

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderahmane Mira de Béjaia  
Faculté des Sciences Exactes  
Département de Recherche Opérationnelle



## **MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE**

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER EN MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES  
Spécialité : Modélisation Optimisation et aide à la décision

Présenté par

**Bouhamdani lydia**

**Oukkal Hiba**

Thème :

---

**Optimisation de déchargement au Terminal Méditerranéen de  
Bejaia : Gestion des conflits d'utilisation des RTGs**

---

Soutenu : le 09/07/2024    Devant le Jury composé de :

M	M. Soufit	M.C.B	Président
M	N. Khimoum	M.C.A	Promoteur
Mme	L. Younsi Abbaci	M.C.A	Examinatrice

**Année Universitaire : 2023/2024**

## TABLE DES MATIÈRES

<b>Remerciements</b>	<b>2</b>
<b>Dédicaces</b>	<b>3</b>
<b>Dédicaces</b>	<b>4</b>
<b>Liste d'abréviation</b>	<b>6</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>8</b>
<b>1 Présentation de l'entreprise et position du problème</b>	<b>11</b>
1.1 Introduction . . . . .	11
1.2 Fondation et création . . . . .	11
1.3 Situation géographique . . . . .	12
1.4 Structure de l'entreprise . . . . .	12
1.4.1 Direction Générale . . . . .	12
1.4.2 Direction des opérations . . . . .	13
1.4.3 Direction Marketing (DM) . . . . .	13
1.4.4 Direction des Finances et de Comptabilité (DFC) . . . . .	14
1.4.5 Direction Technique (DT) . . . . .	14
1.4.6 Direction des Ressources Humaines et Moyens (DRHM) . . . . .	14
1.5 Conteneurs et équipements . . . . .	15
1.5.1 Conteneurs . . . . .	15
1.5.2 Equipements de l'entreprise . . . . .	16
1.6 Différents opérations de la BMT . . . . .	19
1.7 Vision et avenir . . . . .	20
1.8 Position du problème . . . . .	20
1.9 Conclusion . . . . .	21

<b>2</b>	<b>Notion de base sur l'optimisation combinatoire</b>	<b>23</b>
2.1	Introduction . . . . .	23
2.2	Définition d'un problème d'optimisation combinatoire . . . . .	23
2.3	Démarche en optimisation combinatoire . . . . .	24
2.4	Complexité algorithmique . . . . .	25
2.5	Quelques problèmes d'optimisation combinatoire . . . . .	26
2.5.1	Problème d'ordonnancement . . . . .	26
2.5.2	Problème de Sac à dos . . . . .	26
2.5.3	Problème de couverture . . . . .	27
2.5.4	Problème d'affectation . . . . .	28
2.6	Caractéristiques des POC . . . . .	29
2.7	Méthodes et techniques de résolution . . . . .	30
2.7.1	Méthodes exactes . . . . .	30
2.7.2	Les méthodes approximatives . . . . .	32
2.8	Conclusion . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Modélisation et résolution du problème</b>	<b>35</b>
3.1	Introduction . . . . .	35
3.2	Construction du modèle . . . . .	35
3.2.1	Les paramètres utilisés dans le modèle . . . . .	36
3.2.2	Les variables de décision du modèle . . . . .	36
3.2.3	Formulation mathématique . . . . .	36
3.3	Le modèle mathématique . . . . .	38
3.4	Exemple numérique . . . . .	38
3.5	Présentation du logiciel . . . . .	39
3.6	Application du modèle . . . . .	39
3.7	Résultat . . . . .	41
3.8	Visualisation des résultats . . . . .	42
3.9	Interprétation des résultats . . . . .	43
3.10	Conclusion . . . . .	44
	<b>Conclusion générale</b>	<b>44</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>45</b>
	<b>Résumé</b>	<b>47</b>

## **REMERCIEMENTS**

Avant tout nous tenons à remercier celui qui nous a créé, protégé, aidés et celui qui nous a donné de la force, la patience et le courage pour accomplir notre travail dans les meilleurs conditions " Dieu merci "

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers notre promoteur M.N.KHIMOUM , ses remarques pertinentes et ses disponibilités tout au long de notre préparation de ce mémoire.

De plus nous remercions notre Maître de stage M .M.Boumerzouk pour son aide, son soutien et ses encouragements durant notre stage pratique, ainsi que tout le personnel de " BMT".

Un grand merci pour Mme. Z.aoudia et tous les enseignants de la Facultés des Science Exactes , ce qui nous a été enseigné et soutenu tout au long de notre cursus universitaire.

Nous remercions également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont évalué et examiné notre travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin et à toute nos famille qui ont toujours à nos cotés.

## DÉDICACES

Je tiens avec un grand plaisir à dédier ce modeste travail aux personnes chères à mon coeur :

À ma chère mère et à mon cher père , merci du fond du cœur pour tous vos sacrifices et amour inconditionnel .

À mes soeurs Katia , Sylia ,Sarah ,Ikrem , à mes frères Yanis, Rayane et Abd Elghani , pour leur amitié sincère .

À tous les membres de mes familles maternelle et paternelle .

À tous mes amis et ma binôme Hiba .

Lydia

## DÉDICACES

À la personne la plus idéale qui fut dans ce monde, bien qu'elle ne soit plus là pour récolter le fruit de ses sacrifices, elle reste toujours la plus présente dans mon cœur : à l'âme de ma très chère tante Hayette.

À l'âme de mon grand-père Ayad Akli, mon héros, qui m'a transmis les valeurs de la vie et dont l'amour me guide encore aujourd'hui.

À l'âme de ma maman chérie, qui continue de veiller sur moi.

À ma grand-mère, mon héroïne, l'être le plus cher de ma vie, mon pilier, mon soutien, mon refuge et ma force. Elle a illuminé ma vie de tant de manière. Les mots ne peuvent décrire la bravoure de cette femme et l'amour immense que je lui porte.

À mes très chères tantes Chafika, Salima et Sabrina, qui apportent tant de joie et de chaleur à ma vie.

À mes chères sœurs Lydia et Aya, mes complices, mes confidentes et mes amies de toujours.

À mon père chéri, que j'aime tant.

À mes chères oncles Noureddine, Abdelkader, Mohamed et Abderahmane, et à leurs épouses, pour leur affection et leur présence précieuse.

À mes chères beaux-frères Mourad, Nacer, Farid et Fares, pour leur soutien et leur amitié sincère.

À ma nièce Léa, à mes cousins et cousines, pour leur amour et leur présence bienveillante dans ma vie.

À la personne qui m'encourage sans relâche.

À mes précieuses amies Tinhinane, Yasmine, Azaria et Rachel, pour chaque instant précieux, chaque épaule sur laquelle j'ai pu m'appuyer et chaque souvenir que nous avons partagé.

À tous les membres du groupe STINPLZIR et ma binôme Lydia .

Avec tout mon amour et ma reconnaissance,

Hiba

## **LISTE D'ABRÉVIATIONS**

- RO : Recherche Opérationnelle .
- BMT : Bejaia Méditerranéen Terminal.
- EPB : L'Entreprise Portuaire de Béjaia .
- VR :Vice and right.
- RTG : Portiques gerbeurs sur pneus .
- Spa : Société par action .
- CDN : Centre de Digitalisation et du Numérique .
- DM : Direction Marketing .
- DFC : Direction des Finances et de Comptabilité.
- DT : Direction Technique.
- DRHM : Direction des Ressources Humaines et Moyens .
- L'ISO : International Organization for Standarization .
- TEU : Twenty-foot Equivalent Unit.
- FEU : Forty-foot Equivalent Unit.
- QC : Portique de quai sur rail.

- MHC : Grues mobiles portuaires.
- PO : problème d'optimisation .
- POC : problème d'optimisation combinatoire.
- PLNE : programme linéaire en nombres entiers .

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La Recherche Opérationnelle (RO) joue un rôle fondamental dans l'amélioration des processus décisionnels et l'optimisation des opérations complexes à travers divers secteurs industriels. Ce domaine multidisciplinaire se distingue par son utilisation intensive de modèles mathématiques, d'approches analytiques sophistiquées et de méthodes algorithmiques avancées pour résoudre efficacement les défis opérationnels.

La BMT est bien plus qu'un simple terminal portuaire. Elle est un symbole de l'intégration de l'Algérie dans l'économie mondiale, un pont reliant le pays aux marchés internationaux. Ses activités, qui englobent le chargement, le déchargement, le stockage, la planification des escales et le transport des conteneurs, sont toutes cruciales pour le fonctionnement de l'entreprise. Toutefois, la mesure la plus critique de la productivité réside dans le nombre de mouvements (chargement/déchargements) par heure.

