



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة

Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées



Département de Génie Logistique et Transport

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

D'INGENIEUR d'État

-Filière-

INGENIERIE DES TRANSPORTS

-Spécialité -

INGENIERIE DES TRANSPORTS

- Thème -

Optimisation des rotations conducteurs de la SETRAM d'Alger

Réalisé par

AIDA Imane

MAHMOUDI Khadidja

Les membres de Jury

REZKI Nafissa	MCB	Présidente
BOUZID Mouaouia Cherif	MCA	Encadrant
AGGUINI Chafik	MAA	Examinateur
BADJARA Mohamed el Amine	MAA	Examinateur

Alger, le 02 / 07 /2024

Année universitaire 2023 – 2024

Dédicaces

A mes plus grands soutiens et sources d'inspiration, je dédie ce travail avec tout mon amour et ma reconnaissance infinis.

À ma chère mère, YACHIR Fatiha, et à mon père adoré, AIDA Moussa,

Vos encouragements incessants, votre amour inconditionnel et votre soutien indéfectible ont été les piliers de ma réussite. Vous avez toujours cru en moi, même dans les moments où je doutais de mes capacités. C'est grâce à vous que j'ai trouvé la force de persévérer et d'aller jusqu'au bout de ce projet.

À ma grande sœur, AIDA Fatima, et à ma sœur, AIDA Zakia, ainsi qu'à ses merveilleux enfants, BELHADRI Nour El Houda, BELHADRI Marwa, et BELHADRI Yahia,

Votre présence réconfortante et vos mots d'encouragement ont illuminé les moments difficiles. Vous avez toujours été là pour moi, offrant un soutien sans faille et un amour fraternel qui m'ont réchauffé le cœur.

À tous mes amis et ma famille, et à toutes les personnes qui ont été là pour moi,

Vos encouragements, votre soutien et votre amitié m'ont donné la motivation nécessaire pour accomplir ce projet. Merci pour votre patience, votre compréhension et pour avoir partagé cette aventure avec moi.

Enfin, à la personne que j'aime profondément et qui a été à mes côtés à chaque étape de ce chemin, mon cousin BELHADRI Salah Eddine,

Ton amour, ton soutien et tes encouragements constants ont été une source inestimable de force et de motivation. Tu as cru en moi, même lorsque j'avais des doutes. Merci d'avoir été mon roc, ma source d'inspiration et mon partenaire dans cette aventure.

Cette réalisation est le fruit de notre amour, de notre famille et de notre amitié. À chacun de vous, je dédie ce travail avec tout mon amour et ma gratitude.

Avec toute mon affection,

AIDA Imane

Dédicaces

Avec tous mes sentiments de respect. Avec l'expérience de ma reconnaissance,
je dédie ma remise de diplôme et ma joie

A mon père Mohamed, qui reste mon héros et mon amour éternel. Chacune de
mes réussites lui est dédiée

A ma mère Fatma qui toujours été mon roc, ma sources d'amour et de soutien
inébranlable. Son dévouement et ses sacrifices ont forgé ma détermination

A ma soeur « Asma » et mon frère « Sofiane », merci pour votre soutien
constant, votre humour contagieux et votre présence réconfortante

À celui qui m'a généreusement accordé de son temps et m'a honorée de sa
bienveillance, en reconnaissance de ses mérites, car il a été pour moi le meilleur
des soutiens et un véritable appui « mon mari »

A tous ma famille **MAHMOUDI**, source d'espoir et de motivation

A tous mes amis

À moi-même

KHADIDJA

Remerciement

En préambule à ce travail nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant la réalisation de notre projet de fin d'étude.

Nous adressons notre profond remerciement à notre encadrant Mr. Mouaouia Cherif BOUZID pour ses précieux conseils afin de mener notre travail à bon port.

Nous voudrions également témoigner notre gratitude à Mr HAMACHE Tahar qui s'est dévoués pour nous dispenser conseils et directives utiles.

Ces remerciements vont au corps professoral et administratif du département Génie Logistique et Transport de l'Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements aux personnes de la SETRAM responsables, cadres et agents de nous avoir fournis des données qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre modeste travail en acceptant de l'examiner.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci

ملخص

تواجه شركة سيترام، المسؤولة عن تشغيل شبكة الترامواي في الجزائر، تحديًا كبيرًا في تخطيط دورات عمل السائقين بطريقة تضمن التوازن بين متطلبات التشغيل وراحة السائقين. تكمن المشكلة في تعقيد الجدولة لضمان تغطية جميع الخدمات المطلوبة يوميًا مع احترام عدد من القيود مثل أيام العمل، أيام الراحة، الإجازات والتدريب. لحل هذه المشكلة ولتقديم الحل الأمثل، قمنا بتطوير نموذج رياضي من مستويين يعتمد على البرمجة بالأعداد الصحيحة المختلطة. استخدمنا أدوات قوية لحل النموذج المقترح. بعد معالجة البيانات وتنفيذ النموذج، أثبتت النتائج أن جميع القيود المفروضة تم احترامها، حيث تم تغطية جميع الخدمات المطلوبة مع الحفاظ على عدد السائقين الاحتياطيين المطلوب يوميًا. هذا الحل يضمن كفاءة التشغيل، مما يحسن من مستوى الخدمة المقدمة للركاب.

الكلمات المفتاحية: تخطيط دورات السائقين، البرمجة بالأعداد الصحيحة المختلطة، الترامواي، النمذجة.

Résumé

La SETRAM, responsable de l'exploitation du réseau de tramway en Algérie, rencontre un défi majeur dans la planification des rotations des conducteurs de manière à équilibrer les exigences opérationnelles et le bien-être des conducteurs. Le problème réside dans la complexité de la planification pour assurer la couverture de tous les services requis chaque jour tout en respectant diverses contraintes telles que les jours de travail, les jours de repos, les congés et la formation. Pour résoudre ce problème et offrir la solution optimale, nous avons développé un modèle mathématique à deux niveaux basés sur la programmation en nombres entiers mixtes. Nous avons utilisé des outils puissants pour résoudre le modèle proposé. Après traitement des données et résolution du modèle, les résultats ont démontré que toutes les contraintes imposées ont été respectées, avec une couverture complète de tous les services requis tout en maintenant le nombre de conducteurs en réserve requis quotidiennement. Cette solution garantit l'efficacité opérationnelle, améliorant ainsi le niveau de service offert aux passagers.

Mots clés : Roulement des conducteurs, programmation en nombres entiers mixtes, tramway, modélisation.

Abstract

SETRAM is an Algerian public transit company which operates the tramway network in Algeria. It faces a significant challenge in scheduling driver rotations to balance operational requirements and driver well-being. The problem lies in the complexity of scheduling to ensure that all required services are covered daily while respecting various constraints such as workdays, rest days, leave, and training. To address this issue and provide the optimal solution, we developed a mathematical model based on mixed-integer programming. We used powerful tools to solve the proposed model. After processing the data and executing the model, the results showed that all imposed constraints were met, with full coverage of all required services while maintaining the necessary number of reserve drivers daily. This solution ensures operational efficiency, thereby enhancing the level of service provided to passengers.

Key words: Rostering, mixed-integer programming, tramway, modeling.

TABLE DE MATIERE

LISTE DE TABLEAUX	IV
LISTE DE FIGURES	V
LISTE D'ABREVIATIONS	VII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: ETUDE DE L'EXISTANT	4
I.1 Introduction	4
I.2 L'entreprise SETRAM et le réseau du tramway d'Alger	4
I.2.1 SETRAM D'Alger	4
I.2.2 Description du réseau de tramway d'Alger	4
I.2.3 L'organigramme	6
I.3 Processus de confection des roulements conducteurs à la SETRAM	6
I.3.1 Le roulement et ses objectifs	6
I.3.2 Les contraintes opérationnelles et des règles de travail des conducteurs ...	6
I.3.3 Description du processus existant de planification des roulements	7
I.3.4 Principaux défis rencontrés lors de la planification des horaires des conducteurs	8
I.4 Problématique	8
I.5 Conclusion	9
CHAPITRE II : Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains	10
II.1 Introduction	11
II.2 Le cahier des charges	11
II.2.1 Les étapes de cahier d'charge	11
II.2.2 L'objectif de cahier d'charge	12

II.3	Construction de l'Horaire Maître ou Tableaux de Marche	13
II.3.1	Définition de l'Horaire Maître	13
II.3.2	Rôle et importance dans la planification des services de tramway	13
II.3.3	Objectifs de l'horaire maître	14
II.4	Graphicage	14
II.4.1	Qu'est-ce que le graphicage ?	14
II.4.2	Importance du graphicage dans la planification des services	16
II.4.3	Étapes du Graphicage	17
II.5	Habillage	17
II.5.1	Qu'est-ce que l'habillage ?	17
II.5.2	Rôle de l'habillage dans l'organisation des ressources humaines et matérielles	19
II.5.3	Étapes du processus d'habillage	19
II.5.4	Facteurs à prendre en compte pour un habillage efficace.	20
II.6	Roulement	21
II.6.1	Les objectifs de roulement	21
II.6.2	Les étapes de roulement	22
II.6.3	Les contraintes opérationnelles et des règles de travail des conducteurs	22
II.7	Logiciels d'exploitation	23
II.8	Conclusion	25
CHAPITRE III: METHODOLOGIE		27
III.1	Introduction	27
III.2	Description du problème	27
III.2.1	Décomposition du problème	28
III.3	Modélisation du problème	29
III.3.1	Problème maître	29
III.3.2	Sous-problème	33

III.4 Conclusion	34
CHAPITRE IV: IMPLEMENTATION ET RESULTATS	37
IV.1 Introduction	37
IV.2 Vue d'ensemble de l'implémentation	38
IV.2.1 Choix de l'outil de résolution	38
IV.2.2 Préparation des données	40
IV.2.3 Stratégies pour améliorer la performance de la résolution	42
IV.3 Introduction du modèle sur NEOS	42
IV.3.1 Soumission du modèle sur NEOS	43
IV.3.2 Code AMPL pour le problème maître	43
IV.3.3 Code AMPL pour le sous-problème	48
IV.4 Résultats et discussion	54
IV.4.1 Résultats du Modèle de Planification	54
IV.4.2 Analyse des Résultats	59
IV.5 Conclusion	61
CONCLUSION GENERALE	63
BIBLIOGRAPHIE	65

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 01 : roulement de 13 conducteurs.....	8
Tableau 02 : logiciels d'exploitation des transports urbain existants	23

LISTE DE FIGURES

Figure 01 :les caractéristiques du tramway d'Alger.....	05
Figure 02 :schéma de la ligne du tramway d'Alger.....	05
Figure 03 :l'organigramme de l'entreprise SETRAM.....	06
Figure 04 :exemple de table de graphicage dans la SETRAM.....	15
Figure 05 :Décomposition du Problème de Planification des Conducteurs (réalisé par l'étudiant).....	29
Figure 06 :Extrait du Tableau PEX	41
Figure 07 :page d'accueil de NEOS.....	43
Figure 08 :paramètres, ensembles et variables du problème maître.....	44
Figure 09 : contraintes et fonction objectif du problème maître.....	45
Figure 10 :les données des problèmes maîtres.....	45
Figure 11 :code AMPL utilisé pour afficher les résultats (problème maître.....	46
Figure 12 :suite de code AMPL utilisé pour afficher les résultats (problème maître).....	47
Figure 13 :paramètres, ensembles et variables du sous problème.....	48
Figure 14 :contraintes et fonction objectif du sous problèmes.....	49
Figure 15 :les données du sous-problème (paramètres n,m et h).....	49
Figure 16 :données du sous-problème (paramètre x).....	50
Figure 17 :données du sous-problème (paramètre f).....	51
Figure 18 :données du sous-problème (paramètre c).....	52
Figure 19 :données du sous-problème (paramètres r et s).....	52
Figure 20 : Code AMPL utilisé pour afficher les résultats (sous-problème).....	53
Figure 21 :Rapport de Résultat du problème maître avec Gurobi via NEOS.....	54
Figure 22 :Extrait de la Pré-affectation Annuelle Optimisée par NEOS avec Gurobi.....	55
Figure 23 :Extrait des paramètres (s, h, x) si sous-problème issus de la résolution du problème maître.....	55
Figure 24 :Extrait des Paramètres (f) du Sous-Problème Issu de la Résolution du Problème Maître.....	56
Figure 25 : extrait des paramètres (c) du sous-problème issu de la résolution du problème maître.....	56
Figure 26 :Extrait des Paramètres (r) du Sous-Problème Issu de la Résolution du Problème Maître	57

Figure 27 :	Rapport de Résultat du Sous-problème avec Gurobi via NEOS.....	58
Figure 28 :	Extrait de l'Affectation Annuelle Optimisée par NEOS avec Gurobi.....	59
Figure 29 :	Extrait de tableau récapitulatif des jours de travail, de repos, de congé et de formation annuels pour chaque conducteur.....	59
Figure 30 :	Graphique de la Couverture des Services Requis et de la Gestion des Conducteurs en Réserve pendant l'Année.....	60

LISTE D'ABREVIATIONS

AMPL	A Mathematical Programming Language
API	Application Programming Interface
CdT	les Conditions de Travail
CPLEX	Outil informatique d'optimisation Son nom fait référence au langage C et à l'algorithme du simplexe
EMA	Entreprise Métro d'Alger
HLP	Haut-le-Pied
IP	Internet Protocol
Ipop	A sparse symmetric indefinite linear solver
LAC	Lignes Aériennes de Contact
LP	Linear Programming
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
NEOS	Network-Enabled Optimization System
PEX	Prévision de l'Exploitation
QP	Quadratic Programming
RATP	régie autonome des transports parisiens
SETRAM	Société d'Exploitation des TRAMWAY
TM	tableaux de marche
TUV	Temps d'Utilisation des Véhicules

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La gestion efficace des horaires de travail représente un défi crucial dans de nombreux secteurs professionnels, où une planification précise est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des opérations. Dans le domaine complexe du transport, cette tâche revêt une importance particulière, influençant directement la qualité des services fournis, la satisfaction des clients et le bien-être des employés. Parmi les entreprises confrontées à ces défis, SETRAM se distingue en tant qu'acteur majeur dans le paysage du transport urbain, opérant un réseau vital de tramways à travers Alger.

Dans cette optique, la planification des horaires de travail au sein de SETRAM représente un enjeu stratégique majeur. Tout retard ou dysfonctionnement peut non seulement perturber le flux opérationnel, mais également impacter négativement la satisfaction des usagers, affectant ainsi la réputation globale de l'entreprise. Face à cette réalité, l'adoption d'approches innovantes et technologiques devient impérative pour garantir une allocation efficace des ressources humaines tout en répondant aux normes de qualité de service et en préservant le bien-être des employés.

Cette étude vise à explorer en profondeur les défis spécifiques rencontrés par SETRAM dans la planification de ses roulements de travail, en mettant en lumière la complexité multidimensionnelle de ce processus. Nous nous concentrons sur la recherche de solutions visant à optimiser la planification des horaires de travail pour maximiser l'efficacité opérationnelle tout en améliorant la qualité de service et en préservant le bien-être des employés. Pour ce faire, nous adoptons une approche méthodologique rigoureuse.

