. Diaz. *Les réseaux de Petri, modèles fondamentaux*. Hermès Science Publications, Paris, 1^{re} édition edition, 2001.
- [8] S. Hakmi. Évaluation des performances des systèmes prioritaires à l'aide des réseaux de petri stochastiques généralisés (rdpsg). Thèse de magistère, Université de Béjaïa, 2011.
- [9] D. Medjani. Analyse des performances d'un système de gestion de stocks à produits périssables par les rdpsg. Mémoire de master, Université de Béjaïa, 2020.
- [10] A. Messrouf and R. Tebri. Contribution à la modélisation et l'évaluation des performances du terminal à conteneurs bmt. Mémoire de master, Université de Bejaia, 2016.
- [11] Y. Morère. Cours de réseaux de petri. Notes de cours, April 2002. Document pédagogique.
- [12] Port de Béjaïa. Record de production au terminal à conteneurs du port de béjaïa (bmt), 2024.

- [13] D. René and A. Hassane. *Du Grafct aux réseaux de Petri : Une approche systématique de la modélisation des systèmes discrets*. Hermès Science Publications, Paris, 2007.
- [14] M. Tadao. Petri nets : Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 1989.
- [15] Total Reliability. *Manuel utilisateur GRIF Réseaux de Petri à prédicats*, version 10 edition, juillet 2024.
- [16] R. Wolfgang. *Understanding Petri Nets : Modeling Techniques, Analysis Methods, Case Studies*. Springer, 2013.
- [17] F. Yahi and H. Azzouz. Impact du système des fenêtres d'accostage sur les performances du terminal à conteneurs bmt. Mémoire de master, Université de Béjaïa, 2025.
- [18] H. YAICHE. Modélisation et optimisation de mouvement des conteneurs au niveau du terminal à conteneurs bmt. Mémoire de master, Université Abderrahmane MIRA de Béjaïa, 2023.
- [19] M. Zitouni and S. Mebarki. Évaluation des performances de la nouvelle zone extra portuaire plein de bmt et son impact sur la congestion du parc. Master's thesis, Université de Béjaïa, 2015. Mémoire de Master.

Résumé

Le transport maritime occupe aujourd'hui une place essentielle dans le commerce international. Face à une demande croissante et à des échanges de plus en plus intensifs, les terminaux à conteneurs doivent continuellement améliorer leurs performances pour rester compétitifs. Le terminal à conteneurs de Béjaïa (BMT) n'échappe pas à cette exigence et se heurte à des problématiques récurrentes. Parmi les facteurs ayant un impact sur la performance du terminal figurent les pannes des équipements de manutention.

Afin d'évaluer l'influence de ces pannes sur les performances du terminal, une modélisation des processus de débarquement et d'embarquement des conteneurs a été réalisée à l'aide des réseaux de Petri. La simulation a permis d'analyser plusieurs scénarios, en faisant varier les durées de réparation des équipements.

Mots clés : Port de Béjaïa, terminal à conteneurs, pannes d'équipements, réseaux de Petri, Évaluation des performances, Simulation.

Abstract

Maritime transport plays a vital role in international trade today. Faced with growing demand and increasingly intensive exchanges, container terminals must continuously improve their performance to remain competitive. The Béjaïa container terminal (BMT) is no exception to this requirement and faces recurring operational challenges. Among the factors affecting the terminal's performance are breakdowns of handling equipment.

To assess the impact of these breakdowns on terminal performance, the loading and unloading processes of containers were modeled using Petri nets. The simulation made it possible to analyze several scenarios by varying the repair durations of the equipment.

Keywords : Port of Béjaïa, container terminal, equipment breakdowns, Petri nets, performance evaluation, simulation.