Cette entreprise doit relever plusieurs défis, notamment la compétition avec d'autres entreprises algériennes, où la comparaison se fait principalement sur la base du nombre de mouvements réalisés par heure.

Le principal problème auquel l'entreprise est confrontée est celui de processus de déchargement d'utilisant des Portiques gerbeurs sur pneus (RTGs). Lorsque la remorque transportant un conteneur déchargé du navire atteint le parc de stockage, le déchargement est effectué à l'aide des RTGs. Cependant, les RTGs peuvent parfois être occupés par la livraison de marchandises aux camions privés, retardant ainsi la prise en charge des remorques. Cela affecte la productivité en réduisant le nombre de déchargements.

Par conséquent, notre objectif principal est de maximiser le nombre de déchargements des remorques par heure tout en maintenant un seuil minimum de traite-

ment des camions privés. Pour accomplir cela, nous avons adaptées une approche d'optimisation combinatoire.

Pour atteindre cet objectif ,nous avons structuré notre mémoire en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente une vue d'ensemble du terminal à conteneurs de Béjaia, ses directions, ses missions ses activités qui jouent un rôle essentiel dans son fonctionnement, et la mise en contexte du problème traité dans ce mémoire.
- Le deuxième chapitre explore les concepts fondamentaux de l'optimisation combinatoire, notamment la démarche, la complexité algorithmique, les méthodes de résolution et la modélisation de quelques problèmes d'optimisation combinatoire.
- Le troisième chapitre quant à lui propose une modélisation du problème avec un modèle mathématique, suivi d'une implémentation sous Python et l'interprétation des résultats obtenus.

La conclusion mettra l'accent sur la démarche structurée pour résoudre le problème, nous avons pu identifier une solution efficace et adaptée à ce dernier.

**1.1 INTRODUCTION**

La BMT (Bejaia Mediterranean Terminal) est un acteur majeur du secteur portuaire, servant de pivot crucial entre le commerce mondial et l'économie locale. Son expansion ne se contente pas d'améliorer sa propre compétitivité ; elle dynamise également celle de la région tout entière, attirant les investissements et tissant des liens commerciaux solides avec des marchés internationaux. Ce chapitre se concentre sur l'exposition du terminal à conteneurs de Béjaïa, ainsi que la mise en contexte du problème .

**1.2 FONDATION ET CRÉATION**

Le terminal méditerranéen de Béjaïa a été créé en mai 2004 dans le cadre d'une joint-venture entre l'Entreprise Portuaire de Béjaïa (EPB), responsable de la gestion du port de Béjaïa, et Portek Systems and Equipment, une division de Portek Group, une entreprise singapourienne spécialisée dans l'exploitation de terminaux à conteneurs. Grâce à cette collaboration stratégique, le terminal méditerranéen de Béjaïa est devenu un hub maritime de premier plan, favorisant le développement économique de la région et renforçant les liens commerciaux avec les marchés nationaux et internationaux [1] .

### 1.3

## SITUATION GÉOGRAPHIQUE

Le terminal est implanté dans la ville de Béjaïa qui est située sur la côte méditerranéenne de l'Algérie, au nord du pays. Nichée à environ 250 kilomètres à l'est de la capitale Alger. Cette ville côtière occupe une position géographique privilégiée [1].



FIGURE 1.1 – Situation géographique

En effet, sa localisation en bordure de la Méditerranée lui confère un accès direct aux principales voies maritimes de la région. Cette situation stratégique en fait un véritable carrefour maritime, favorisant les échanges commerciaux tant régionaux qu'internationaux.

### 1.4

## STRUCTURE DE L'ENTREPRISE

La structure de l'entreprise reflète son organisation interne et ses différentes composantes, déterminant ainsi la répartition des responsabilités et des fonctions au sein de l'organisation.

### 1.4.1 Direction Générale

Dans le cadre des pouvoirs assignés par le conseil d'administration de BMT Spa, le Directeur Général dirige l'entreprise, donne des directives aux différentes structures et assure la coordination entre les directions de l'entreprise.

## **Département Audit interne**

Le Département Audit interne assure l'audit des procédures et mesure leur efficacité.

## **Centre de Digitalisation et du Numérique (CDN)**

Le CDN, basé sur un management de proximité, vise à harmoniser, à rendre cohérents et à gouverner les systèmes portuaires. Cela nécessite une restructuration et un alignement pour améliorer les services rendus aux clients, renforcer la compétitivité du secteur du transport maritime, et mettre en place une plateforme de données dématérialisée et interactive dédiée à fluidifier les passages portuaires et à faciliter le commerce. L'objectif est d'offrir un service global aux acteurs portuaires.

Pour atteindre cet objectif, le CDN a pour mission de :

- Uniformiser les processus de digitalisation et d'automatisation des infrastructures informatiques.
- Mettre en place un schéma directeur informatique

### **1.4.2 Direction des opérations**

La Direction des Opérations est chargée de planifier les escales, de déterminer les ressources nécessaires en termes d'équipes et d'équipements, ainsi que de gérer l'ensemble des activités du terminal à conteneurs. Elle supervise les opérations de manutention des navires porte-conteneurs, incluant le chargement et le déchargement, et prend en charge les opérations d'acconage telles que le suivi des livraisons, le dépotage et l'empotage des conteneurs, ainsi que la mise à disposition des conteneurs vides. De plus, elle assure le traitement des conteneurs frigorifiques et veille à la sécurité au sein du terminal.

- Département des opérations
  - Service Acconage
  - Service Manutention
  - Service Ressources
- Le Département logistique (Service Logistique)

### **1.4.3 Direction Marketing (DM)**

La Direction Commerciale est responsable de concevoir les stratégies marketing, ce qui implique l'analyse approfondie du marché, la définition des cibles, l'éla-

boration des plans d'action et le choix des canaux publicitaires appropriés. Elle intervient dans divers aspects fonctionnels du marketing, notamment la stratégie, les services et les opérations. De plus, elle coordonne ses actions avec tous les acteurs portuaires pour garantir la cohérence avec la politique marketing établi.

- Service Marketing
- Service commercial

#### **1.4.4 Direction des Finances et de Comptabilité (DFC)**

Elle est chargée de la préparation des états financiers et des bilans de l'entreprise. Sa structure comprend deux départements distincts

- Service comptabilité
- Service finances et budget

#### **1.4.5 Direction Technique (DT)**

Elle est responsable d'assurer la maintenance à la fois préventive et corrective des équipements de la société. Département technique :

- Service engins
- Service portiques
- Service méthodes

#### **1.4.6 Direction des Ressources Humaines et Moyens (DRHM)**

Implémenter des systèmes de gestion intégrés dans la stratégie de l'entreprise afin de concilier les impératifs économiques avec les attentes du personnel. Cette structure vise à rechercher et à conserver les meilleurs talents en leur offrant un environnement de travail favorable, des conditions optimales, des opportunités de développement professionnel et une formation adéquate. La Direction des Ressources Humaines et du Management (DRHM) se compose de : Département Ressources Humaines et Moyens :

- Service patrimoine
- Service Moyens Généraux
- Service Ressources Humaines

Les conteneurs de la BMT sont essentiels pour faciliter les opérations logistiques et la gestion des marchandises dans le terminal.

Les équipements jouent un rôle essentiel dans les opérations quotidiennes du terminal, en facilitant le chargement, le déchargement et le déplacement efficaces des conteneurs, ce qui contribue à la fluidité et à l'efficacité des opérations portuaires.

### 1.5.1 Conteneurs

Un conteneur est une boîte de métal standardisée utilisée pour le transport intermodal de marchandises. Il est conçu pour être chargé et déchargé facilement, empilé et transporté sur divers modes de transport, notamment les navires, les trains et les camions. Les conteneurs de la BMT sont de forme rectangulaire et peuvent varier en taille et en type, mais ils sont généralement conformes aux dimensions standard de l'ISO, telles que les conteneurs de 20 pieds (environ 6 mètres) de longueur, appelés "TEU" (Twenty-foot Equivalent Unit), et les conteneurs de 40 pieds (environ 12 mètres) de longueur, appelés "FEU" (Forty-foot Equivalent Unit).



FIGURE 1.2 – Conteneur 20 pieds

Les conteneurs sont utilisés pour transporter une variété de marchandises, y compris des produits manufacturés, des matières premières, des produits alimentaires, des produits chimiques, et d'autres types de cargaisons. Ils sont chargés sur des camions pour être transportés vers leur destination finale, ou stockés dans les zones de stockage du terminal en attendant leur expédition. Les conteneurs de la

BMT sont essentiels pour faciliter les opérations logistiques et la gestion des marchandises dans le terminal.