En examinant cette problématique de manière approfondie, nous aspirons à proposer des recommandations pratiques et des solutions innovantes qui permettront à SETRAM de relever avec succès les défis inhérents à la gestion des horaires de travail dans un environnement complexe et en constante évolution.

La suite de ce mémoire est organisée comme suit :

Dans le chapitre 1, nous entamons une analyse approfondie de la situation actuelle, en examinant en détail les processus actuels de planification des roulements de travail au sein de SETRAM, identifiant les lacunes et les défis rencontrés.

Dans le chapitre 2, nous explorons les outils et les concepts préliminaires nécessaires à la planification efficace des roulements de travail. Nous décrivons en détail la construction de

INTRODUCTION GENERALE

l'Horaire Maître, ou Tableau de Marche, en discutant de sa définition, de son rôle, et de son importance dans la planification des services de tramway. Nous analysons également les outils et logiciels utilisés pour cette tâche, ainsi que leurs avantages et limites.

Dans le chapitre 3, Ce chapitre met en lumière la structure méthodologique adoptée pour aborder et résoudre les problèmes de planification des roulements de travail, en assurant une approche cohérente et systématique. Tout d'abord, la modélisation du problème maître est détaillée, définissant avec précision les ensembles, les paramètres, les variables de décision, la fonction objective, ainsi que les contraintes associées. Ensuite, une modélisation similaire est effectuée pour le sous-problème, en accordant une attention particulière aux ensembles, paramètres, variables, fonction objective et contraintes spécifiques à ce sous-problème. Cette double modélisation permet d'optimiser la planification en tenant compte des interdépendances et des spécificités de chaque niveau, assurant ainsi une solution robuste et adaptable aux exigences réelles du terrain.

Le quatrième chapitre se concentre sur l'application pratique du modèle développé. Il détaille les méthodes utilisées pour la résolution du modèle, présente les résultats obtenus et analyse leur pertinence par rapport aux objectifs fixés. Ce chapitre offre une compréhension approfondie de la mise en œuvre de la solution et évalue son efficacité à travers diverses d'optimisation.

CHAPITRE I : Etude de L'existant

Chapitre I : Etude De L'existant

I.1 Introduction

L'un des principaux fournisseurs de transport public en Algérie est le Tramway d'Alger, qui a pour mission d'offrir aux passagers un excellent service sur un vaste réseau de lignes. L'épine dorsale des opérations quotidiennes de la société est son groupe des conducteurs privés qui constituent sa principale source d'inspiration.

Dans cette étude de cas, nous examinerons en détail la manière dont les chauffeurs de tramway en Algérie organisent leurs horaires de travail et étudient les difficultés auxquelles ils sont confrontés.

I.2 L'entreprise SETRAM et le réseau du tramway d'Alger

I.2.1 SETRAM D'Alger

SETRAM est la société chargée de l'exploitation et de la maintenance des Tramways Algérie. Elle exploite actuellement les Tramways d'Alger, Oran, Constantine, Sidi Bel Abbes, Ouargla, Sétif, Mostaganem. Cette société est née d'un accord entre l'Entreprise du Métro d'Alger (EMA) et le groupe RATP. Sa direction générale se trouve dans la capitale Alger (Kouba).

I.2.2 Description du réseau de tramway d'Alger

SETRAM exploite à Alger un réseau composé d'une seule ligne T1 à double voie d'une longueur d'environ 23.2km comportant 38 stations sur les deux sens et un dépôt qui se trouve à MIMOUNI HAMOUD à l'est de la ligne. L'entreprise gère une flotte de 41 rames CITADIS 402 (35 rames en service et les 6 autres sont réservés en cas de panne).

La ligne EST du tramway d'Alger dessert l'agglomération de la région est d'Alger reliant la station multimodale de « RUISSEAUX à la station DERGANA » traversant les communes de HUSSEIN DEY, EL MAGHARIA, EL HARRACH, BAB-EZZOUAR, BORDJ EL KIFFAN et DERGANA.

Les principales caractéristiques de la ligne sont les suivantes :

- D'une ligne à double voie en site propre.
- Remisage + ateliers de Maintenance.
- D'un réseau de Lignes Aériennes de Contact (LAC) qui alimentent en énergie les rames.

CHAPITRE I : Etude de l'Existant

Cette figure montre plusieurs éléments de la ligne de tramway d'Alger :

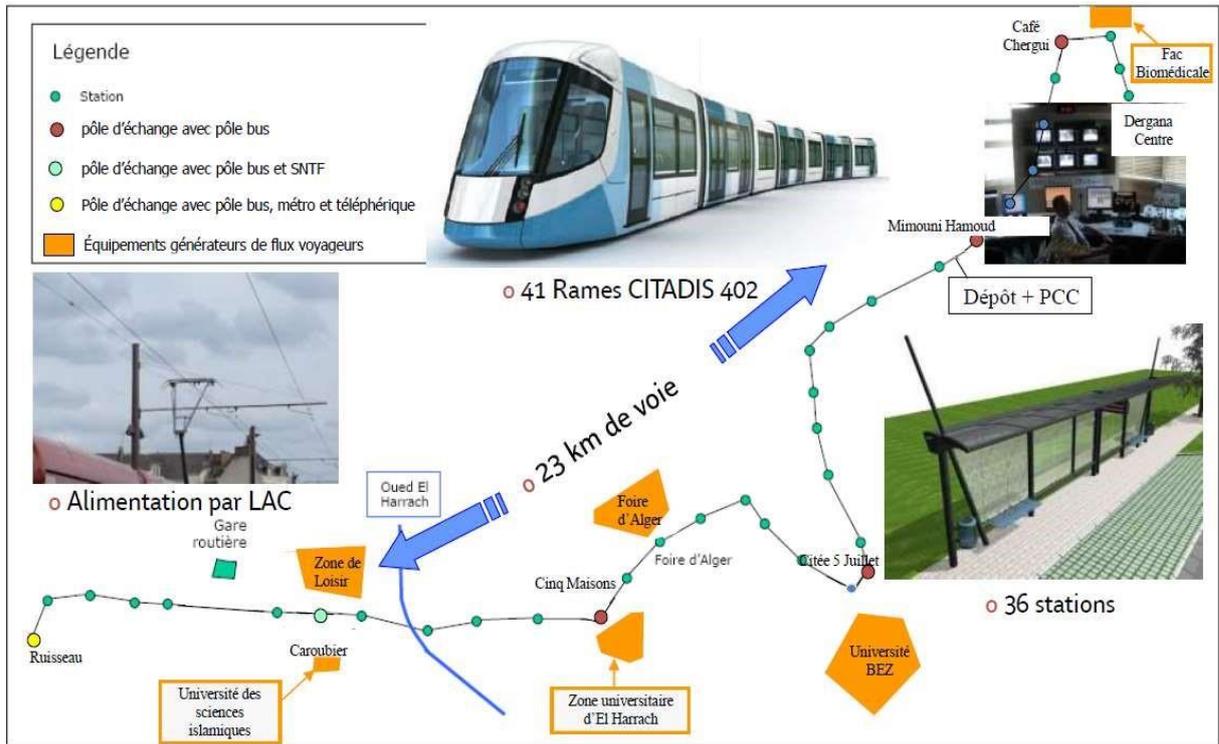


Figure .1 : les caractéristiques du tramway d'Alger

Source : Document de l'entreprise

La figure suivante représente la ligne de tramway de ROUISSEAU vers DERGANA :



Figure .2 : schéma de la ligne du tramway d'Alger

Source : Document de l'entreprise

I.2.3 L'organigramme

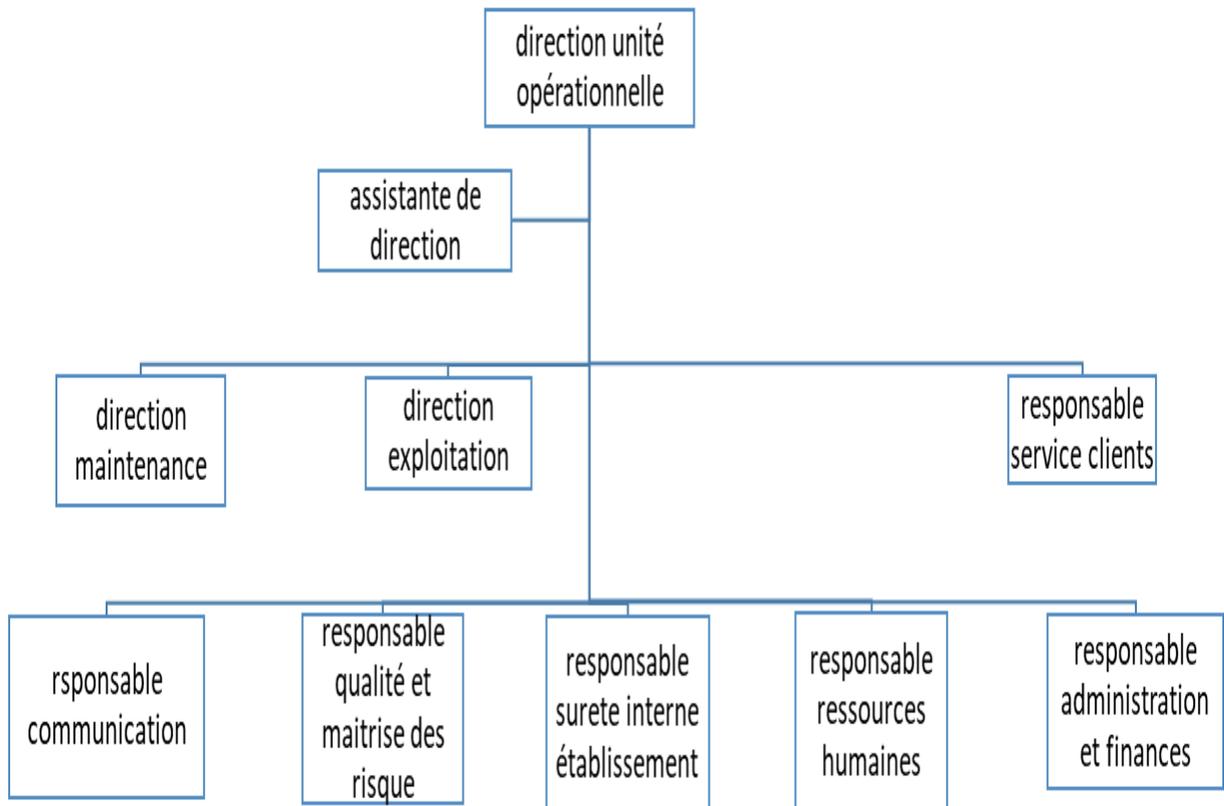


Figure .3 : l'organigramme de l'entreprise SETRAM

Source : Document de l'entreprise

I.3 Processus de confection des roulements conducteurs à la SETRAM

I.3.1 Le roulement et ses objectifs

C'est un Horaire d'un groupe de chauffeurs de tramway durant une période de temps prédéfinie. Chaque groupe comprend des chauffeurs qui ont les mêmes règles et préférences, qui dictent l'affectation des journées de travail et de repos et des réserves.

Le tableau de roulement est conçu pour équilibrer la charge de travail entre les conducteurs tout en tenant compte des contraintes légales et des préférences des employés. Ce processus est crucial pour maintenir une exploitation fluide et fiable des services de tramway.

I.3.2 Les contraintes opérationnelles et des règles de travail des conducteurs

- Congé des jours fériés : 14 jours
- Congé annuel : 22 jours

CHAPITRE I : Etude de l'Existant

- Les jours de formation : 3 jours
- Congé maladie : 16 jours
- Jours de travail annuels : 199 jours
- Jours de repos annuels : 112 jours

I.3.3 Description du processus existant de planification des roulements

La construction d'un horaire de personnel implique une série d'étapes logiques, de la détermination des types de jours à l'ajustement manuel des horaires pour répondre aux besoins individuels des employés.

Vous trouverez ci-dessous un résumé de l'organisation et de l'explication de ces étapes:

I.3.3.1 Identification des types de jours tableau de marche

En fonction de divers facteurs, tels que la saison, le nombre de jours fériés, le Ramadan, etc., chaque jour de la semaine peut nécessiter un travail différent.

I.3.3.2 Détermination du nombre de services pour jour

Déterminer le nombre approprié de services pour chaque type de journée en fonction de la demande prévue, des ressources disponibles et des contraintes opérationnelles.

I.3.3.3 Allocation des horaires

Utilisation de logiciels HEURES et d'outils spécialisés pour générer des calendriers initiaux en tenant compte du nombre de jours et du nombre de services requis.

I.3.3.4 Organisation d'un cycle de 13 conducteurs

Utilisation d'Excel pour planifier l'horaire de travail de 13 conducteurs en alternant des cycles de travail de 4 jours avec deux jours de repos et des cycles de travail de 5 jours avec deux jours de repos, ainsi de suite(4/2, 5/2, 4/2, 5/2, 4/2,5/2.....)

Ce tableau montre comment organisé le cycle de 13 conducteurs :

	dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
1					R	R	
2					R	R	
3				R	R		
4				R	R		
5			R	R			
6			R	R			
7		R	R				
8		R	R				
9	R	R					

CHAPITRE I : Etude de l'Existant

10	R	R					R
11	R						R
12	R					R	R
13						R	R

Tableau .1: roulement de 13 conducteurs

I.3.3.5 Révision manuelle

Les horaires générés sont ensuite revus manuellement et ajustés pour répondre aux besoins individuels et médicaux.

Ces ajustements sont effectués en tenant compte des politiques de l'entreprise, des contraintes en matière de personnel et des exigences opérationnelles.

I.3.3.6 Finalisation et validation

Une fois les ajustements manuels effectués, le calendrier final est revu pour s'assurer qu'il répond le mieux possible aux exigences opérationnelles et aux préférences des employés.

I.3.4 Principaux défis rencontrés lors de la planification des horaires des conducteurs

Un certain nombre de difficultés peuvent survenir lors de la planification des horaires des conducteurs de tramway. Voici quelques-unes des principales difficultés :

- La variabilité de la demande de transport en fonction du jour de la semaine, de l'heure de la journée et de la saison peut rendre difficile la prévision des besoins en personnel et la répartition des horaires de travail.
- La gestion des files d'attente, des absences non planifiées et des remplacements de dernière minute peut constituer un défi pour assurer une couverture appropriée des services tout en respectant les droits des employés.
- Les horaires de travail imprévisibles, les ajustements fréquents des horaires et les cycles de travail inhabituels peuvent avoir un effet sur la santé et le bien-être des chefs de train.

I.4 Problématique

Dans de nombreux domaines de la vie professionnelle, on se trouve confronté au problème de la planification des horaires de travail. Dans les entreprises de transport, un certain nombre de personnels constitués de conducteurs, de contrôleurs et d'agents de maintenance doivent être attribués aux postes de travail de manière à répondre aux cahiers des charges et à la demande de l'offre de transport. Cela nécessite souvent une élaboration périodique et stratégique de planning de travail du personnel. Les raisons de cette élaboration sont multiples et vont de l'amélioration de la qualité du service client à l'assurance d'une bonne qualité de vie pour les employés.

La création des emplois du temps dans les entreprises de transport de voyageurs, nécessitant des ressources humaines et financières importantes, est un défi majeur. Une mauvaise planification affecte directement la performance des employés et la qualité du service de transport.