## 1.5.2 Equipements de l'entreprise

La BMT dispose de divers équipements nécessaires à ses opérations portuaires :

### Portique de quai sur rail (QC)

Les portiques de quai sur rail sont des grues de grande taille montées sur des rails et utilisées pour charger et décharger les conteneurs des navires. L'entreprise possède deux QC d'un tonnage de 40 tonnes chacun, de type Panamax.



FIGURE 1.3 – Portique de quai sur rail

### Portiques gerbeur sur pneus (RTG - Rubber-Tyred Gantry)

Les RTG sont des grues montées sur pneus utilisées pour déplacer les conteneurs à l'intérieur du terminal. Elles sont particulièrement adaptées pour déplacer des conteneurs empilés sur des piles. L'entreprise possède sept RTG d'une capacité totale de 40 tonnes.



FIGURE 1.4 – RTG - Rubber-Tyred Gantry

### **Remorques portuaires**

Les remorques portuaires sont des véhicules spécialement conçus pour le transport de charges lourdes et encombrantes à l'intérieur des terminaux portuaires. Ils sont utilisés pour déplacer des conteneurs et d'autres équipements de maintenance sur de courtes distances à l'intérieur du terminal. L'entreprise possède douze remorques d'une capacité totale de 40 tonnes.



FIGURE 1.5 – Remorque portuaire

### **Chariots manipulateur de vides**

Les chariots manipulateurs de vides sont spécialement conçus pour manipuler les conteneurs vides à l'intérieur du terminal. L'entreprise possède onze chariots manipulateurs de vides d'une capacité totale de 11 tonnes.



FIGURE 1.6 – Chariot manipulateur de vides

### **Grues mobiles portuaires (MHC)**

Les grues mobiles portuaires sont montées sur pneus ou sur rails et sont conçues pour déplacer des charges lourdes, notamment des conteneurs, à l'intérieur du terminal. L'entreprise possède deux grues d'un tonnage de 100 tonnes chacune.



FIGURE 1.7 – Grue mobile portuaire (MHC)

### **Stackers**

Les stackers sont souvent des chariots automoteurs équipés de bras articulés ou de pinces spéciales pour soulever et déplacer les conteneurs. Leur principal objectif est de manipuler les conteneurs et de les placer de manière organisée sur les remorques ou les rangées de conteneurs. L'entreprise possède onze stackers d'une capacité totale de 45 tonnes.



FIGURE 1.8 – Stacker

## 1.6

## DIFFÉRENTS OPÉRATIONS DE LA BMT

Bejaia Méditerranéen Terminal accueille chaque année un grand nombre de navires, pour lesquels elle assure les opérations de planification, de manutention et d'acconage, avec un suivi et une traçabilité rigoureux des opérations.

- Opérations de planification

- Programmation des escales, y compris l'attribution des postes d'accostage.
- Planification du chargement et du déchargement.
- Gestion du parc à conteneurs, notamment les visites, le dépotage, l'enlèvement et le retour des conteneurs vides.

- Opérations de manutention

Les Opérations de manutention englobent le chargement, le déchargement des conteneurs et la réception des navires porte-conteneurs. Elles sont effectuées jour et nuit, avec deux équipes en rotation de 07h à 13h et de 13h à 19h, ainsi qu'un troisième shift optionnel en heures supplémentaires pouvant aller jusqu'à 07h du matin.

- Opérations d'acconage

- Transfert des conteneurs vers les zones de stockage.

- Supervision des inspections des conteneurs par les services compétents.
- Réorganisation des conteneurs.
- Suivi des livraisons et des dépotage.
- Gestion des retours et des mises à quai.
- Mise à disposition des conteneurs vides pour le remplissage.

## 1.7 VISION ET AVENIR

La vision de BMT est de continuer à jouer un rôle de premier plan dans le secteur maritime, en offrant des solutions innovantes et fiables pour répondre aux besoins évolutifs du commerce mondial. L'entreprise reste déterminée à maintenir sa réputation d'excellence et d'intégrité, tout en poursuivant sa croissance et son expansion sur les marchés nationaux et internationaux.

## 1.8 POSITION DU PROBLÈME

BMT (Bejaia Meditteraneen Terminal) est confronté à une forte pression pour améliorer l'efficacité de ses opérations de chargement/déchargement, car celles-ci déterminent la productivité globale de l'entreprise. Ces opérations sont évaluées à l'aide du VR (productivité en navire), qui mesure le nombre de conteneurs manipulés par heure (le nombre de chargement et de déchargement). Le principal défi se situe dans le processus de déchargement.

Pour mener à bien ces opérations, une gamme d'équipements est nécessaire, notamment des grues, des QC, des RTGs, des stackers et des remorques portuaires. Lorsqu'un navire arrive, le processus de chargement/déchargement commence. Pendant le déchargement, une grue transfère les conteneurs à terre, puis un stacker les charge sur une remorque pour les acheminer vers le parc de stockage. Alternativement, le QC peut directement déplacer les conteneurs depuis le navire vers la remorque. À l'arrivée au parc de stockage, les RTGs déchargent les remorques.

Il existe cinq blocs de stockage pour les conteneurs (blocs A, B, C, D et E), chacun étant équipé d'un RTG, ce qui fait un total de cinq RTGs. Chaque conteneur déchargé des remorques doit être assigné à un de ces blocs. Ces blocs contiennent également des conteneurs en attente de livraison par camions privés lorsque leur date de livraison arrive, ce qui est aussi effectué avec les RTGs. Ainsi, cet équi-

pement est utilisé pour deux opérations simultanées : le déchargement des conteneurs arrivant et la livraison aux camions privés.

L'utilisation des RTG pour la livraison engendre des perturbations dans le processus de prise en charge des remorques, ce qui a un impact négatif sur la productivité en diminuant le nombre de déchargements par heure.

En revanche, lors du chargement, les RTGs ne sont pas requis, ce qui signifie que leur disponibilité n'a pas d'impact sur le processus. Par conséquent, en augmentant le nombre de déchargements par heure, le chargement se déroulera sans aucune perturbation.

Étant donné que le chargement ne pose aucun problème, nous allons l'exclure de notre analyse et nous concentrer uniquement sur le processus de déchargement. La BMT dispose de deux quais (quai 22 et quai 24). Le quai 22 est équipé d'une grue, d'un stacker, d'un QC et de 4 remorques, tandis que le quai 24 dispose d'une grue, d'un stacker et de 4 remorques. Il n'y a pas de problème de disponibilité de ces équipements. Lorsqu'un des quais est libre, il est possible de déplacer les équipements nécessaires de ce quai vers l'autre pour les utiliser.

Les RTG ont une capacité de traitement limitée pour les remorques et les camions privés, avec un seuil minimum pour le traitement des camions privés. De plus, il est important de noter qu'un RTG ne peut gérer qu'une seule remorque ou un seul camion privé à la fois.

Le processus de déchargement, qui utilise les RTGs, est particulièrement problématique, cependant, l'objectif est de maximiser le nombre de déchargements des remorques par heure tout en maintenant un seuil minimum de traitement des camions privés.

## 1.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté l'entreprise BMT (Bejaia Méditerranéen Terminal ), en fournissant un aperçu général de ses directions, ses missions et de ses activités , qui jouent un rôle essentiel dans son fonctionnement et présenté le problème posé au sien de cette dernière .

Dans le prochain chapitre , nous abordons quelques notions fondamentales de l'optimisation combinatoire . Notre objectif est de comprendre les principes sous-jacents de cette discipline afin de proposer des solutions innovantes pour optimiser les pro-

cessus opérationnels de la BMT.

## 2.1 INTRODUCTION

L'optimisation combinatoire est un outil incontournable, couvrant un vaste domaine étudié en informatique et en mathématiques. Elle est appliquée dans diverses disciplines telles que la bio-informatique, les sciences de gestion et le génie industriel, et constitue un sujet de recherche intensive. En recherche opérationnelle, l'optimisation combinatoire joue un rôle fondamental en raison de la complexité des problèmes d'optimisation et des nombreuses applications pratiques modélisables de cette manière. De nombreuses méthodes ont été développées dans ce domaine. Dans ce chapitre, nous aborderons les concepts clés de l'optimisation combinatoire.

## 2.2 DÉFINITION D'UN PROBLÈME D'OPTIMISATION COMBINATOIRE

Un problème d'optimisation combinatoire (OC) consiste à déterminer un plus grand (petit) élément dans un ensemble fini valué . En d'autres termes , étant donné une famille  $F$  de sous ensembles d'un ensemble fini  $E = \{e_1, \dots, e_n\}$  et un système de poids  $w = \{w(e_1), \dots, w(e_n)\}$  associé aux éléments de  $E$ , un problème d'optimisation consiste à trouver un ensemble  $F \in F$  maximum ou minimum de poids  $w(F) = \sum_{e \in F} w(e)$ ,

i.e :

$$\max \text{ ou } \min \{w(F) \mid F \in F\}$$

où :La famille  $F$  représente donc les solutions du problème .

L'optimisation suit des processus similaires à ceux de la Recherche Opérationnelle. La figure 2.1 offre un aperçu des étapes nécessaires pour résoudre un problème d'optimisation combinatoire.



FIGURE 2.1 – processus d'optimisation

### 1. **Identification :**

Cette étape revêt une importance capitale pour assurer le bon déroulement des phases ultérieures.

2. **Modélisation :** La modélisation consiste à représenter un problème réel sous forme mathématique. Cela permet de définir les variables de décision, la fonction objectif et les contraintes, créant ainsi une base formelle pour résoudre efficacement le problème à l'aide d'algorithmes d'optimisation. Une modélisation précise et adaptée est essentielle pour obtenir des solutions optimales ou proches de l'optimalité.

On modélise un problème d'optimisation combinatoire en Programme Mathématique qui est défini comme suit :

$$\begin{array}{l} \max f(x) \\ S.C \left\{ \begin{array}{l} g_i(x) \preceq 0 \\ h_j(x) = 0 \\ x \in X \end{array} \right. \end{array}$$

En fonction de la nature de l'ensemble  $X$ , on distingue entre les programmes mathématiques continus et discrets. Lorsqu'il s'agit d'un ensemble discret, on fait référence à :

- **Programme mathématiques entier** : Si l'espace de recherche  $X$  ne contient que des nombres entiers .
  - **Programme mathématique binaire** : Si l'espace de recherche  $X$  ne contient que des nombres binaires .
  - **Programme mathématique mixte** : Si l'espace de recherche  $X$  ne contient que des nombres hétérogènes. .
3. **Résolution** : Il existe diverses méthodes pour résoudre des problèmes d'optimisation, en fonction du degré d'exigence quant à l'optimalité de la solution. On distingue principalement deux catégories : les méthodes exactes et les méthodes approximatives , que nous examinerons plus en détail par la suite.
  4. **Implementation** : Une fois que la solution est établie grâce à une méthode de résolution, et qu'elle est validée, il est alors possible de mettre en œuvre concrètement le système.

## 2.4 COMPLEXITÉ ALGORITHMIQUE

Les problèmes d'optimisation combinatoire sont classés en différentes catégories en fonction de leur complexité et des ressources algorithmiques nécessaires pour les résoudre. Parmi les principales classes de problèmes d'optimisation combinatoire, on trouve [12] :

- **P** : Classe des problèmes polynomiaux. Ces problèmes peuvent être résolus en temps polynomial par des algorithmes efficaces.
- **NP** : Classe des problèmes non déterministes polynomiaux. Ces problèmes peuvent être vérifiés en temps polynomial, mais il n'est pas connu s'il existe des algorithmes efficaces pour les résoudre.
- **NP-complet** : Classe des problèmes NP-complets. Ces problèmes sont au moins aussi difficiles que les problèmes les plus difficiles de la classe NP. Si l'un de ces problèmes peut être résolu en temps polynomial, tous les problèmes NP peuvent l'être.
- **NP-difficile** : Classe des problèmes qui sont au moins aussi difficiles que les problèmes NP-complets, mais qui ne sont pas nécessairement dans la classe

NP.

## 2.5

## QUELQUES PROBLÈMES D'OPTIMISATION COMBINATOIRE

### 2.5.1 Problème d'ordonnancement

Le problème d'ordonnancement consiste à planifier et organiser un ensemble de tâches indépendantes sur  $m$  machines qui ne sont pas interconnectées. L'objectif est de minimiser la durée totale  $t$  de l'ordonnancement.

Dans ce contexte où les machines ne sont pas reliées, chaque tâche  $i$  a un temps d'exécution spécifique à la machine  $j$  sur laquelle elle est effectuée.

Ainsi, le temps d'exécution de la tâche  $i$  sur la machine  $j$  est noté  $P_{ij}$ .

Ce problème est formulé sous la forme du programme linéaire suivant :

$$\begin{aligned} & \text{Min } t \\ S.C \quad & \begin{cases} \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, n\} \\ \sum_{i=1}^n p_{ij} \cdot x_{ij} \leq t, \forall j \in \{1, \dots, m\} \\ x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, m\} \end{cases} \end{aligned}$$

Où La première contrainte garantit que chaque tâche parmi les  $n$  tâches est assignée à exactement l'une des  $m$  machines disponibles. La deuxième contrainte stipule que pour chaque machine  $j$ , la somme des temps d'exécution des tâches qui lui sont assignées est inférieure à une durée maximale prédéterminée, qui est le critère de minimisation. En (3) dernière contrainte, la variable binaire  $x_{ij}$  est définie comme égale à 1 si et seulement si la tâche  $i$  est effectuée par la machine  $j$  [2].

### 2.5.2 Problème de Sac à dos

Le problème du sac à dos est un exemple classique de problème d'optimisation combinatoire, faisant partie des problèmes NP-complets. où l'objectif est de sélection

tionner un sous-ensemble d'objets pour maximiser le profit total sans dépasser une capacité de poids maximale du sac.

Mathématiquement, ce problème peut être formulé comme suit : étant donné un ensemble de  $n$  objets, où chaque objet  $o_i$  à un poids  $w_i$  et un profit  $c_i$ , nous cherchons le sous ensemble d'objets à charger dans un sac de capacité  $w$  afin de maximiser la somme des profits .

Les poids  $w_i$  et les profits  $c_i$  ainsi que la capacité  $w$  sont des entiers positifs,  $x_i$  est une variable de décision qui vaut 1 si l'objet  $i$  est inclus dans le sac, et 0 sinon.

La modélisation mathématique complète du problème est [12] :

$$\max z(x) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i$$

$$S.C \begin{cases} \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \leq w \\ x_i \in \{0,1\}, \forall_i = 1, \dots, n \end{cases}$$

### 2.5.3 Problème de couverture

Le problème de couverture est un problème classique en optimisation combinatoire. Il existe plusieurs variantes, telles que le problème de couverture d'ensemble, le problème de couverture de sommets, et le problème de couverture par intervalles. Chaque variante du problème de couverture a sa propre structure et contraintes spécifiques, mais l'idée centrale reste la même : sélectionner un sous-ensemble minimal de sous-ensembles (ou sommets, ou intervalles) qui couvre tous les éléments (ou arêtes, ou points) requis. Nous nous concentrerons ici sur le problème de couverture d'ensemble (Set Cover Problem).

Le problème de couverture d'ensemble consiste à choisir un sous-ensemble minimal de sous-ensembles parmi un ensemble donné, de manière à couvrir tous les éléments de l'ensemble universel.

Formellement, le problème de couverture peut être défini comme suit [3] :

Soit  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  un ensemble fini appelé ensemble universel ,Soit  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$  un sous ensemble de l'ensemble  $U$  et soit  $k$  un entier positif repré-

sentant le nombre maximal de sous ensembles que l'on souhaite sélectionner pour couvrir tous les éléments de  $U$ . L'objectif est de sélectionner  $k$  sous ensembles de  $S$  de manière à couvrir tous les éléments de  $U$ , c'est-à-dire que chaque élément de  $U$  soit inclus dans au moins l'un des sous ensembles sélectionnés.

La modélisation mathématique complète du problème est :

$$\min \sum_{i=1}^m X_i$$

$$S.C \begin{cases} \sum_{i:u_j \in S_i} x_i \geq 1, \forall u_j \in U \\ \sum_{i=1}^m x_i \leq k, \\ x_i \in \{0,1\}, \forall i = 1, \dots, m \end{cases}$$

#### 2.5.4 Problème d'affectation

Le "problème d'affectation" vise à établir des correspondances entre les éléments de deux ensembles distincts, de manière à minimiser un coût tout en respectant des contraintes d'unicité de correspondance pour chaque élément.