Ces difficultés ont induit l'idée d'assister par ordinateur l'élaboration des emplois du temps en adoptant des outils basés sur des algorithmes d'optimisation robustes permettant de faciliter cette tâche. D'une manière générale, le problème de l'emploi du temps consiste à définir un certain nombre d'affectations qui permettent d'assigner plusieurs ressources sur une période de temps, tout en respectant les contraintes, le nombre de services, etc. Les contraintes considérées peuvent différer d'un problème à un autre suivant la spécificité ainsi que les caractéristiques attendues de l'emploi du temps recherché.

Pour ce faire, nous adoptons une approche méthodologique rigoureuse, guidée par la question centrale suivante : Comment optimiser la planification des roulements de travail au sein de SETRAM pour répondre aux exigences opérationnelles tout en garantissant une expérience optimale pour les usagers et les employés ?

Ainsi, il s'agit de construire un roulement pour 137 conducteurs sur une année tout en respectant l'ensemble des contraintes imposées par le décideur. Ces contraintes incluent, mais ne se limitent pas à : les jours travaillés, les jours chômés, les périodes de congé, les sessions de formation, et d'autres obligations spécifiques. L'objectif est d'élaborer un planning qui optimise à la fois les besoins opérationnels de SETRAM et la satisfaction des conducteurs, en assurant une répartition équitable et efficace des tâches et des périodes de repos.

I.5 Conclusion

Ce chapitre a offert une vue d'ensemble détaillée de SETRAM, le principal exploitant des tramways en Algérie, en décrivant son réseau, ses opérations et les défis rencontrés dans la planification des horaires de travail de ses conducteurs. Nous avons examiné la structure du réseau de tramways d'Alger, les caractéristiques spécifiques de la ligne, et les pratiques actuelles de gestion des roulements de travail. Dans le prochain chapitre, nous présentons une vue globale sur les outils de Recherche Opérationnelle permettant d'optimiser l'exploitation d'un réseau de transport collectif.

Chapitre II: Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains

II.1 Introduction

La recherche opérationnelle joue un rôle crucial dans l'optimisation et l'exploitation des réseaux de transport collectif. Elle fournit des méthodes et des outils pour améliorer la planification, l'efficacité et la répartition des ressources. Dans ce chapitre, nous examinerons comment ces techniques sont appliquées spécifiquement à un réseau de tramway, en se concentrant sur la construction de l'horaire maître, le graphicage, l'habillage et le roulement.

II.2 Le cahier des charges

Le cahier des charges est un document essentiel dans la planification et l'organisation des services de transport collectif. Il contient les caractéristiques détaillées du service de la ligne, définies par le service marketing de l'entreprise. Ces caractéristiques incluent les itinéraires, l'amplitude de fonctionnement, les fréquences, les intervalles de passages, et les contraintes de desserte.¹

II.2.1 Les étapes de cahier d'charge

Avant toute chose, la société de transport doit définir les différents contextes à regrouper pour déterminer les temps de parcours par ligne. En effet, l'offre de transport varie en fonction des périodes et/ou des types de jours définis par le calendrier commercial.²

Puis, le service de marketing, définir les temps de parcours et le temps de battement minimum entre l'arrivée d'une course et le départ de la course suivante. Cette analyse vise à améliorer la ponctualité aux arrêts et donc le pourcentage de l'arrivée à l'heure au terminus. Il a aussi comme objet la détermination de plages horaires, c'est-à-dire les heures de franges (début et fin journée, les heures de pointe (matin, midi et soir) et les heures creuses (intercalées entre les heures de pointe, soit matinée et après-midi).³

¹ - **Andrés Sanchez**, *Les enjeux et les impacts d'un changement de production dans une exploitation de transport urbaine et interurbains, gestion et management*, Mémoire de stage en vue de l'obtention de diplôme Master , soutenu le 7 septembre 2015 à l'institut de l'homme de Lyon, sous la supervision de Sylvain LOGUT, université Lumière Lyon 2-France , p 47

² - **Andrés Sanchez**, *Les enjeux et les impacts d'un changement de production dans une exploitation de transport urbaine et interurbains*, *op-cit*, p 48.

³ - *op-cit*, p48

CHAPITRE II : Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains

Une fois les analyses sur l'itinéraire et les temps de parcours sont faites, le service de marketing doit les saisir sur le logiciel d'exploitation utilisé par l'entreprise.⁴

Il est important de connaître les impacts sur l'amplitude de la ligne, l'intervalle de passage, le nombre de départs, le temps de parcours et la typologie du matériel requis.⁵

II.2.1.1 Amplitude

L'amplitude est le temps s'écoulant entre le premier et le dernier départ commercial dans une même journée.

II.2.1.2 Le temps de parcours

Les temps de parcours est le temps alloué théoriquement entre le départ d'un terminus et l'arrivée à un autre terminus pour effectuer la course commerciale.

II.2.1.3 L'intervalle de passage et le nombre de départs

L'intervalle de passage est la durée entre deux passages successifs dans la même direction à un point donné.

II.2.1.4 Le temps de battement

Le temps prévu pour un véhicule entre l'arrivée et le départ pour la course suivante.

II.2.1.5 Temps de révolution

Le temps de révolution est le temps attribué théoriquement à chaque voiture entre deux départs consécutifs à partir du même terminus (temps de parcours sens aller + battement+ temps de parcours sens retour + battement).

II.2.2 L'objectif de cahier d'charge

- Établir des spécifications claires et précises pour tous les aspects du service, y compris les itinéraires, les horaires, et les fréquences de passage.
- Planifier l'affectation des conducteurs, des véhicules, et des autres ressources de manière optimale pour maximiser l'efficacité opérationnelle.
- Définir des temps de parcours et des temps de battement optimisés pour garantir que les services sont ponctuels et fiables.

⁴ - op-cit

⁵ - ibid, p 49

II.3 Construction de l'Horaire Maître ou Tableaux de Marche

II.3.1 Définition de l'Horaire Maître

L'horaire maître, également connu sous le nom de tableau de marche (TM), est un document essentiel pour la gestion efficace des réseaux de transport en commun, en particulier les tramways. Il détaille les horaires de passage, comprenant des informations précises sur les heures de départ et d'arrivée, les temps de trajet, les arrêts, et les intervalles entre les services.

La conception du tableau de marche est le fruit d'une optimisation méticuleuse de l'offre de service en fonction des objectifs fixés, tout en respectant les contraintes opérationnelles. Cette optimisation, réalisée de manière anticipée, repose sur des hypothèses concernant les conditions de circulation et la demande de transport, deux facteurs intrinsèquement complexes et aléatoires. Par conséquent, le TM ne peut définir les modalités de fonctionnement optimal qu'en se basant sur des conditions moyennes d'exploitation. Dès que ces conditions dévient de la moyenne, une régulation devient nécessaire pour maintenir la qualité du service.

En somme, le tableau de marche joue un rôle crucial dans la coordination et l'optimisation des flux de tramways, assurant une synchronisation efficace et une exploitation optimale des opérations. Ce document représente une composante fondamentale pour la planification stratégique et l'amélioration continue des systèmes de transport public.

II.3.2 Rôle et importance dans la planification des services de tramway

- **Définir les Horaires de Service**

Établit les horaires détaillés des passages des véhicules de transport sur un réseau donné. Il inclut les heures de départ et d'arrivée, les temps de trajet, et les intervalles entre les services.

- **Planification des Ressources**

Le tableau de marche est essentiel pour planifier l'utilisation des véhicules et des ressources humaines. Il permet de déterminer le nombre de véhicules nécessaires à chaque moment de la journée et d'affecter les conducteurs de manière efficace.

- **Coordonner les Opérations**

Il assure la coordination des opérations en synchronisant les départs et les arrivées des véhicules, ce qui permet d'éviter les conflits et d'optimiser le flux de circulation.

II.3.3 Objectifs de l'horaire maître

Les objectifs de l'horaire maître sont multiples et visent à garantir une gestion optimale des réseaux de transport en commun, notamment pour les tramways. Voici les principaux objectifs:

- **Optimisation de la Circulation**

Assurer une répartition homogène et fluide des tramways sur le réseau pour éviter les encombrements et les temps d'attente excessifs.

- **Ponctualité et Fiabilité**

Définir des horaires précis pour les départs et les arrivées afin de respecter les engagements envers les usagers et améliorer la confiance dans le service.

- **Conformité Réglementaire**

Respecter les réglementations et les normes en vigueur concernant les horaires et la fréquence des services de transport public.

- **Réduction des Temps d'Attente**

Minimiser les intervalles entre les passages des tramways pour offrir un service plus fréquent et plus attractif pour les usagers

II.4 Graphicage

II.4.1 Qu'est-ce que le graphicage ?

Dans le contexte du transport en commun, le graphicage désigne le processus de planification des horaires de passage des véhicules sur un réseau, en tenant compte de divers facteurs tels que la demande des voyageurs, les contraintes d'infrastructure, les temps de trajet et les correspondances.

Le graphicage est l'élaboration et la représentation graphique des horaires commerciaux proposés à la clientèle et des Haut-le-Pied (HLP) réalisés. Chaque enchaînement de courses définit un service voiture qui sera réalisé par un même véhicule. Le graphicage est complet lorsque l'ensemble des courses ont été planifiées dans les services.⁶

⁶ - **Andrés Sanchez**, *Les enjeux et les impacts d'un changement de production dans une exploitation de transport urbaine et interurbains*, *ibid* , p53

CHAPITRE II : Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains

Le but de cette partie est de répondre aux contraintes commerciales de l'offre et de déterminer les moyens matériels à mettre en œuvre pour l'exploitation de la ligne.⁷

De manière générale, le processus de graphiquage de l'offre commerciale se déroule de la manière suivante :

- Identifier le départ important ;
- Tracer les départs dans un sens ;
- Déterminer les départs dans l'autre sens ;
- Valider les données de base ;
- Optimiser le graphique.

Le graphiquage à pente a longtemps été conçu au crayon sur des feuilles de papier millimétré. Aujourd'hui la plupart des sociétés de transport emploient un logiciel spécifique. Les logiciels d'exploitation permettent d'accélérer considérablement le travail de conception, de réduire les risques d'erreur de conception (oubli, incohérences, etc.) et d'assister l'utilisateur dans sa tâche.⁸

Le tableau de graphiquage présenté dans l'image fournit des informations détaillées sur chaque course d'un tramway

	COMMERCIAL			HLP			CONDUITE			BATTEMENT		TOTAL VOITURE
	Durée	Distance	km/h	Durée	Distance	km/h	Durée	Distance	km/h	Durée	Roul./Total	
T101 (1) - 1	13:34	243.918	18.0	1:49	26.356	14.5	15:23	270.274	17.6	1:12	8 % / 7 %	16 H 35 mn
T102 (1) - 1	16:14	291.797	18.0	1:41	23.306	13.8	17:55	315.103	17.6	1:31	8 % / 8 %	19 H 26 mn
T103 (1) - 1	16:25	295.011	18.0	1:30	20.092	13.4	17:55	315.103	17.6	1:29	8 % / 8 %	19 H 24 mn
T104 (1) - 1	16:02	288.246	18.0	1:44	25.991	15.0	17:46	314.237	17.7	1:27	8 % / 8 %	19 H 13 mn
T105 (1) - 1	6:39	119.838	18.0	1:08	15.949	14.1	7:47	135.787	17.4	0:45	10 % / 9 %	8 H 32 mn
T106 (1) - 1	12:26	223.281	18.0	1:07	14.903	13.3	13:33	238.184	17.6	1:06	8 % / 8 %	14 H 39 mn

Figure .4: exemple de table de graphiquage dans la SETRAM

Notamment :

- La durée totale de la course
- La distance totale parcourue
- La distance parcourue en conduite
- Le numéro de la voiture

Durée/distance de service commercial : Cette durée/distance indique le temps pendant lequel le tramway transportait des passagers.

⁷ - ibid, p53 .

⁸ - ibid, p 54.

CHAPITRE II : Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains

Durée/distance de service HLP : Représente le temps/distance pendant lequel le tramway était en opération sans transporter de passagers, par exemple pour rejoindre le dépôt ou pour se rendre à son point de départ.

Conduit : La conduite fait référence au temps total pendant lequel le tramway est en mouvement, qu'il soit en service commercial ou en service HLP.

Le total voiture : c'est une mesure cumulative de l'utilisation du tramway.

Ces informations permettent aux planificateurs de transport de:

- Identifier les zones d'optimisation possibles
- Évaluer la performance des services
- Anticiper les problèmes et prendre les mesures correctives nécessaires
- Communiquer les informations aux usagers

Exemple de définition du Graphicage à partir du tableau

Prenons l'exemple du tramway T101 (1)-1. Le tableau indique que :

Durée de Service :

- Service commercial (avec passagers) : 13 heures et 34 minutes
- Service HLP (Hors Ligne Passagers, sans passagers) : 1 heure et 49 minutes

Distances Parcourues :

- Distance commerciale : 243,918 kilomètres
- Distance HLP : 26,356 kilomètres

Totaux Combinés :

- Durée totale : 15 heures et 23 minutes
- Distance totale : 270,274 kilomètres
- Vitesse moyenne : 17,6 kilomètres par heure

II.4.2 Importance du graphicage dans la planification des services

Le graphicage joue un rôle crucial dans la planification efficace des services de transport, en offrant de nombreux avantages aux entreprises de transport, aux conducteurs et aux usagers.

Optimisation de l'Utilisation des Véhicules : En répartissant les trajets de manière équilibrée, le graphicage permet de maximiser l'utilisation des tramways, réduisant ainsi les coûts liés à l'exploitation.

Gestion des Ressources Humaines : Il contribue à une meilleure gestion des conducteurs et du personnel de maintenance, en assurant une répartition équitable des heures de travail et des périodes de repos.

Optimisation Des Temps De Parcours Et Des Correspondances: Le graphissage vise à minimiser les temps de parcours et à fluidifier les correspondances entre les lignes, réduisant ainsi le temps d'attente des usagers et leur offrant un trajet plus rapide et plus confortable.

II.4.3 Étapes du Graphissage

Le calcul des temps de parcours est effectué à partir de vitesses moyennes ou, si la ligne existe déjà, de données provenant de l'analyse des temps réalisés. Ces temps varient généralement en fonction du jour de la semaine (du lundi au vendredi / samedi / dimanche), de l'heure (pour tenir compte de la circulation et de l'affluence) et de la période (hiver, été, petites vacances scolaires...).

Les courses commerciales peuvent ensuite être créées, puis enchaînées pour former des services-véhicules. Le nombre de véhicules mobilisés simultanément est obtenu avec le Graphissage.

Le processus de graphissage comprend plusieurs étapes clés :

Collecte de Données : Recueil des horaires de départ et d'arrivée, des temps de trajet, et des arrêts prévus.

Analyse des Contraintes : Identification des contraintes opérationnelles, telles que les intervalles minimums entre les services, les temps de repos des conducteurs, et les capacités des tramways.

Création des Graphiques de Service : Élaboration des graphiques de rotation, assignant les trajets spécifiques à chaque tramway pour chaque période de la journée.