Formellement, le problème d'affectation peut être défini comme suit :

Considérons  $m$  tâches et  $n$  agents, avec  $n \geq m$ . Pour chaque paire  $(i, j)$  ( $i$  allant de 1 à  $m$  et  $j$  allant de 1 à  $n$ ), l'attribution de la tâche  $i$  à l'agent  $j$  engendre un coût noté  $c_{ij}$  (où  $c_{ij} \geq 0$ ) Chaque tâche doit être effectuée exactement une fois et chaque agent ne peut réaliser au plus qu'une seule tâche.

Le but est de répartir les tâches entre les agents de manière à minimiser le coût total de réalisation, tout en respectant les contraintes de réalisation des tâches et de disponibilité des agents.

Pour chaque paire tâche/agent  $(i, j)$  on associe une variable binaire d'affectation  $x_{ij}$ , qui prend la valeur 1 si la tâche  $i$  est assignée à l'agent  $j$  et 0 sinon. Le coût total de réalisation des tâches se traduit alors par la somme :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} \cdot x_{ij}$$

Le nombre d'agents effectuant la tâche  $i$  est donné par :

$$\sum_{j=1}^n X_{ij}$$

pour tout  $i = 1 \dots m$ , et le nombre de tâches réalisées par l'agent  $j$  est donné par :

$$\sum_{i=1}^m X_{ij}$$

pour tout  $j = 1 \dots n$ , On peut ainsi modéliser le problème d'affectation sous la forme suivante [3] :

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}$$

$$S.C \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \forall i = 1, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1 \forall j = 1, \dots, n \\ X_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i = 1, \dots, m \forall j = 1, \dots, n \end{cases}$$

Ces contraintes sont couramment rencontrées dans diverses applications impliquant des problèmes d'allocation de ressources et sont généralement désignées sous le nom de "contraintes d'affectation".

## 2.6 CARACTÉRISTIQUES DES POC

- Les POC sont souvent des problèmes de grande taille et leur taille est sans cesse croissante (explosion combinatoire). L'énumération de toutes les solutions ne peut être envisagée.
- Les POC sont souvent des problèmes de grande taille et leur taille est sans cesse croissante (explosion combinatoire). L'énumération de toutes les solutions ne peut être envisagée.
- Délais de résolution exigés sont de plus en plus courts.

Les techniques de l'optimisation combinatoire se répartissent généralement en deux catégories principales : les exactes méthodes et les méthodes approximatives. Une représentation schématique de cette classification des méthodes de résolution des problèmes d'optimisation est présentée dans la Figure 2.2.

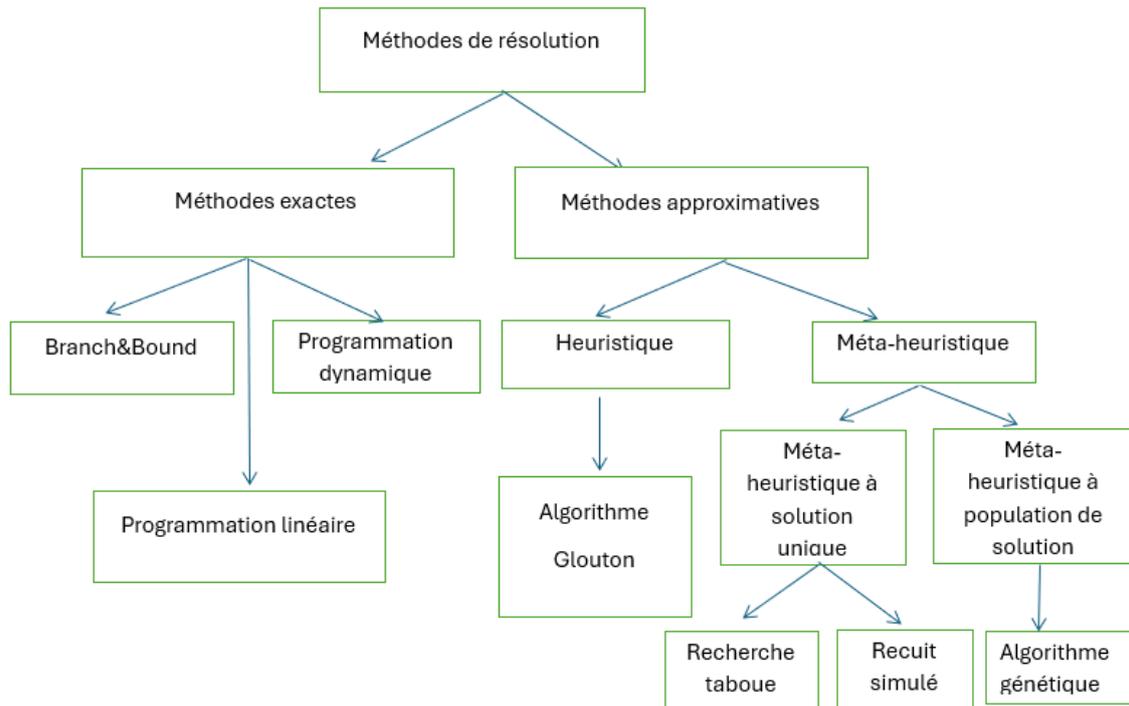


FIGURE 2.2 – Méthodes de résolution

### 2.7.1 Méthodes exactes

Les méthodes exactes, telles que la programmation linéaire en nombres entiers, les procédures de recherche arborescente ou la programmation dynamique, garantissent de trouver la solution optimale et de prouver son optimalité pour toutes les instances d'un problème d'optimisation combinatoire (POC). Elles fournissent également des informations sur les bornes inférieures et supérieures de la solution optimale d'un POC, même si l'algorithme est interrompu avant son achèvement. Cependant, le temps nécessaire pour obtenir la solution optimale d'un POC augmente généralement avec la taille du problème. En pratique, seuls les problèmes de petite ou moyenne taille peuvent être résolus de manière optimale par des algorithmes exacts. De plus, pour certains problèmes, ces algorithmes peuvent consom-

mer énormément de mémoire, ce qui peut entraîner l'arrêt prématuré de l'application.

- **Programmation linéaire :** La programmation linéaire (PL) est une branche de la programmation mathématique peut être utilisée pour résoudre de manière exacte les POC. En effet, lorsqu'un POC peut être modélisé en programme linéaire, il peut alors être résolu, par exemple, à l'aide de l'algorithme du simplexe. Lorsque l'on ajoute la contrainte que les valeurs des variables de décision doivent être entières, on obtient un programme linéaire en nombres entiers (PLNE) . Trois types de problèmes relèvent de la programmation mathématique :

- la programmation linéaire, où les données sont linéaires.
- la programmation non linéaire, où une partie des données sont représentées sous la forme de fonctions non linéaires.
- la programmation en nombre entiers, où certaines variables ou la totalité doivent être entières[5] .

- **Branch and Bound :** La méthode Branch and Bound est une technique utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation globale. Cette méthode fonctionne en divisant un ensemble  $X$  en plusieurs sous ensembles de plus en plus petits. Elle repose sur deux concepts clés : le branchement, qui implique de partitionner ou de diviser l'espace des solutions en sous-problèmes pour optimiser chacun d'eux individuellement, et l'évaluation, qui consiste à identifier l'optimum global [9].

- **La programmation dynamique :** La programmation dynamique basée sur le principe de décomposition et de résolution récursive de sous-problèmes. Cette méthode est basée sur la division d'un problème complexe en sous-problèmes de même naturel mais de difficulté différente plus simples , de résoudre ces sous-problèmes, puis de combiner leurs solutions pour obtenir la solution du problème initial.

L'objectif est de diviser le problème en une série de sous-problèmes imbriqués, plus petits mais généralement similaires au problème principal. Ensuite, on résout ces sous-problèmes de manière séquentielle, en commençant par le plus petit. Les solutions des sous-problèmes d'une étape donnée sont obtenues à partir de celles des étapes précédentes, ce qui évite de résoudre

plusieurs fois le même sous-problème [4].

## 2.7.2 Les méthodes approximatives

Contrairement aux méthodes exactes, les méthodes approximatives ne garantissent pas nécessairement une solution optimale, mais elles fournissent une solution de qualité raisonnable en un temps de calcul réduit. Une part significative des méthodes approximatives est regroupée sous le terme de métaheuristiques. Plusieurs classifications des métaheuristiques existent, mais la plupart distinguent globalement deux catégories : les méthodes basées sur une solution unique courante, qui explorent un seul point de l'espace de recherche à un moment donné, et sont appelées méthodes de voisinage, comme la recherche locale (méthode de la descente), le recuit simulé et la recherche tabou, et les méthodes basées sur une population, qui explorent plusieurs points de l'espace de recherche simultanément, comme les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes de colonies de fourmis.

### Heuristique

En optimisation combinatoire, une heuristique est un algorithme approché qui permet de trouver, en temps polynomial, au moins une solution réalisable rapidement, même si elle n'est pas nécessairement optimale. L'utilisation d'une heuristique est efficace pour obtenir une solution approximative à un problème, accélérant ainsi le processus de résolution exacte. En général, une heuristique est conçue pour un problème particulier, en exploitant sa structure spécifique, mais sans garantir la qualité de la solution trouvée.

- **Algorithme glouton** : Un algorithme glouton peut être utilisé pour sélectionner de manière itérative les sous-ensembles qui couvrent le plus grand nombre d'éléments non couverts à chaque étape. Cette approche peut fournir une solution de qualité raisonnable, bien qu'elle ne soit pas garantie d'être optimale [11].

### Méta-heuristique

Pour surmonter les limitations des heuristiques à obtenir des solutions de haute qualité pour des problèmes d'optimisation complexes, les méta-heuristiques ont été développées. Ces algorithmes permettent généralement de trouver des solutions de très bonne qualité pour des problèmes provenant des domaines de la recherche

opérationnelle, pour lesquels il n'existe pas de méthodes efficaces, ou lorsque la résolution du problème exige beaucoup de temps ou de mémoire.

Le rapport entre le temps d'exécution et la qualité de la solution trouvée par une méta-heuristique est souvent très favorable comparé à d'autres types d'approches de résolution. Contrairement aux heuristiques, qui sont spécifiques à un problème donné, une méta-heuristique peut être adaptée à différents types de problèmes, combinant ainsi plusieurs approches heuristiques.

- **Les méta-heuristiques à solution unique** : Ces méthodes traitent une solution à la fois dans le but de trouver la solution optimale.
- **la recherche taboue** : La recherche taboue se base sur une recherche locale améliorée par l'utilisation d'une mémoire adaptative, appelée liste taboue, qui stocke les mouvements ou solutions récents interdits pour éviter les cycles et encourager l'exploration de nouvelles régions de l'espace de recherche [10].
- **Recuit simulé** : Le recuit simulé fonctionne en explorant l'espace de recherche de manière aléatoire, tout en permettant occasionnellement des mouvements vers des solutions moins optimales pour échapper aux minima locaux. Cette capacité à accepter des solutions sous-optimales est contrôlée par un paramètre de température qui décroît au fil du temps [11].
- **Les méta-heuristiques à population de solutions** : Contrairement aux premières, ces méthodes travaillent avec une population de solutions à chaque itération, permettant une exploration plus large de l'espace des solutions et favorisant la découverte de la solution globale.
- **Algorithmes génétiques** : Les algorithmes génétiques imitent le processus de l'évolution naturelle par les mécanismes de sélection, croisement (recombinaison) et mutation. Ils sont utilisés pour résoudre des problèmes complexes en évoluant une population de solutions candidates au fil du temps [8].

## 2.8

## CONCLUSION

---

En somme, les problèmes d'optimisation combinatoire consistent à déterminer la disposition optimale d'un ensemble fini d'éléments, tout en respectant des conditions spécifiques, dans le but de maximiser ou de minimiser une fonction définie. La majorité des problèmes d'optimisation combinatoire appartiennent à la caté-

gorie des problèmes NP-difficiles, ce qui signifie qu'il n'existe pas actuellement de solutions algorithmiques efficaces acceptables pour toutes les instances de ces problèmes.

En raison de cette complexité, les méthodes d'optimisation combinatoire se divisent en deux catégories : les méthodes approchées et les méthodes exactes, selon la complexité du problème considéré.

Dans le chapitre à venir, nous allons formaliser le problème identifié chez BMT en utilisant un modèle mathématique. Ce modèle comprendra les paramètres essentiels, les variables dont nous devons décider, la fonction que nous souhaitons optimiser, ainsi que les contraintes qui guideront notre processus de prise de décision.

### 3.1 INTRODUCTION

---

La modélisation d'un problème donné constitue une étape essentielle pour une résolution efficace et optimale. Elle implique la création d'une représentation précise du système, permettant de mieux comprendre ses composants et leurs interrelations. Cette représentation peut être de nature variée (mathématique, statistique, etc.), selon le type de problème, les outils et les données disponibles.

Dans ce chapitre, nous allons détailler les éléments nécessaires à la modélisation mathématique du problème étudié, en tenant compte de la linéarité de la fonction objectif et des contraintes associées. Cette approche nous permettra de formuler le problème à l'aide de la Programmation Linéaire, dans le but de maximiser le nombre de remorques traitées par heure tout en respectant un seuil minimum de traitement pour les camions privés. Ensuite, nous décrivons le langage de programmation utilisé pour résoudre notre problème et interpréter les résultats obtenus.

### 3.2 CONSTRUCTION DU MODÈLE

---

Cette modélisation a donné lieu au PLNE défini comme suit :

### 3.2.1 Les paramètres utilisés dans le modèle

- $i$  : Représente les remorques.
- $j$  : Représente les RTGs.
- $b$  : Représente les camions privés.
- $m$  : Nombre maximum de tâches (traitement des remorques et des camions privés) que les RTGs peuvent réaliser par heure.
- $n$  : seuil minimum de camions privés que les RTGs doivent traiter par heure.
- $B$  : Nombre de blocs de stockage.
- $T$  : Nombre total de RTG .
- $C$  : Nombre total de remorques disponibles.
- $P$  : Nombre total de camions privés présents dans un bloc en une heure.

### 3.2.2 Les variables de décision du modèle

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la remorque } i \text{ est déchargé par le RTG } j. \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$
$$Y_{bj} = \begin{cases} 1, & \text{si le camion privé } i \text{ est déchargé par le RTG } j. \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

### 3.2.3 Formulation mathématique

#### La fonction objectif

L'objectif est de maximiser le nombre de déchargements par heure, cela se traduit par maximiser le nombre de remorques déchargé par heure.

$$\max \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^T X_{ij}$$

## Les contraintes

### 1. Capacité des RTG :

Capacité maximale de traitement d'un RTG (en termes de remorques et camions privés) par heure.

$$\sum_{i=1}^C X_{ij} + \sum_{b=1}^P Y_{bj} \leq m, \forall j$$

### 2. Seuil minimum de camions privés :

Chaque RTG doit traiter au moins n camions privés par heure.

$$\sum_{b=1}^P Y_{bj} \geq n, \forall j$$

### 3. Un RTG traite une seule remorque à la fois :

$$\sum_{i=1}^c X_{ij} \leq 1, \forall j$$

### 4. Un RTG traite un seul camion privé à la fois :

$$\sum_{b=1}^P Y_{bj} \leq 1, \forall j$$

### 5. Contrainte pour garantir que les RTGs commencent d'abord par les remorques :

$$Y_{bj} \leq \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C X_{ij}, \forall b, \forall j$$

### 6. Contrainte pour garantir que les RTGs ne traitent pas les camions privés avant d'avoir terminé les remorques disponibles :

$$\sum_{i=1}^C X_{ij} = C \Rightarrow \sum_{b=1}^P Y_{bj} \leq m - C, \forall j$$

### 7. Contrainte de non-négativité :

$$X_{ij}, Y_{bj} \in \{0, 1\}, \forall i, \forall j, \forall b$$

$$\max \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^T X_{ij}$$

$$S.C \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^C X_{ij} + \sum_{b=1}^P Y_{bj} \leq m, \forall j \\ \sum_{b=1}^P Y_{bj} \geq n, \forall j \\ \sum_{i=1}^C X_{ij} \leq 1, \forall j \\ \sum_{b=1}^P Y_{bj} \leq 1, \forall j \\ Y_{bj} \leq \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C X_{ij}, \forall b, \forall j \\ \sum_{i=1}^C X_{ij} = C \Rightarrow \sum_{b=1}^P Y_{bj} \leq m - C, \forall j \\ X_{ij}, Y_{bj} \in \{0, 1\}, \forall i, \forall j, \forall b \end{array} \right.$$

Pour illustrer notre modèle, nous proposons un exemple avec les données suivantes :

- Un nombre total de bloc de stockage  $B=5$  blocs .
- Un nombre total de RTG  $T=5$  RTG.
- Un nombre total de remorques  $C=4$ .
- Un nombre total de camions privés présents dans un bloc en une heure  $P=8$ .
- Un nombre maximum de tâches qu'un RTG peut réaliser par heure  $m=12$ .
- Un seuil minimum de camions privés qu'un RTG doit traiter par heure  $n=7$  .