Simulation et Ajustements : Simulation des graphiques pour identifier les éventuels conflits ou inefficacités, suivie d'ajustements pour optimiser les rotations.

Validation : Vérification des graphiques pour s'assurer qu'ils respectent toutes les contraintes et qu'ils sont prêts pour une mise en œuvre opérationnelle.

Une fois le graphissage est réalisé, en ayant répondu aux demandes de la clientèle et en optimisant l'utilisation et le nombre de véhicules affectés aux services de la ligne, il faut ensuite passer au processus de l'habillage.

II.5 Habillage

II.5.1 Qu'est-ce que l'habillage ?

L'habillage, dans le contexte des transports en commun, se réfère à l'affectation des ressources humaines (conducteurs) et matérielles (véhicules) en fonction des graphiques de service établis lors du processus de Graphissage. Ce processus vise à organiser les tâches quotidiennes des

CHAPITRE II : Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains

conducteurs et à assigner les véhicules nécessaires pour garantir que le service planifié soit réalisé de manière fluide et efficace.

L'habillage consiste à découper les services véhicules en vacations, puis à affecter les temps annexes travaillés, dans le respect de la législation sociale en vigueur (durée du travail, amplitude, repos, coupures, etc.), afin de créer les services agents théoriques⁹. Cette étape permet de créer les services-conducteurs, par découpage des services-véhicules et création de relèves, parfois avec l'utilisation de véhicules de service. Les temps complémentaires (prise de service, temps de caisse, etc.) et les primes sont ajoutés. Ils dépendent des accords sociaux de chaque entreprise, dans le respect de la réglementation sociale, du code du travail et de la convention collective.¹⁰

Certains logiciels permettent de réaliser automatiquement cette étape grâce à des algorithmes fonctionnant sous contraintes¹¹. Une fois le graphichage réalisé, l'étape suivante consiste à découper les services voitures en tronçons d'habillage qui formeront les services conducteurs (tâche de travail effectuée par un conducteur dans le cadre d'une journée de travail) en tenant compte de la réglementation en vigueur et des accords d'entreprise. L'habillage est donc le fait de définir des services conducteurs couvrant entièrement les services voitures¹².

Le tronçon d'habillage est une unité élémentaire du service conducteur, délimitée par des dépôts et/ou des points de relève, c'est-à-dire les lieux où le conducteur peut prendre possession du véhicule hors du dépôt, le plus souvent à un point d'arrêt sur le réseau. C'est une section continue où le conducteur ne peut pas être remplacé dans sa tâche de conduite.¹³

⁹ - - **Andrés Sanchez**, *Les enjeux et les impacts d'un changement de production dans une exploitation de transport urbaine et interurbains*, *ibid* p57.

¹⁰ - https://www.transbus.org/dossiers/etudesmethodes.html#google_vignette

¹¹ - https://www.transbus.org/dossiers/etudesmethodes.html#google_vignette

¹² - [https://fr.wikipedia.org/wiki/Habillage_\(transport\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Habillage_(transport))

¹³ - [https://fr.wikipedia.org/wiki/Habillage_\(transport\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Habillage_(transport))

CHAPITRE II : Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains

L'habillage est toujours représenté schématiquement sous forme de diagramme de Gantt, chaque ligne contenant un service conducteur.¹⁴

Enfin, l'habillage dans les transports en commun est un processus complexe mais essentiel qui permet de planifier et de gérer efficacement l'utilisation des conducteurs et des véhicules en fonction des services planifiés, tout en respectant les régulations et les accords en vigueur.

II.5.2 Rôle de l'habillage dans l'organisation des ressources humaines et matérielles

L'habillage consiste à organiser et à structurer les horaires de travail des agents en fonction des besoins opérationnels.

L'habillage prend en compte les différentes contraintes opérationnelles, telles que les temps de prise et de fin de service, les temps de battement en terminus, et les périodes de maintenance des véhicules. Cela garantit une fluidité dans les opérations quotidiennes.

L'habillage doit être flexible pour s'adapter aux imprévus tels que les absences non planifiées ou les variations de la demande. Une bonne organisation permet de réagir rapidement à ces changements sans perturber le service.

Prévision des besoins futurs en personnel et en matériel, ainsi que l'anticipation des périodes de pointe ou des travaux de maintenance majeurs.

L'analyse régulière des performances et des données recueillies permet d'ajuster l'habillage pour une amélioration continue. Cela inclut l'optimisation des parcours, l'ajustement des horaires et l'adaptation aux nouvelles contraintes ou opportunités.

II.5.3 Étapes du processus d'habillage.

Pour définir le travail des agents et affecter des services agents sur les vacations des rames, il est essentiel de suivre une série d'étapes méthodiques et claires. Ces étapes permettent d'assurer une organisation optimale tout en respectant les contraintes liées aux conditions de travail des conducteurs. Voici une présentation de ce processus :

- **Pré-calcul du nombre approximatif de services**

Utiliser le Temps d'Utilisation des Véhicules (TUV) fourni par le graphique.

Ajouter les différentes allocations, telles que les temps de prise et de fin de services.

¹⁴ - [https://fr.wikipedia.org/wiki/Habillage_\(transport\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Habillage_(transport))

CHAPITRE II : Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains

Diviser cette valeur par la moyenne du temps de travail des conducteurs (TM), telle que définie par les conditions de travail locales.

- **Construction des services conducteurs**

Conception des services des conducteurs en respectant strictement les Conditions de Travail (CdT) spécifiques à ces derniers.

Prendre en compte les contraintes de place en terminus, ce qui conduit de nombreux concepteurs à différencier le battement de la rame du battement de l'agent.

- **Graphique du véhicule**

Construire le graphique du véhicule en intégrant des temps minimum (mais optimaux) en terminus pour les véhicules. Ces temps doivent garantir la régularité des départs, en se concentrant sur la Marche des Voitures.

- **Temps de repos pour les agents**

Assurer que les agents disposent d'un temps de repos suffisant pour des raisons sociales et physiologiques.

Nombre approximatif d'agents nécessaire à l'offre, graphiquage et particularité des CdT vont orienter le concepteur vers la typologie des services à mettre en place :

- ✓ Service direct (matin, après-midi, nuit)
- ✓ Service en 2 fois (amplitude, type bureau)

- **Indicateurs statistiques**

Diverses statistiques offrent un aperçu rapide de la qualité du travail du COT sur le plan économique et de la productivité. Permettent d'analyser et chiffrer le coût de la demande. Revêtent un caractère primordial aux yeux de toute Autorité Organisatrice.

II.5.4 Facteurs à prendre en compte pour un habillage efficace.

Disponibilité des ressources : La disponibilité des conducteurs et des véhicules est essentielle pour un habillage efficace. Il faut s'assurer qu'il y a suffisamment de conducteurs disponibles pour couvrir tous les services planifiés. De plus, les véhicules doivent être en bon état de fonctionnement et disponibles au bon moment pour éviter les interruptions de service.

Contraintes légales et réglementaires : Les contraintes légales et réglementaires doivent être strictement respectées. Cela inclut les limites sur le nombre d'heures de conduite continues, les

CHAPITRE II : Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains

périodes de repos obligatoires entre les services, et les régulations spécifiques au transport public. Le non-respect de ces contraintes peut entraîner des sanctions légales et des risques pour la sécurité.

Préférences des employés : Prendre en compte les préférences de travail des conducteurs peut améliorer leur satisfaction et leur motivation. Cela inclut les préférences en termes d'horaires, de jours de repos, et de types de services (par exemple, services de nuit ou de jour). Une meilleure satisfaction des employés peut conduire à une réduction du taux d'absentéisme et à une amélioration générale de la qualité du service.

Les conducteurs réservent : Il est important de prévoir des conducteurs et des véhicules de réserve pour pouvoir répondre rapidement à imprévus et minimiser les perturbations du service.

II.6 Roulement

Les services-conducteurs sont ensuite placés dans des roulements, formant des semaines-types pour les conducteurs, avec pour contraintes de respecter les temps de travail, les repos journaliers et le nombre maximal de jours de travail consécutifs.

Les roulements peuvent tenir compte des préférences des conducteurs (typologies de services, rythme de l'alternance travail / repos...).¹⁵

Le tableau de roulement est la répartition cyclique de services conducteurs et de jours de repos, fixant l'emploi du temps des agents dans une période calendaire déterminée, dans le but d'affecter un nombre variable de services à un nombre constant d'agents au cours de différentes périodes de l'année¹⁶.

II.6.1 Les objectifs de roulement

- Assurer que chaque conducteur a des opportunités égales de travailler autant que les autres.
- Suivre les réglementations du travail et les accords collectifs en matière de durée de travail, report...etc.

¹⁵ - <https://www.transbus.org/dokssiers/etudesmethodes.html>

¹⁶ - **Andrés Sanchez**, *Les enjeux et les impacts d'un changement de production dans une exploitation de transport urbaine et interurbains*, *ibid* p59.

CHAPITRE II : Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains

- Garantir que les conducteurs bénéficient de périodes de repos adéquates pour prévenir la fatigue et maintenir un niveau de sécurité optimal.

II.6.2 Les étapes de roulement

Rappelons qu'au terme des deux phases précédentes, par la fusion du Graphicage et de l'Habillage, on obtient le tableau de marche.

A partir des nombre de services requis par les différents habillages d'une même semaine on élabore le tableau de roulement : il consiste à se répète ensuite par glissement dans toute la période de validité du tableau, les jours de repos et les périodes de travail de manière à équilibrer au mieux les services des agents les uns par rapport aux autres et chacun pris individuellement.

Enfin, la numérotation des services est effectuée. Elle revient, à partir des résultats de l'habillage, d'une part, à construire des suites de services réalisables la même semaine par un même agent ou conducteur (avec un repos suffisant entre deux journées consécutives), d'autre part à établir des séquences de semaines respectant les contraintes imposées par le roulement et répartissant au mieux les services pénibles

II.6.3 Les contraintes opérationnelles et des règles de travail des conducteurs

- heures de travail maximal (limites sur le nombre d'heures qu'un conducteur peut travailler par jour et par semaine) ;
- périodes obligatoires de repos entre les services pour éviter la fatigue ;
- jours fériés et fêtes légales ;
- congé légal annuel ;
- repos compensateur de remplacement ;
- nombre de travaille par année de chaque conducteur ;
- nombre de repos par année de chaque conducteur.

II.7 Logiciels d'exploitation

De nombreux logiciels informatiques existent pour les métiers de l'exploitation. Ils comportent des modules pour graphiquer, habiller, concevoir le roulement.¹⁷

Logiciel	Graphicage	Habillage	Roulement
abcCar	Non	Oui	Oui
GIRO Hastus	Oui	Oui,avec algorithmes	Oui
heurès	Oui	Oui	Oui
Micadot	Oui	Oui	Non
Perinfo Gescar	Oui,avec algorithme heurisis	Oui	Oui
SNO ordicars Elite	Non	Non	Oui
Optibus	Oui	Oui avec algorithmes	En cours de dév
Trapèze	Oui	Oui	Oui

Tableau .2: logiciels d'exploitation des transports urbain existants

- **AbcCar** est une suite modulaire qui constitue la base de données unique d'une entreprise de transport de personnes.¹⁸
- **HASTUS** est notre logiciel performant et modulaire pour la gestion et l'optimisation des bus, métro, tram et rail qui est utilisé par des autorités et des opérateurs à travers le monde.¹⁹
- **Heurès** est l'outil idéal adapté aux petits, moyens et grands réseaux de transport régulier en France et à l'international pour la modélisation réseau de transport, l'optimisation des plannings des conducteurs, la gestion des ressources humaines et matérielles

¹⁷ - https://www.transbus.org/dossiers/etudsmethodes.html#google_vignette

¹⁸ - <https://www.abc-informatique.com/>

¹⁹ - <https://www.giro.ca/fr-fr/nos-solutions/logiciel-hastus/>

CHAPITRE II : Méthodologies de Recherche Opérationnelle au Service des Transports Urbains

- **Micadot** représente l'état de l'art actuel en matière d'expérience métier et technique pour la construction d'offre de production Bus et Tramway.²⁰

Grâce à ses éditeurs et ses algorithmes très puissants, Micadot est capable de générer des offres de production (graphiques, habillages) à une cadence inédite (moins d'une heure dans la majorité des cas) et permet des échanges rapides avec l'autorité organisatrice ou avec les instances sociales.

- **Perinfo** C'est un outil puissant de modélisation du réseau, associé à un moteur d'optimisation.

Il vous permet de réduire les temps de trajet pour les usagers du réseau, de faciliter le transport multimodal et d'ajuster les horaires de passage aux besoins spécifiques de la population.²¹

- **Ordicars** propose des outils qui permettent également le suivi de l'activité des conducteurs et des véhicules, des outils d'aide à la décision (contrôle des infractions).

Le module exploitation est interfacé avec d'autres outils métiers : imports des données Chronotachygraphes, import des données d'Hastus, outils SAEIV etc.²²

- **Optibus** Un logiciel de gestion des transports de bout en bout pour des services de transport plus équitables, durables et efficaces pour les agences, les opérateurs, les villes, les conducteurs et les passagers.²³

²⁰ - http://www.micadot.com/produits_graphicage.html

²¹ - <https://www.perinfo.eu/>

²² - <https://www.ordicars.fr/>

²³ - <https://www.optibus.com/>

II.8 Conclusion

La construction de l'horaire maître, le graphicage, l'habillage et le roulement sont des processus essentiels pour la planification et l'optimisation des services de transport en commun. L'utilisation efficace de ces outils permet aux entreprises de transport d'améliorer la qualité de leur service et de répondre aux besoins des usagers. Ainsi, une maîtrise approfondie de ces techniques est cruciale pour garantir un réseau de transport fiable, ponctuel et bien coordonné, contribuant ainsi à la satisfaction des usagers et à l'efficacité opérationnelle.

CHAPITRE III :

METHODOLOGIE

Chapitre III : METHODOLOGIE

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail la méthodologie utilisée pour résoudre le problème complexe de la planification des conducteurs de TRAMWAY d'ALGER sur une année entière. Ce problème de planification implique non seulement l'assignation quotidienne des conducteurs aux services requis, mais aussi la gestion de leur formation et de leurs congés, tout en respectant des contraintes strictes pour assurer une couverture optimale des services et le bien-être des conducteurs.

Afin de rendre ce problème plus gérable, nous avons adopté une approche de décomposition en deux étapes : un problème maître et un sous-problème. Le problème maître se concentre sur la planification annuelle globale, en déterminant les jours de présence, de formation et de congé pour chaque conducteur. Le sous-problème, quant à lui, s'occupe de l'affectation quotidienne des conducteurs présents aux différents services, en veillant à ce que les exigences de chaque jour soient satisfaites.

Dans ce chapitre, nous décrirons les paramètres, les variables, les fonctions objectifs et les contraintes de chaque problème.

Cette approche méthodique nous permettra de gérer efficacement la complexité inhérente à la planification des conducteurs de TAMWAY d'ALGER et d'assurer une solution optimisée qui respecte toutes les contraintes imposées, garantissant ainsi la fiabilité des services et la satisfaction des conducteurs.