On résume ces données dans le tableau suivant :

Description des paramètres	valeurs
Nombre total de blocs de stockage	5
Nombre total de RTG	5
Nombre de remorques	4
Nombre de camions privés par bloc	8
Capacité d'un RTG	12
Seuil minimum de traitement des camions privés	7

TABLE 3.1 – les valeurs des paramètres utilisé

### 3.5

## PRÉSENTATION DU LOGICIEL

Python est un langage de programmation interprété, polyvalent et de haut niveau, connu pour sa lisibilité et sa simplicité syntaxique. Créé par Guido van Rossum et publié pour la première fois en 1991, Python encourage l'utilisation de paradigmes de programmation structurée, orientée objet et fonctionnelle. Il est largement utilisé dans divers domaines industriels et académiques, et est souvent choisi pour les projets nécessitant une rapidité de développement, une clarté du code et une grande flexibilité.

- **Utilisation d'un solveur PuLP** : Une bibliothèque Python utilisée pour modéliser et résoudre des problèmes de programmation linéaire et de programmation mixte (linéaire et entière).

### 3.6

## APPLICATION DU MODÈLE

Après avoir exposé les diverses catégories de données, nous avons utilisé le langage de programmation Python pour coder le modèle mathématique et proposer une solution au problème. Afin de résoudre ce modèle, nous devons suivre les étapes suivantes :

► **Étape 1 :**

Créer un nouveau projet :

Aller à : **file** → **New project** → **Create** → **Attach**

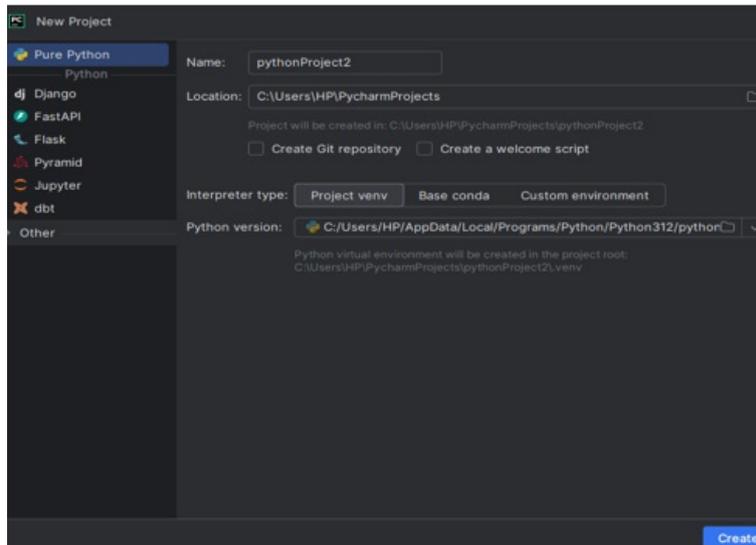


FIGURE 3.1 – création du projet

► **Etape 2 :**

**New** → **file** → **entrer le nom du projet**

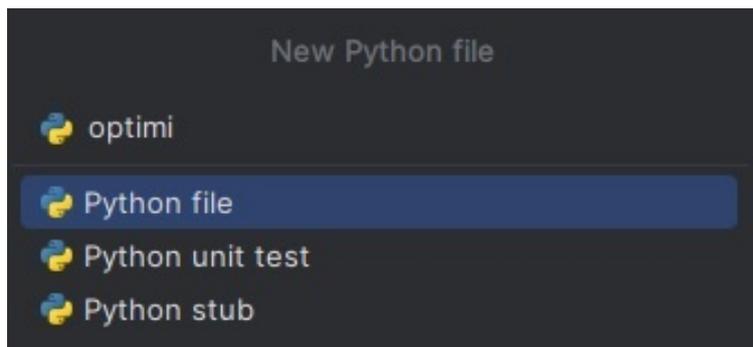


FIGURE 3.2 – Nom du projet

► **Etape 3 :**

Initialiser le problème, entrer les données, définir les variables de décision, définir la fonction objectif, définir les contraintes. Résoudre le problème en utilisant **prob.solve()**

► **Etape 4 :**

Dans cette étape, nous exécutons notre modèle en cliquant sur :

```

pythonProject1 | Version control | Current File |
off.py | optim.py x
1 import pulp
2
3 # Définition des paramètres
4 C = 4 # Nombre total de remorques disponibles
5 P = 8 # Nombre de camions privés par bloc par heure
6 T = 5 # Nombre total de RTGs
7 m = 12 # Nombre maximum de tâches par RTG par heure
8 n = 7 # Seuil minimum de camions privés par RTG par heure
9
10 # Création du problème de maximisation
11 prob = pulp.LpProblem(name="Maximiser le nombre de déchargements", pulp.LpMaximize)
12
13 # Variables de décision
14 X = pulp.LpVariable.dicts(name="X", ((i, j) for i in range(1, C+1) for j in range(1, T+1)), cat='Binary')
15 Y = pulp.LpVariable.dicts(name="Y", ((b, j) for b in range(1, P+1) for j in range(1, T+1)), cat='Binary')
16
17 # Fonction objectif
18 prob += pulp.lpSum(X[i, j] for i in range(1, C+1) for j in range(1, T+1)), "Nombre de remorques déchargées"
19
20 # Contrainte de capacité maximale de traitement d'un RTG

```

FIGURE 3.3 – exécution du modèle

### 3.7 RÉSULTAT

Suite à l'exécution du programme mathématique en Python, les résultats obtenus sont les suivants :

```

Run | optim x
Result - Optimal solution found
Objective value:          20.00000000
Enumerated nodes:        0
Total iterations:        35
Time (CPU seconds):      0.01
Time (Wallclock seconds): 0.01

Option for printingOptions changed from normal to all
Total time (CPU seconds): 0.02 (Wallclock seconds): 0.02

Status: Optimal
Nombre de remorques déchargées : 20.0
RTG 1:
Décharge la remorque 1
Décharge la remorque 2
Décharge la remorque 3
Décharge la remorque 4
Décharge le camion privé 1
Décharge le camion privé 2
Décharge le camion privé 3
Décharge le camion privé 4
Décharge le camion privé 5
Décharge le camion privé 6
Décharge le camion privé 7
pythonProject1 > optim.py

```

FIGURE 3.4 – résultats obtenus

```
Run optim x
RTG 2:
Décharge la remorque 1
Décharge la remorque 2
Décharge la remorque 3
Décharge la remorque 4
Décharge le camion privé 1
Décharge le camion privé 2
Décharge le camion privé 3
Décharge le camion privé 4
Décharge le camion privé 6
Décharge le camion privé 7
Décharge le camion privé 8
RTG 3:
Décharge la remorque 1
Décharge la remorque 2
Décharge la remorque 3
Décharge la remorque 4
Décharge le camion privé 1
Décharge le camion privé 2
Décharge le camion privé 3
Décharge le camion privé 4
Décharge le camion privé 5
Décharge le camion privé 7
Décharge le camion privé 8
RTG 4:
```

FIGURE 3.5 – résultats obtenus

```
Run optim x
Décharge la remorque 1
Décharge la remorque 2
Décharge la remorque 3
Décharge la remorque 4
Décharge le camion privé 1
Décharge le camion privé 2
Décharge le camion privé 3
Décharge le camion privé 4
Décharge le camion privé 5
Décharge le camion privé 6
Décharge le camion privé 7
RTG 5:
Décharge la remorque 1
Décharge la remorque 2
Décharge la remorque 3
Décharge la remorque 4
Décharge le camion privé 1
Décharge le camion privé 2
Décharge le camion privé 3
Décharge le camion privé 4
Décharge le camion privé 5
Décharge le camion privé 6
Décharge le camion privé 7
Process finished with exit code 0
```

FIGURE 3.6 – résultats obtenus

### 3.8

## VISUALISATION DES RÉSULTATS

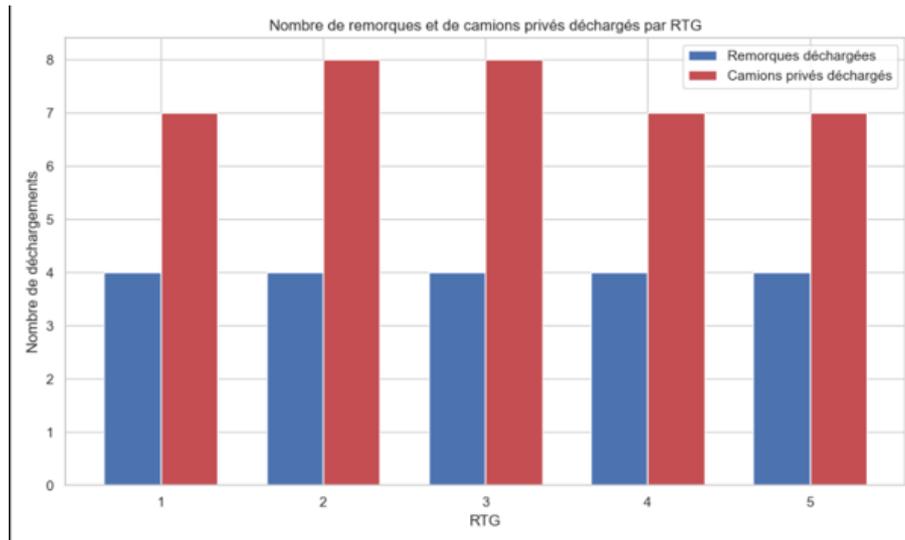


FIGURE 3.7 – Visualisation des résultats

### 3.9

## INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les résultats obtenus indiquent que le modèle d'optimisation a trouvé la meilleure solution possible pour optimiser le processus de déchargement en maximisant le nombre de remorques déchargées par heure atteignant un total de 20, ce qui est la valeur maximale que l'on pouvait atteindre compte tenu des contraintes imposées. Tous les RTGs ont suivi la règle de décharger toutes les remorques disponibles avant de traiter les camions privés, tout en respectant les capacités maximales et les seuils minimums fixés.

Le graphique montre que :

- Tous les RTG déchargent le même nombre de remorques : 4 remorques chacune.
- Il y a une légère variation dans le nombre de camions privés déchargés, avec RTG 2 et RTG 3 ayant le maximum de 8 camions, tandis que les autres RTG (1, 4, et 5) déchargent 7 camions chacun.

Les premières 4 activités pour chaque RTG sont des déchargements de remorques (Remorque 1 à Remorque 4). Les activités restantes (5 à 12) sont des traitements de camions privés (Camion 1 à Camion 8).

Par conséquent, tous les RTGs suivent une répartition uniforme : d'abord, les déchargements de remorques, suivis des traitements de camions privés.

Comme le nombre total de remorques disponibles est de 4, cela veut dire que quand un RTG décharge des remorques, les autres se consacrent au traitement des camions privés. Une fois les remorques vidées, elles retournent au quai pour charger de nouveaux conteneurs, libérant le RTG concerné pour s'occuper des camions privés attendant dans le bloc. Ce processus se répète pour tous les RTGs disponibles. En d'autres termes, lorsqu'un RTG commence à décharger, il traite un nombre spécifique de remorques jusqu'à ce qu'il soit nécessaire de passer au traitement des camions privés. Une fois que le RTG a terminé avec les remorques, ces dernières sont dirigées vers le quai pour récupérer d'autres conteneurs.

Pendant que les remorques se déplacent vers le prochain RTG, le RTG précédent commence à traiter les camions privés dans la même zone où les remorques ont été déchargées. Chaque RTG est programmé pour respecter un seuil minimum de traitement des camions privés avant de passer à la prochaine série de remorques.

Chaque RTG passe efficacement du déchargement des remorques au traitement des camions privés, tout en optimisant le nombre d'unités manipulées par heure (VR).

## **3.10 CONCLUSION**

---

Dans ce chapitre, nous avons formulé le modèle mathématique du problème et l'avons implémenté en Python. Les résultats obtenus révèlent une configuration optimale, démontrant une utilisation efficace des RTGs pour maximiser le nombre de remorques déchargées par heure, atteignant ainsi un total de 20.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce présent travail a été réalisé au niveau de l'entreprise Bejaia Méditerranéen Terminal (BMT), où la performance d'une entreprise par rapport à ses pairs en Algérie se mesure par le nombre de mouvements (chargement/déchargement) réalisés par heure. Actuellement, BMT rencontre d'importants défis pour atteindre un nombre de mouvements optimal, en raison de l'utilisation des portiques gerbeurs sur pneus (RTG). Ces équipements sont sollicités pour deux tâches : le déchargement des remorques de conteneurs et la distribution des marchandises aux camions privés. Lorsqu'une remorque atteint le parc de stockage, les RTG sont souvent occupés par la distribution aux camions privés, entravant une allocation optimale des RTG entre les remorques et les camions privés.

Dans la résolution de ce problème, nous avons étudié les capacités des RTG et déterminé le nombre de camions privés et de remorques dans chaque bloc de stockage. Cela nous a permis de développer un modèle mathématique visant à planifier de manière optimale les tâches. Nous avons implémenté ce modèle en Python, et les résultats indiquent que chaque RTG dans chaque bloc doit prioriser le traitement des remorques avant celui des camions privés. Lorsqu'un RTG traite des remorques, les autres se concentrent sur les camions privés. Une fois les remorques déchargées, elles retournent au quai pour charger de nouveaux conteneurs, permettant au RTG concerné de s'occuper des camions privés en attente dans le bloc, et ainsi de suite pour tous les RTG disponibles.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BMT. <https://bejaiamed.com/>.
- [2] Kherbouche, Lynda and Oubahri, Zohra, Quelques méthodes de résolutions en optimisation combinatoire, UMMTD, 2017.
- [3] Le Bouthillier, Alexandre, Recherches coopératives pour la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire, 2007.
- [4] E.-G. Talbi. Metaheuristics : From Design to Implementation. Wiley, 2009.
- [5] Nemhauser, G. L., Wolsey, L. A. (1988). Integer and Combinatorial Optimization. Wiley-Interscience.
- [6] C.R. Reeves, Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, McGraw-Hill, 2015.
- [7] P. Fouilhoux, Optimisation Combinatoire : Programmation Linéaire et Algorithmes, Polycopié de cours, Université Pierre et Marie Curie, 2015.
- [8] Julien Antonio, Fabrice Chauvet, Chengbin Chu, and Jean-Marie Proth. The cutting stock problem with mixed objectives : Two heuristics based on dynamic programming. European Journal of Operational Research, 14, pp. 395-402, 1999.
- [9] M. Zitouni S. Mebarki. Evaluation des performances de la nouvelle zone portuaire (ZEP- Plein) de BMT et son impact sur la congestion du parc. Mémoire de Master.
- [10] J.M. Valério de Carvalho and A.J. Guimarães Rodrigues. An lp-based approach to a two-stage cutting stock problem. European Journal of Operational Research, (580-589), 1995.
- [11] "An Overview of Heuristic Methods for Combinatorial Optimization Problems" par Thomas Bäck, David B. Fogel, et Zbigniew Michalewicz.
- [12] Mahmoud Zennaki. Recherche Opérationnelle et Combinatoire. PhD thesis, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran U Mohamed Boudiaf, 2020.

- [13] P. C. Gilmore and R. E. Gomory. A linear programming approach to the cutting-stock problem. *Operations Research*, 9(6), (849-859), 1961.

## RÉSUMÉ

Ce mémoire se penche sur l'optimisation des opérations de déchargement au terminal méditerranéen de Béjaia (BMT), un pilier vital du commerce international en Algérie. l'objectif principale est de maximiser le nombre de déchargements des remorques par heure tout en maintenant un seuil minimum de traitement des camions privés. Pour atteindre cet objectif une méthode rigoureuse a été adopté qui est la programmation linéaire en nombre entier.

Les résultats obtenus dévoilent une configuration RTG optimale, permettant de décharger jusqu'à 20 remorques par heure. Cette avancée spectaculaire renforce non seulement la productivité du terminal, mais aussi son rôle stratégique dans l'économie mondiale, attirant des investissements et établissant des connexions commerciales robustes.

**Mots-clés** :Bejaia Mediterranean Terminal (BMT), optimisation combinatoire,modélisation ,programmation linéaire .

### Abstract

This thesis focuses on optimizing unloading operations at the Mediterranean terminal of Béjaia (BMT), a vital pillar of international trade in Algeria. The main objective is to maximize the number of trailer unloadings per hour while maintaining a minimum threshold for handling private trucks. To achieve this goal, a rigorous method has been adopted : integer linear programming.

The results reveal an optimal RTG configuration, enabling the unloading of up to 20 trailers per hour. This remarkable advancement not only enhances the terminal's productivity but also strengthens its strategic role in the global economy, attracting investments and establishing robust commercial connections.

**Keywords** :Bejaia Mediterranean Terminal (BMT), combinatorial optimization, modeling, linear programming.