III.2 Description du problème

Le problème de planification des conducteurs de TRAMWAY d'ALGER sur une année présente plusieurs facettes complexes. Chaque conducteur doit être assigné à une des activités possibles chaque jour : être présent au travail, suivre une formation, prendre un congé, être en réserve, ou être en repos. La présence de conducteurs doit répondre aux besoins quotidiens de service, tandis que les périodes de formation et de congé doivent respecter des quotas annuels prédéfinis pour chaque conducteur.

Un autre aspect crucial est la gestion des conducteurs en réserve, qui doit maintenir un nombre suffisant de conducteurs disponibles pour pallier les absences imprévues ou les fluctuations de la demande de service. De plus, des contraintes strictes doivent être respectées pour éviter des

jours consécutifs de travail ou de repos excessifs, ce qui pourrait nuire à l'efficacité opérationnelle ou au bien-être des conducteurs.

Les principaux objectifs du problème sont donc :

- Assurer une couverture adéquate des services quotidiens : Il doit y avoir un nombre suffisant de conducteurs présents chaque jour pour répondre aux besoins de service.
- Gérer efficacement les formations et les congés : Chaque conducteur doit suivre un certain nombre de jours de formation et prendre un nombre fixe de jours de congé par an.
- Maintenir une réserve de conducteurs : Assurer qu'il y ait toujours entre 9 et 12 conducteurs en réserve chaque jour.
- Respecter les contraintes de jours consécutifs : Limiter le nombre de jours consécutifs de travail et de repos pour chaque conducteur.

La résolution de ce problème implique de trouver une solution qui équilibre ces divers objectifs et contraintes, garantissant ainsi une planification optimale des ressources humaines pour le bon fonctionnement des services de TRAMWAY d'ALGER tout au long de l'année.

III.2.1 Décomposition du problème

Pour simplifier la résolution, le problème est décomposé en un problème maître et un sous-problème :

III.2.1.1 Problème maître

Le problème maître est responsable de la planification annuelle globale. Il détermine les jours où chaque conducteur est présent, en formation, en congé ou en repos. Ce niveau de planification doit s'assurer que les conducteurs sont disponibles en nombre suffisant chaque jour, tout en respectant tous les contraintes.

III.2.1.2 Sous-problème

Le sous-problème se concentre sur l'affectation quotidienne des conducteurs présents aux différents services nécessaires chaque jour. L'objectif est d'assigner chaque conducteur à un service spécifique ou à la réserve, en s'assurant que tous les services requis sont couverts et que le nombre de conducteurs en réserve est respecté.

III.2.1.3 Cohérence entre le Problème Maître et le Sous-Problème

Le problème maître détermine les jours où chaque conducteur est présent, en formation ou en congé ou en repos tout au long de l'année. Les résultats du problème maître sont utilisés comme paramètres pour le sous-problème, qui assigne les conducteurs présents aux services spécifiques ou à la réserve chaque jour. Cette approche en deux étapes garantit que la solution globale respecte toutes les contraintes à long terme tout en optimisant l'affectation quotidienne des conducteurs.

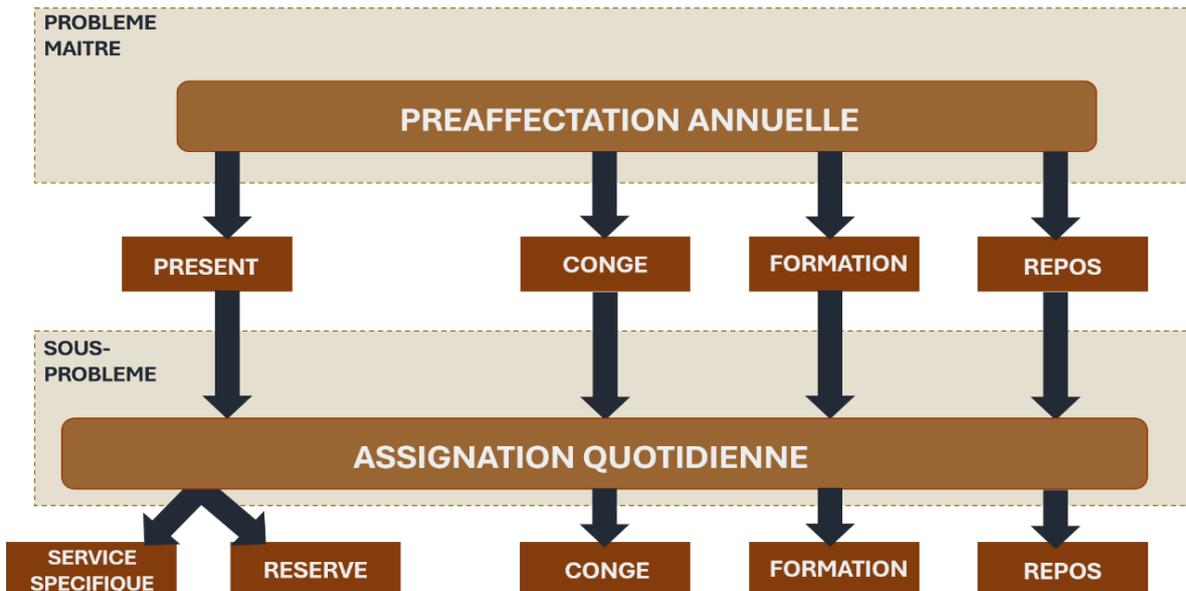


Figure .5: Décomposition du Problème de Planification des Conducteurs (réalisé par l'étudiant)

III.3 Modélisation du problème

III.3.1 Problème maître

III.3.1.1 Ensembles

$I = \{1, \dots, m\}$: ensemble des conducteurs

$J = \{1, \dots, n\}$: ensemble des jours

III.3.1.2 Paramètre

n : nombre de jours dans l'année

m : nombre de conducteurs

R : nombre de jours de repos total pour chaque conducteur

s_j : Nombre de service nécessaire le jour j

III.3.1.3 Variables de décision

$x_{i,j}$: Variable binaire qui représente la présence du conducteur

$$x_{i,j} = 1 \quad \text{si le conducteur } i \text{ est présent le jour } j \text{ (} j \in J, i \in I \text{)}$$

$$x_{i,j} = 0 \quad \text{sinon (} j \in J, i \in I \text{)}$$

$f_{i,j}$: Variable binaire qui représente si le conducteur est en formation

$$f_{i,j} = 1 \quad \text{si le conducteur } i \text{ est en formation le jour } j \text{ (} j \in J, i \in I \text{)}$$

$$f_{i,j} = 0 \quad \text{sinon (} j \in J, i \in I \text{)}$$

$c_{i,j}$: Variable binaire qui représente si le conducteur est en congé

$$c_{i,j} = 1 \quad \text{si le conducteur } i \text{ est en congé le jour } j \text{ (} j \in J, i \in I \text{)}$$

$$c_{i,j} = 0 \quad \text{sinon (} j \in J, i \in I \text{)}$$

r_j : Variable entière représente le nombre de conducteurs en réserve le jour j

$$9 \leq r_j \leq 12 \text{ (} j \in J \text{)}$$

$\alpha_{i,j}$: Variable binaire auxiliaire (elle est introduite pour aider à modéliser des contraintes complexes) ($j \in J, i \in I$)

III.3.1.4 Fonction objective

Nous avons choisi une fonction objective triviale (**Minimiser 0**) étant donné que, à cette étape, la priorité est donnée à la satisfaction des contraintes pour l'établissement d'une pré-affectation annuelle :

III.3.1.5 Contraintes

Contrainte 1 : couverture des services

$$\sum_{i=1}^m x_{i,j} \geq s_j \quad \forall j \in J$$

Cette contrainte assure que le nombre de conducteurs affectés à chaque jour j doit être au moins égale au nombre de services requis s_j

Contrainte 2 : Calcul de la réserve

$$r_j = \sum_{i=1}^m (x_{i,j} - s_j) \quad \forall j \in J$$

Cette contrainte calcule le nombre de conducteurs en réserve le jour j

Contrainte 3 : plafond annuel des jours de travail, de formation et de congé

$$\sum_{j=1}^n (x_{i,j} + f_{i,j} + c_{i,j}) \leq 366 - R \quad \forall i \in I$$

CHAPITRE III : METHODOLOGIE

Cette contrainte limite la somme totale des jours de présence $x_{i,j}$, de formation $f_{i,j}$ et de congé $c_{i,j}$ pour chaque conducteur i à 366 jours de l'année moins le nombre total de jours de repos

Contrainte 4 : Nombre de jours de formation

$$\sum_{j=1}^n f_{i,j} = 3 \quad \forall i \in I$$

Chaque conducteur doit avoir exactement 3 jours de formation chaque année

Contrainte 5 : Nombre de jours de congé

$$\sum_{j=1}^n c_{i,j} = 22 \quad \forall i \in I$$

Chaque conducteur doit avoir exactement 22 jours de congé chaque année

Contrainte 6 : Non conflit entre travail et formation

$$f_{i,j} \leq 1 - x_{i,j} \quad \forall j \in J \quad \forall i \in I$$

Un conducteur ne peut pas être en formation et en travail le même jour

Contrainte 7 : Non conflit entre travail et congé

$$c_{i,j} \leq 1 - x_{i,j} \quad \forall j \in J \quad \forall i \in I$$

Un conducteur ne peut pas être en congé et en travail le même jour

Contrainte 8 : Non conflit entre formation et congé

$$f_{i,j} + c_{i,j} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad \forall i \in I$$

Un conducteur ne peut pas être en congé et en formation le même jour

Contrainte 9 : nombre fixe de jours de travail par an

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} = 213 \quad \forall i \in I$$

Chaque conducteur doit travailler exactement 213 jours par an

Contrainte 10 : limite sur les jours de travail consécutifs

$$\sum_{k=0}^5 x_{i,j+k} \leq 5 \quad \forall i \in I \quad \forall j \in \{1, \dots, n-5\}$$

Un conducteur ne peut pas travailler plus de 5 jours consécutifs

Contrainte 11 : limite sur les jours de repos consécutifs

$$\sum_{k=0}^3 (1 - x_{i,j+k}) \leq 3 \quad \forall i \in I \quad \forall j \in \{1, \dots, n-3\}$$

Un conducteur doit avoir au moins un jour de travail parmi 4 jours consécutifs

Contrainte 12 : Assurance de repos après 5 jours de travail

$$(1 - x_{i,j+5}) + (1 - x_{i,j+6}) \geq 2 * \alpha_{i,j} \quad \forall i \in I \quad \forall j \in \{1 \dots n-6\}$$

CHAPITRE III : METHODOLOGIE

Cette contrainte assure que si un conducteur travaille 5 jours consécutifs, il aura au moins 2 jours de repos après

Contrainte 13

$$5 * \alpha_{i,j} \leq \sum_{k=0}^4 x_{i,j+k} \quad \forall i \in I \quad \forall j \in \{1 \dots n-6\}$$

Contrainte 14

$$\sum_{k=0}^4 x_{i,j+k} \leq 5 * \alpha_{i,j} + 4 * (1 - \alpha_{i,j}) \quad \forall i \in I \quad \forall j \in \{1 \dots n-6\}$$

✓ Explication des Contraintes 12, 13 et 14 :

Soit :

$$A = \sum_{k=0}^4 x_{i,j+k}$$

$$B = 1 - x_{i,j+5}$$

$$C = 1 - x_{i,j+6}$$

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } A = 5 \text{ (si le conducteur a travaillé 5 jours consécutifs)} \\ 0 & \text{si } A < 5 \text{ (sinon)} \end{cases}$$

A représente le nombre de jours de travail consécutifs pour le conducteur i sur les 5 jours avant j+5

B et C représentent les jours de repos pour les jours (j+5) et (j+6), respectivement. Ces variables sont binaires, donc $0 \leq B + C \leq 2$

- Démonstration :

D'une part,

Si un conducteur a travaillé 5 jours consécutifs, il doit prendre au moins 2 jours de repos, c'est-à-dire :

- Si $A = 5$ alors $\alpha_{i,j} = 1$ et $B + C = 2$

- Si $A < 5$ alors $\alpha_{i,j} = 0$ et $0 \leq B + C \leq 2$

Cela implique :

$$B + C \geq 2 * \alpha_{i,j}$$

En termes de $x_{i,j}$:

$$(1 - x_{i,j+5}) + (1 - x_{i,j+6}) \geq 2 * \alpha_{i,j}$$

Ce qui donne la contrainte 12

D'autre part,

On sait que $0 \leq A \leq 5$. Pour garantir cela, nous devons ajuster les bornes de A en fonction de $\alpha_{i,j}$

- Pour $\alpha_{i,j} = 1$:

Si $\alpha_{i,j} = 1$ alors $A = 5$ donc : $5 \leq A \leq 5$

Cela implique :

$$5 * \alpha_{i,j} \leq A \leq 5 * \alpha_{i,j}$$

- Pour $\alpha_{i,j} = 0$:

Si $\alpha_{i,j} = 0$ alors $A < 5$ donc : $0 \leq A \leq 4$

Pour garantir cela, nous ajoutons $4 * (1 - \alpha_{i,j})$ à la borne supérieure de A, ce qui donne :

$$5 * \alpha_{i,j} \leq A \leq 5 * \alpha_{i,j} + 4 * (1 - \alpha_{i,j})$$

En termes de $x_{i,j}$:

$$5 * \alpha_{i,j} \leq \sum_{k=0}^4 x_{i,j+k} \leq 5 * \alpha_{i,j} + 4 * (1 - \alpha_{i,j})$$

En découpant cette inégalité, nous obtenons les contraintes 13 et 14 :

- Contrainte 13 : $5 * \alpha_{i,j} \leq \sum_{k=0}^4 x_{i,j+k}$

- Contrainte 14 : $\sum_{k=0}^4 x_{i,j+k} \leq 5 * \alpha_{i,j} + 4 * (1 - \alpha_{i,j})$

Ces contraintes assurent un équilibre entre les jours de travail et les jours de repos, garantissant que les conducteurs ne travaillent pas plus de 5 jours consécutifs sans avoir au moins 2 jours de repos, tout en ajustant la somme des jours de travail consécutifs en fonction de l'indicateur $\alpha_{i,j}$

III.3.2 Sous-problème

III.3.2.1 Paramètre

I = {1, ..., m} : ensemble des conducteurs

J = {1, ..., n} : ensemble des jours

S = {1, ..., h_j } : ensemble des services le jour j ; $\forall j \in J$

n : Nombre de jours dans l'année.

m : Nombre de conducteurs.

h_j : Nombre de services le jour j

$x_{i,j}$: Présence des conducteurs (donnée par le problème maître).

$f_{i,j}$: Formation des conducteurs (donnée par le problème maître).

$c_{i,j}$: Congé des conducteurs (donnée par le problème maître).

r_j : Réserve le jour j (donnée par le problème maître).

III.3.2.2 Ensembles

$I = \{1, \dots, m\}$: ensemble des conducteurs

$J = \{1, \dots, n\}$: ensemble des jours

$S = \{1, \dots, h_j\}$: ensemble des services le jour j ; $\forall j \in J$

III.3.2.3 Variables

$y_{i,j,l}$: Variable binaire qui représente l'affectation du conducteur i à un service l

$y_{i,j,l} = 1$ si le conducteur i est assigné au service l le jour j ($j \in J, i \in I, l \in S(j)$)

$y_{i,j,l} = 0$ sinon ($j \in J, i \in I, l \in S(j)$)

III.3.2.4 Fonction objective

Nous considérons une fonction objectif triviale afin de nous concentrer sur la satisfaction des contraintes.

III.3.2.5 Contraintes

Contrainte 1 : couverture des services

$$\sum_{i=1}^m y_{i,j,l} = 1 \quad \forall j \in J \quad \forall l \in S(j)$$

Chaque service doit être couvert par exactement un conducteur

Contrainte 2 : Nombre de Conducteurs en Réserve

$$\sum_{i=1}^m y_{i,j,0} = r_j \quad \forall j \in J$$

Le nombre de conducteurs en réserve le jour j doit être égal à la réserve préétablie

Contrainte 3 : Correspondance des variables avec le problème maître

$$\sum_{l \in S(j) \cup \{0\}} y_{i,j,l} = x_{i,j} \quad \forall j \in J \quad \forall i \in I$$

Chaque conducteur doit être affecté à un service ou à la réserve s'il est présent ce jour-là

III.4 Conclusion

Ce chapitre a détaillé la méthodologie utilisée pour aborder le problème complexe de la planification des conducteurs de tramway d'Alger sur une année. En décomposant le problème en un problème maître et un sous-problème, nous avons pu simplifier et structurer la résolution de manière efficace. Le problème maître se concentre sur la planification annuelle des jours de travail, de formation, de congé et de repos pour chaque conducteur, tandis que le sous-problème s'attache à l'affectation quotidienne des conducteurs présents aux différents services requis chaque jour.

CHAPITRE III : METHODOLOGIE

Nous avons défini les paramètres, variables et contraintes pour chaque problème, assurant ainsi une couverture optimale des services et respectant les contraintes liées aux jours consécutifs de travail et de repos. Cette approche méthodique garantit une solution optimisée qui respecte toutes les contraintes imposées, assurant la fiabilité des services et la satisfaction des conducteurs.

CHAPITRE IV : Implémentation et résultats

Chapitre IV : Implémentation et résultats

IV.1 Introduction

Ce chapitre décrit l'implémentation pratique et les résultats de notre modèle de planification des roulements de travail pour les conducteurs de SETRAM. Nous couvrons le processus complet, de la conception du modèle théorique à l'obtention des résultats, en passant par le choix des outils de résolution, la préparation des données, et l'exécution sur une plateforme de calcul performante.

Nous présentons d'abord les outils de résolution, le serveur NEOS et le solveur Gurobi, en expliquant les raisons de ces choix et leurs avantages. Le serveur NEOS offre une infrastructure puissante pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes, tandis que Gurobi est reconnu pour ses performances exceptionnelles et sa capacité à gérer des modèles de grande taille avec efficacité.

Ensuite, nous détaillons les étapes de préparation des données, une phase cruciale pour assurer l'exactitude et la pertinence des entrées utilisées dans nos modèles. Une préparation rigoureuse des données garantit des résultats fiables et pertinents pour les besoins de SETRAM. Nous décrivons également les stratégies mises en place pour améliorer la performance de la résolution, telles que l'ajustement des paramètres et l'optimisation des contraintes.

Nous utilisons AMPL (A Mathematical Programming Language) pour modéliser et résoudre ces problèmes. AMPL est spécialement conçu pour les problèmes d'optimisation et s'intègre parfaitement avec des solveurs comme Gurobi.

Nous introduisons notre modèle sur la plateforme NEOS, en présentant les codes AMPL pour le problème maître et le sous-problème, illustrant concrètement la modélisation et la résolution de ces problèmes. Les résultats du problème maître sont utilisés comme paramètres pour le sous-problème, assurant une cohérence et une intégration fluide entre les deux niveaux de planification.

Enfin, nous analysons les résultats obtenus, en mettant en évidence la couverture des services, le respect des contraintes de formation et de congé, ainsi que la gestion des réserves de conducteurs. Nous discutons également des implications de ces résultats pour la gestion

opérationnelle de SETRAM et proposons des améliorations potentielles pour optimiser encore davantage la planification des roulements de travail.

IV.2 Vue d'ensemble de l'implémentation

Dans cette section, nous détaillerons les aspects pratiques de l'implémentation de notre modèle, en commençant par le choix des outils de résolution, puis en passant par la préparation des données et les stratégies d'amélioration des performances.

IV.2.1 Choix de l'outil de résolution

Pour la résolution de nos problèmes d'optimisation, nous avons opté pour le serveur NEOS et le solveur Gurobi, deux outils puissants et complémentaires qui répondent aux exigences de notre projet.

IV.2.1.1 Serveur NEOS

Le **serveur NEOS** (Network-Enabled Optimization System) est une plateforme en ligne qui offre un accès gratuit à une vaste gamme de solveurs d'optimisation. Développé et maintenu par l'Université de Wisconsin-Madison, NEOS est conçu pour simplifier le processus de résolution des problèmes d'optimisation en fournissant une interface conviviale et une infrastructure de calcul puissante.

➤ Avantages du serveur NEOS

- **Accessibilité** : NEOS est accessible via une interface web, ce qui permet aux utilisateurs de soumettre leurs modèles AMPL sans nécessiter d'installation locale de solveurs. Cette accessibilité facilite grandement l'utilisation pour les utilisateurs disposant de ressources informatiques limitées.
- **Puissance de calcul** : En utilisant NEOS, les utilisateurs peuvent tirer parti des ressources de calcul puissantes disponibles sur la plateforme. Cela est particulièrement utile pour traiter des modèles complexes et de grande taille, qui nécessiteraient autrement une infrastructure informatique coûteuse.
- **Diversité des solveurs** : NEOS offre un accès à plusieurs solveurs d'optimisation, dont Gurobi, CPLEX, et Ipopt, permettant ainsi aux utilisateurs de choisir le solveur le mieux adapté à leurs besoins spécifiques. Cette flexibilité permet de comparer les performances de différents solveurs et de sélectionner le plus efficace pour un problème donné.

- **Facilité d'utilisation** : La soumission de problèmes sur NEOS est simple et directe. Les utilisateurs peuvent soumettre leurs fichiers de modèle et de données AMPL via l'interface web, et recevoir les résultats par email ou directement sur la plateforme.

➤ **Inconvénients du serveur NEOS**

- **Limitation d'intégration** : Il n'est pas possible de lier un programme Python directement avec NEOS, ce qui peut limiter les possibilités d'automatisation et d'intégration avec des workflows existants basés sur Python.

IV.2.1.2 Solveur Gurobi

Le **solveur Gurobi** est l'un des solveurs d'optimisation les plus performants et les plus largement utilisés dans le monde. Il est spécialement conçu pour résoudre des problèmes de programmation linéaire (LP), de programmation linéaire en nombres entiers (MILP), et de programmation quadratique (QP).

➤ **Avantages de Gurobi**

- **Performance exceptionnelle** : Gurobi est reconnu pour sa rapidité et son efficacité à résoudre des problèmes complexes. Il utilise des algorithmes de pointe et des techniques avancées pour offrir des temps de résolution rapides, même pour les modèles de grande taille.
- **Robustesse et fiabilité** : Gurobi est conçu pour être robuste et fiable, capable de traiter des problèmes difficiles avec une grande précision. Cette fiabilité est cruciale pour garantir que les solutions obtenues sont optimales et applicables dans un contexte réel.
- **Interface utilisateur intuitive** : Gurobi offre une interface utilisateur intuitive, ainsi qu'une documentation complète et des exemples pratiques. Cela facilite l'apprentissage et l'utilisation du solveur pour les nouveaux utilisateurs, tout en offrant des fonctionnalités avancées pour les utilisateurs expérimentés.
- **Flexibilité** : Gurobi est compatible avec plusieurs langages de modélisation, dont AMPL, ce qui permet une intégration fluide avec notre modèle de planification. De plus, il offre des API dans plusieurs langages de programmation (Python, C++, Java), permettant une flexibilité d'intégration dans divers environnements de développement.
- **Support technique** : Gurobi offre un excellent support technique et une communauté active d'utilisateurs. En cas de problèmes ou de questions, les utilisateurs peuvent bénéficier d'une assistance rapide et efficace.

➤ Inconvénients de Gurobi

- **Obtention de licence académique** : Il n'est pas aisé d'obtenir une licence académique. Il est nécessaire que l'IP de notre institution fasse partie de leur base de données, ce qui peut compliquer l'accès pour certains utilisateurs.

En combinant le serveur NEOS et le solveur Gurobi, nous avons pu exploiter le meilleur des deux mondes : l'accessibilité et la puissance de calcul de NEOS, et les performances exceptionnelles de Gurobi. Cette combinaison nous a permis de résoudre efficacement nos problèmes d'optimisation de planification des roulements de travail pour les conducteurs de SETRAM, en assurant des solutions optimales et applicables dans un environnement opérationnel complexe.

IV.2.2 Préparation des données

La préparation des données est une étape cruciale pour garantir la validité et la pertinence de notre modèle de planification des roulements de travail pour les conducteurs de SETRAM. Un modèle basé sur des données précises et bien structurées permet d'assurer des solutions optimales et réalistes.

IV.2.2.1 Collecte des données

Nous avons obtenu des informations essentielles provenant de l'entreprise, principalement à partir du tableau de Prévision de l'Exploitation (PEX). Le PEX nous fournit :

- **Horaires applicables pour chaque jour de l'année** : Identifiant quels Tableau de Marche (TM) utiliser pour chaque jour spécifique. Nous avons reçu les horaires pour 10 TMs distincts :
 1. Scolaire Vendredi (Ven-JF)
 2. Scolaire Samedi (Samedi)
 3. Scolaire Dimanche à Jeudi (DàJ)
 4. Été Samedi à Jeudi (Été SàJ)
 5. Été Vendredi (Été Ven)
 6. Ramadan1 Samedi à Jeudi (RAM1 SàJ)
 7. Ramadan1 Vendredi (RAM1 Ven)
 8. Ramadan2 Samedi à Jeudi (RAM2 SàJ)
 9. Ramadan2 Vendredi (RAM2 Ven)

CHAPITRE IV : Implémentation et résultats

10. Aïd

- **Nombre de services nécessaires chaque jour** : Information clé pour définir le paramètre s_j (nombre de service requis pour le jour j).
- **Nombre de conducteurs et jours spécifiques** : Total de conducteurs, nombre de jours dans l'année et le nombre de jours de repos, de congé et de formation durant l'année.
- **Contraintes de l'entreprise** : Après nos observations pendant la période de stage et les informations qu'ils nous ont fournies, nous avons pu construire les différentes contraintes de notre problème.

IV.2.2.2 Traitement des données

- **Nettoyage des données** : Nous avons vérifié et corrigé les données collectées pour assurer leur qualité.
- **Formatage des données** : Les données issues du PEX ont été manuellement transformées en paramètres utilisables dans notre modèle AMPL. Nous avons directement intégré ces paramètres dans notre code AMPL pour s'assurer qu'ils soient adaptés aux besoins du solveur.

En suivant ces étapes rigoureuses de préparation des données, nous avons pu garantir que notre modèle de planification des roulements de travail repose sur des données fiables et pertinentes. Cela permet d'obtenir des résultats optimaux et opérationnellement viables.

	A	C	F	G	H	I	J	K
1			APPLIQUE					
2			TYPE TM	Services				
3	Lundi	01-janv	samedi	69				
4	Mardi	02-janv	DàJ	76		Données à actualiser	BASE 2024	
5	Mercredi	03-janv	DàJ	76		Nbr de jour An	366	
6	Jeudi	04-janv	DàJ	76		REPOS	112	
7	Vendredi	05-janv	Ven-JF	45		FERIES	14	
8	Samedi	06-janv	Samedi	69		CA	22	
9	Dimanche	07-janv	DàJ	76		MALADIE	16	
10	Lundi	08-janv	DàJ	76		FORMATION	3	
11	Mardi	09-janv	DàJ	76		JT ANNUEL	199	
12	Mercredi	10-janv	DàJ	76		Nbr de conducteurs	137	
13	Jeudi	11-janv	DàJ	76				
14	Vendredi	12-janv	Ven-JF	45				
15	Samedi	13-janv	Samedi	69				
16	Dimanche	14-janv	DàJ	76				
17	Lundi	15-janv	DàJ	76				
18	Mardi	16-janv	DàJ	76				
19	Mercredi	17-janv	DàJ	76				
20	Jeudi	18-janv	DàJ	76				
21	Vendredi	19-janv	Ven-JF	45				
22	Samedi	20-janv	Samedi	69				
23	Dimanche	21-janv	DàJ	76				

Figure.6 : Extrait du tableau PEX

Source : document de l'entreprise

IV.2.3 Stratégies pour améliorer la performance de la résolution

Pour améliorer la performance de la résolution, nous avons adopté plusieurs stratégies :

- Décomposition du problème : En décomposant le problème global en un problème maître et un sous-problème, nous avons réduit la complexité de chaque partie. Le problème maître gère la planification annuelle, tandis que le sous-problème se concentre sur l'affectation quotidienne des conducteurs.
- Utilisation de paramètres ajustables : Nous avons utilisé des paramètres ajustables pour affiner les solutions et réduire le temps de calcul.

IV.3 Introduction du modèle sur NEOS

Dans cette section, nous présentons la mise en œuvre de notre modèle de planification sur la plateforme NEOS. Le serveur NEOS permet d'accéder à des ressources de calcul puissantes pour résoudre nos problèmes d'optimisation en utilisant le langage AMPL. Nous détaillerons les étapes de soumission de nos modèles au serveur NEOS et présenterons les codes AMPL développés pour le problème maître et le sous-problème. Cette approche nous permet d'exploiter pleinement les capacités du solveur Gurobi, optimisant ainsi l'affectation des conducteurs et garantissant le respect de toutes les contraintes définies.

CHAPITRE IV : Implémentation et résultats

IV.3.1 Soumission du modèle sur NEOS

Pour soumettre notre modèle sur NEOS, nous devons suivre plusieurs étapes, incluant la préparation des fichiers AMPL, et l'utilisation de l'interface web de NEOS pour soumettre et suivre les résultats.

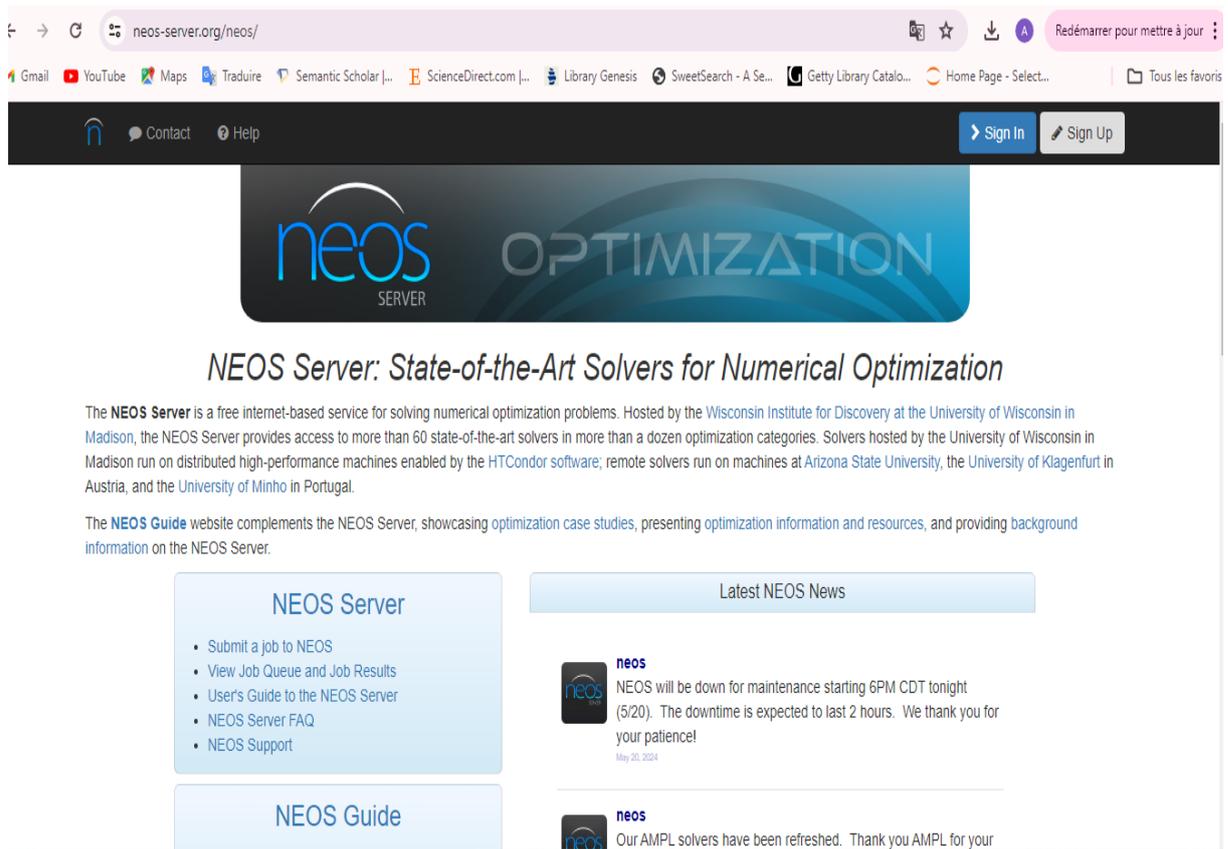


Figure. 7: page d'accueil de NEOS

IV.3.2 Code AMPL pour le problème maître

Présentons le code AMPL utilisé pour formuler le problème maître. Ce code définit les paramètres, les variables, les contraintes, et la fonction objectif de notre modèle de planification annuelle.

Introduction du modèle dans un fichier .mod :

✓ définition des paramètres, ensembles et variables

```
1 param n ;
2 param m ;
3 param R;
4 set I := 1..m ;
5 set J := 1..n ;
6 param s{j in J};
7 var x{i in I, j in J}, binary;
8 var f{i in I, j in J}, binary;
9 var c{i in I, j in J}, binary;
10 var r{j in J}, >= 9, <= 12;
11 var alpha{i in I, j in J}, binary;
```

Figure.8 : paramètres, ensembles et variables du problème maître

Telque :

n : Paramètre qui représente le nombre de jours dans l'année

m : Paramètre qui représente le nombre de conducteurs

R : Paramètre qui représente le nombre de jours de repos total pour chaque conducteur

s : Paramètre qui représente le nombre de service nécessaire le jour j

I : Ensemble des conducteurs

J : Ensemble des jours

x : Variable binaire qui représente la présence du conducteur

f : Variable binaire qui représente si le conducteur est en formation

c : Variable binaire qui représente si le conducteur est en congé

r : Variable entière représente le nombre de conducteurs en réserve le jour j

alpha : Variable binaire auxiliaire

✓ Définition des contraintes et fonction objectif

```

14 minimize obj: 0;
15
16 subject to c1 {j in J}: sum{i in I} x[i,j] >= s[j];
17 subject to c2 {j in J}: r[j] = sum{i in I} x[i,j] - s[j];
18 subject to c3 {i in I}: sum{j in J} (x[i,j] + f[i,j] + c[i,j]) <= 366 - R;
19 subject to c4 {i in I}: sum{j in J} f[i,j] = 3;
20 subject to c5 {i in I}: sum{j in J} c[i,j] = 22;
21 subject to c6 {i in I, j in J}: f[i,j] <= 1 - x[i,j];
22 subject to c7 {i in I, j in J}: c[i,j] <= 1 - x[i,j];
23 subject to c8 {i in I, j in J}: f[i,j] + c[i,j] <= 1;
24 subject to c9 {i in I}: sum{j in J} x[i,j] = 213;
25 subject to c10 {i in I, j in (J diff {362, 363, 364, 365, 366})}: sum{k in {0..5}} x[i, j+k] <= 5;
26 subject to c11 {i in I, j in (J diff {364, 365, 366})}: sum{k in {0..3}} (1-x[i, j+k]) <= 3;
27
28 subject to c12 {i in I, j in (J diff {361, 362, 363, 364, 365, 366})}: (1-x[i,j+5])+(1-x[i,j+6]) >= 2*alpha[i,j];
29 subject to c13 {i in I, j in (J diff {361, 362, 363, 364, 365, 366})}: 5*alpha[i,j] <= sum{k in {0..4}} x[i, j+k];
30 subject to c14 {i in I, j in (J diff {361, 362, 363, 364, 365, 366})}: sum{k in {0..4}} x[i, j+k] <= 5*alpha[i,j] + 4*(1-alpha[i,j]);
31

```

Figure.9: contraintes et fonction objectif du problème maître

Introduction des données des problèmes dans un fichier .Dat

```

1 data;
2 param n:= 366;
3 param m:= 137;
4 param s:= 1.69
5 2.76
6 3.76
7 4.76
8 5.45
9 .
10 .
11 .
12 .
13 362.45
14 363.69
15 364.76
16 365.76
17 366.76;
18 param R:=128;

```

Figure.10 : les données des problèmes maîtres

✓ Affichage des résultats

Pour afficher les résultats du problème maître, nous avons utilisé le code AMPL dans la photo ci-dessous. Ce code permet de générer et de visualiser les résultats de manière efficace et précise, conformément aux spécifications du modèle. Ce code AMPL permet d'assurer que toutes les données nécessaires sont correctement formatées et affichées, facilitant ainsi l'analyse et la compréhension des résultats obtenus. Les détails complets de chaque étape du processus et l'exécution du code sont visibles dans l'image fournie. Grâce à cette approche, nous avons pu obtenir une représentation claire et fidèle des résultats attendus.

```
403 solve;
404
405 printf "Préaffectation annuelle:\n";
406 for {i in I} {
407     for {j in J} {
408         printf "%s ", if x[i,j] then
409             "P."
410             else if f[i,j] then
411                 "F."
412             else if c[i,j] then
413                 "C."
414             else
415                 "R.";
416     }
417     printf "\n";
418 }
419 printf "Services \n";
420 for {j in J} {
421     printf "%d ", s[j];
422 }
423 printf "\nReserve\n";
424 for {j in J} {
425     printf "%d ", r[j];
426 }
427
428 printf "-----\n";
429 printf "PARAMETRES POUR LE SOUS-PROBLEME\n";
430 printf "-----\n";
431
432 printf "param x:";
433 for {j in J}{
434     printf "%d ", j;
435 }
436 printf " :=\n";
437 for {i in I} {
438     printf "%d ", i;
439     for {j in J} {
440         printf "%d ", x[i,j];
```

Figure .11: code AMPL utilisé pour afficher les résultats (problème maître)

```

441     →}
442     ... printf "\n";
443     }
444     printf ";\n";
445
446     printf "param f:";
447     for {j in J}{
448     →printf "%d ", j;
449     }
450     printf "=\n";
451     for {i in I}{
452     →printf "%d ", i;
453     ... for {j in J}{ → → →
454     ...|...|... printf "%d ", f[i,j];
455     →}
456     ... printf "\n";
457     }
458     printf ";\n";
459
460     printf "param c:";
461     for {j in J}{
462     →printf "%d ", j;
463     }
464     printf "=\n";
465     for {i in I}{
466     →printf "%d ", i;
467     ... for {j in J}{ → → →
468     ...|...|... printf "%d ", c[i,j];
469     →}
470     ... printf "\n";
471     }
472     printf ";\n";
473
474     printf "param r:";
475     for {j in J}{
476     →printf "%d %d\n", j, r[j];
477     }
478     printf ";";

```

Figure .12 : suite de code AMPL utilisé pour afficher les résultats (problème maître)

IV.3.3 Code AMPL pour le sous-problème

Voici le code AMPL pour formuler le sous-problème, qui se concentre sur l'affectation quotidienne des conducteurs présents.

Introduction du modèle dans un fichier .mod :

✓ Définition des paramètres, ensembles et variables

```
1 param n ;
2 param m ;
3 set I := 1..m ;
4 set J := 1..n ;
5 param h{j in J} ;
6 set S{j in J}, := {1..h[j]} ;
7 param s{j in J} ;
8 param x{i in I, j in J}, binary ;
9 param f{i in I, j in J}, binary ;
10 param c{i in I, j in J}, binary ;
11 param r{j in J}, >= 9, <= 12 ;
12
13 var y{i in I, j in J, l in (S[j]) union {0}}, binary ;
14
```

Figure .13 : paramètres, ensembles et variables du sous problème

Telque :

n : Paramètre qui représente le nombre de jours dans l'année

m : Paramètre qui représente le nombre de conducteurs

S : Ensemble des services le jour j

h : Paramètre qui représente le nombre de services le jour j

s : Paramètre qui représente le nombre de service nécessaire le jour j

I : ensemble des conducteurs

J : ensemble des jours

x : Paramètre qui représente la présence des conducteurs (donnée par le problème maître).

f : Paramètre qui représente la formation des conducteurs (donnée par le problème maître).

c : Paramètre qui représente le congé des conducteurs (donnée par le problème maître).

r : Paramètre qui représente la réserve le jour j (donnée par le problème maître).

y : Variable binaire qui représente l'affectation du conducteur a un servic

✓ Définition des contraintes et fonction objectif

```
14  
15 minimize obj: 0;  
16  
17 subject to c1{j in J, l in S[j]}: sum{i in I} y[i,j,l] = 1;  
18 subject to c2{j in J}: sum{i in I} y[i,j,0] = r[j];  
19 subject to c3{i in I, j in J}: sum{l in (S[j] union {0})} y[i,j,l] = x[i,j];  
20
```

Figure .14 : contraintes et fonction objectif du sous problèmes

Introduction des données des problèmes dans un fichier .Dat:

```
27 data;  
28  
29 param n:= 366;  
30 param m:= 137;  
31  
32 param h:= 1.69  
33 2.76  
34 3.76  
35 .  
36 .  
37 .  
38 365.76  
39 366.76;  
40
```

Figure .15: les données du sous-problème (paramètres n,m et h)

✓ Le paramètre x

Représente la présence des conducteurs le jour j au cours de la période annuelle. Chaque élément $x[i,j]$ est une variable binaire (0 ou 1), où i représente un conducteur spécifique et j un jour spécifique.

CHAPITRE IV : Implémentation et résultats

```

41 param x:1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38
    39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74
    75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107
    108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134
    135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161
    162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188
    189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215
    216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242
    243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269
    270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296
    297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323
    324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350
    351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 :=
42 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1
    1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0
    0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1
    1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 1 0 1
    0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 1 1 1
    0 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0
    1 1 1 1 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1
43 2 .....
44 3
45 .
46 .
47 .
48 .
49 .
50 .
51 .
52 |
53 137 1 1 0 1 0 0 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1
    0 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0
    1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 1 0 0
    0 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 1
    0 0 1 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1
    0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1
    1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 1 1 0 0
54 ;

```

Figure .16 : données du sous-problème (paramètre x)

Affichage des résultats

Pour afficher les résultats du problème maître, nous avons utilisé le code AMPL dans la photo ci-dessous. Ce code permet de générer et de visualiser les résultats de manière efficace et précise.

```
105 solve;
106
107 printf "Affectation annuelle:\n";
108 for {i in I} {
109     →printf "%d*:", i;
110     ... for {j in J} {
111         - →→→if f[i,j] then
112         →→→→printf "F ";
113         - →→→else if c[i,j] then
114         →→→→printf "C ";
115         - →→→else if (not x[i,j]) then
116         →→→→printf "R ";
117         - →→→else if (x[i,j] and y[i,j,0]) then
118         →→→→printf "V ";
119         →→→→else {
120         →→→→→for{l in S[j]}{
121         - →→→→→if y[i,j,l] then
122         →→→→→→printf "S%d ", l;
123         →→→→→}
124         →→→→}
125     →}
126     ... printf "\n";
127 }
128 printf "Services\n";
129 for {j in J} { →→→→
130     ... printf "%d ", s[j];
131 }
132 printf "\nReserve\n";
133 for {j in J} { →→→→
134     ... printf "%d ", r[j];
135 }
136
```

Figure .20 : Code AMPL utilisé pour afficher les résultats (sous-problème)

IV.4 Résultats et discussion

IV.4.1 Résultats du Modèle de Planification

IV.4.1.1 Résultats du Problème maître

Pour le problème maître, la pré-affectation annuelle a été obtenue avec les caractéristiques suivantes :

- **Nombre total de variables** : 200112, dont 199746 variables binaires.
- **Nombre total de contraintes** : 398854, comprenant 777 égalités et 398077 inégalités.
- **Objectif** : Solution optimale avec une valeur objective de 0.
- **Temps de résolution** : Le problème maître a été résolu en 15 secondes, comme indiqué par le rapport du serveur NEOS.

```
20/06/2024 16:01 NEOS Results for Job #14289592

neos RESULTS

*****

NEOS Server Version 6.0
Job#      : 14289592
Password  : YJTrzAv0
User      :
Solver    : milp:Gurobi:AMPL
Start     : 2024-06-18 16:45:34
End       : 2024-06-18 16:45:49
Host      : prod-sub-1.neos-server.org

Disclaimer:

This information is provided without any express or
implied warranty. In particular, there is no warranty
of any kind concerning the fitness of this
information for any particular purpose.

Announcements:
*****
You are using the solver gurobi_ampl.
Checking ampl.mod for gurobi_options...
Executing AMPL.
processing data.
processing commands.
Executing on prod-exec-7.neos-server.org

Presolve eliminates 0 constraints and 822 variables.
Adjusted problem:
200112 variables:
    199746 binary variables
    366 linear variables
398854 constraints, all linear; 1937820 nonzeros
    777 equality constraints
    398077 inequality constraints
1 linear objective; 0 nonzeros.

Gurobi 11.0.1: tech:threads = 4
*****Gurobi 11.0.1: optimal solution; objective 0
0 simplex iterations
```

Figure .21: Rapport de Résultat du problème maître avec Gurobi via NEOS

CHAPITRE IV : Implémentation et résultats

A. La Pré-affectation Annuelle :

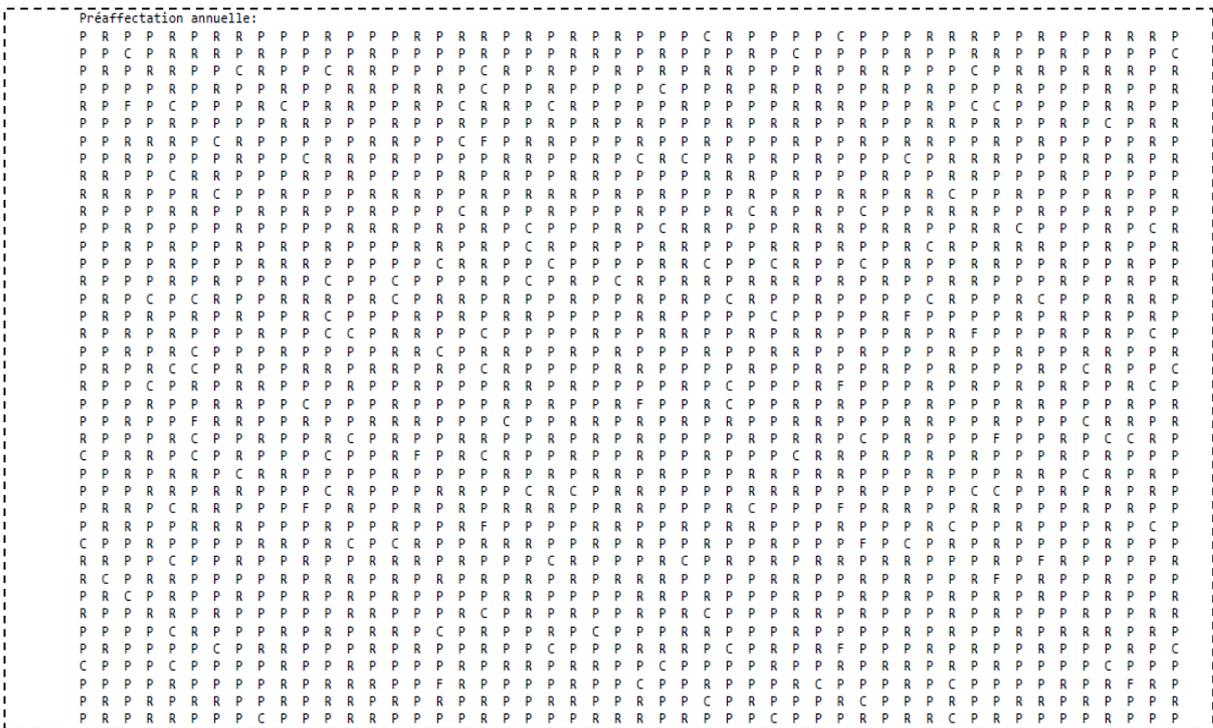


Figure .22 : Extrait de la Pré-affectation Annuelle Optimisée par NEOS avec Gurobi

B. Paramètres pour le sous-problème

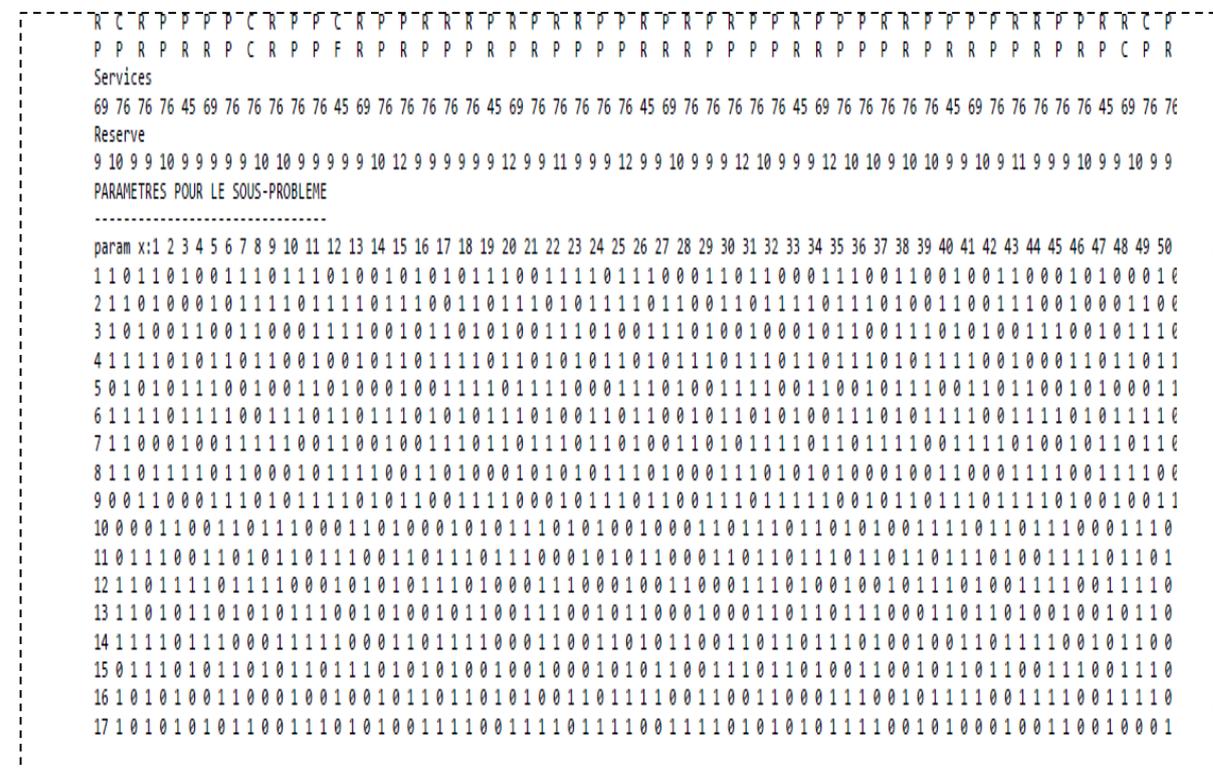


Figure .23: Extrait des paramètres (s, h, x) du sous-problème issus de la résolution du problème maître


```
20/06/2024 17:06 NEOS Results for Job #14289623  
  
  
  
*****  
NEOS Server Version 6.0  
Job#      : 14289623  
Password  : ZpLtXqdB  
User      :  
Solver    : milp:Gurobi:AMPL  
Start     : 2024-06-18 17:07:49  
End       : 2024-06-18 17:08:03  
Host      : prod-sub-1.neos-server.org  
  
Disclaimer:  
  
This information is provided without any express or  
implied warranty. In particular, there is no warranty  
of any kind concerning the fitness of this  
information for any particular purpose.  
  
Announcements:  
*****  
You are using the solver gurobi_ampl.  
Checking ampl.mod for gurobi_options...  
Executing AMPL.  
processing data.  
processing commands.  
Executing on prod-exec-7.neos-server.org  
  
Presolve eliminates 20961 constraints and 1455758 variables.  
Adjusted problem:  
2111311 variables, all binary  
55218 constraints, all linear; 4222622 nonzeros  
55218 equality constraints  
1 linear objective; 0 nonzeros.  
  
Gurobi 11.0.1: tech:threads = 4  
#####Gurobi 11.0.1: optimal solution; objective 0  
0 simplex iterations
```

Figure .27: Rapport de Résultat du Sous-problème avec Gurobi via NEOS

La figure représente le rapport de résultat du solveur Gurobi via le serveur NEOS. Ce rapport montre que le problème a été résolu de manière optimale en quelques secondes. Les informations clés incluent l'élimination de contraintes et de variables superflues, l'ajustement du problème pour une résolution plus efficace, et la confirmation de l'obtention d'une solution optimale. Ce résultat témoigne de l'efficacité et de la rapidité de Gurobi pour traiter des problèmes complexes.

CHAPITRE IV : Implémentation et résultats

A. Affectation Annuelle :

```
Affectation annuelle:
*1*: 545 R 530 528 R 512 R R 559 521 535 R 558 V 536 R 564 R R 554 R 529 R 57 R 520 543 554 C R 563 573 53 536 C 574 567 561 R R R 552 517 R V V R R
*2*: 530 534 C 532 R R R 560 R 570 561 510 557 R 547 525 537 530 R V 538 528 R R 539 533 R 549 54 526 R 571 C 553 537 V 576 R 58 512 R R 510 542 R 52
*3*: 549 R 572 R R 554 532 C R 518 539 C R R 575 542 521 556 C R 551 R V 544 R 530 R V R 549 V 55 R 536 R R 551 562 515 C 572 R R 543 R R R 542 R 5
*4*: 561 575 543 560 R 519 R 535 510 R 529 59 R R 530 R R 542 C 529 544 R 571 534 524 513 C 532 536 R V R 538 R 527 559 R 530 R V 518 569 R 517 V 533
*5*: R 576 F 548 C 59 518 553 R C 560 R R 559 576 R 559 C R R 576 C R 543 V 544 545 R 519 58 516 551 R R R 526 V 549 R 514 C C V 533 572 520 R R 54 5
*6*: 52 563 522 533 R 524 535 554 532 R R 535 51 550 R 526 526 R 541 54 V R 54 R V R 557 575 520 R 537 R R 554 517 R V 59 R 562 R V 520 R 566 C 537
*7*: 541 541 R R R 539 C R 575 V 575 51 528 R R 527 568 C F 565 R R 514 512 535 R 59 574 R 520 525 546 R 568 54 R 58 R R V 556 R 534 R 533 53 58 523
*8*: 538 552 R 553 V 518 573 R 538 534 C R R 548 R 566 574 54 537 R R 551 547 R 547 C R C 533 R 557 R 58 R 542 V 571 C V R R R 544 55 V R 539 R 53 R
*9*: R R 521 555 C R R 573 562 567 R 534 R 538 V 537 544 R 525 R 522 536 R R 532 535 529 548 R R R 552 R 563 521 572 R 564 550 R R 535 568 560 R 536
*10*: R R R 546 V R C 545 V R 59 515 V R R R 517 548 R 519 R R R 541 R 54 R 556 572 568 R 52 R 564 R R 573 R R C 545 59 R 536 556 550 R 513 531 R 553
*11*: R V 544 576 R 520 518 R 532 R 525 513 R 57 529 V C R 512 558 R 557 524 514 R 562 535 534 R C R V R 53 C 521 568 R R 541 543 R 55 543 R 514
*12*: 516 551 R 540 526 558 V R 543 523 543 53 R R R 575 R 563 R 530 C 557 563 574 R V C R R 540 564 535 R R R 53 R 523 V R R C V 573 514 R 560 C F
*13*: V 545 R 515 R 526 536 R 565 R 554 R 564 572 521 R R 57 R 516 C R 513 R 55 V R R V 553 55 R R 528 R 562 V R C R 519 R R R 522 548 R 553 547 R 57
*14*: 569 512 540 510 R 522 575 533 R R R 517 550 560 563 561 C R R V V C 53 V V 526 R R C 537 574 C R 562 V C 545 R 543 536 R R 545 516 R 555 542 R
*15*: R 522 59 556 R 520 R 55 541 R 570 C 534 536 C 524 543 551 R 535 C 51 R 519 C R 57 R R 525 R R R 541 R 516 R 513 54 R R 529 570 527 R 532 513 R
*16*: 51 R 560 C 527 C R V 556 R R R 546 R C 551 R R 511 R 527 511 R 572 V R 566 R 538 C R V 537 R 514 V 543 553 C R 559 V C C 530 51 R R R 537 514 V
*17*: V R 538 R 525 R 574 R 560 V R C 549 533 54 R 555 R 53 R R 525 515 58 526 R R 563 562 562 59 C 56 565 549 545 R F 530 542 564 573 R 575 R 54 R 5
*18*: R 515 R 518 R 560 54 V R 526 530 C C 569 R R 525 547 C 59 526 568 V R 520 57 R R 550 528 R 510 R R V V 561 R 55 R F 550 514 572 R 56 R 543 C 55
*19*: 544 553 R 537 R C V 541 553 R 564 540 561 V R R C 528 R R 512 531 R 567 R 529 58 540 R 575 545 R R 537 52 R V V R 512 546 R 537 553 R R V V R
*20*: 551 R 573 R C C 548 R 51 539 R R 522 R R 532 R 537 C R 517 57 568 528 R R 546 521 V 518 R 522 V R 576 528 R 538 521 R 539 54 561 R V C R 550 53
*21*: R V 547 C V R 557 R R V 557 54 R 547 514 R 57 558 V R R 56 R 546 513 514 551 R 517 C 565 531 513 R F 539 559 545 R 55 R 536 R 549 R 560 511 R C
*22*: 534 533 549 R V V R R V 569 C 527 531 552 R 522 576 553 510 R 571 R 555 556 R F 53 V R C 521 542 R 567 R 541 539 556 R 510 546 554 R R 561 518
*23*: 518 555 R 566 510 F R R 529 557 R 520 553 R R R 533 514 526 C V V R R V R V R V R 58 574 R R 530 560 531 R R 534 525 R 541 539 59 C R R 574 R 5
*24*: R 574 568 521 R C 526 V R 530 524 R C 568 R 54 575 R R 546 539 R 519 R V R V 528 557 572 R 59 R R 565 C 528 R 569 533 548 F 574 524 R 517 C C R
*25*: C 573 R R 538 C 564 R 59 520 571 C 515 555 R F 520 R C R 520 518 R 563 54 R 553 553 R 576 575 568 C R R 564 R 546 R 511 R 576 53 57 R 564 R 526
*26*: 512 537 R 524 R R 538 C R R 572 514 539 524 R 519 522 569 538 R 546 R 534 R R 523 R 562 525 533 R R V R R 58 574 523 R 535 563 548 R R 532 C R
*27*: 511 V 527 R R 568 R R 534 V 519 C R 565 531 530 R R 54 556 C R C 530 R R 544 551 575 59 R R R 59 570 R 519 53 547 529 C C 557 V R 515 R V R 5
*28*: 55 R R 53 C R R 571 517 V F 511 R 530 532 R V R 512 R R 522 525 R R 510 51 510 R C 523 V 511 F 546 R R V 59 R R 516 510 524 R 543 R 565 560 5
*29*: 522 R R 56 518 R R V 573 54 R V 54 R 53 V R F 52 515 V 570 R R 534 V R 549 R R 517 545 534 R 534 530 563 R C 538 537 R 59 51 574 R 531 C 545
*30*: C 511 53 R 51 550 567 557 R R V R C 576 C R 534 538 R R R V 576 R 530 R 547 525 R 513 538 R 542 53 516 F 547 C 524 R 527 R 530 541 539 552 R 54
*31*: R R 58 562 C 569 522 R 549 519 R 538 532 R R R 513 R V V 530 C R 551 59 540 R C 511 R 566 R 517 R R 517 R R 544 531 533 R V F R 569 541 528 546
*32*: R C 516 R R 521 543 53 542 R 542 R 563 R 549 R 526 R 58 R 537 R 569 R R R 518 V 571 533 R R 523 564 R 540 R 549 518 R F 548 R 527 540 R 515 5
*33*: R C 559 R 529 56 R 570 533 R 528 R 564 R 544 557 559 522 R R 552 52 V 541 R R 546 R V 561 525 R 559 V R 544 R V R 547 R V R V 570 R 538 568 R
*34*: R 520 517 R R 546 R 537 548 541 541 523 R R V V 510 R C 522 R 573 R 564 552 R 548 R C 550 510 550 R R 554 R 566 56 574 R 566 R 523 566 544 R 52
*35*: 568 V 56 534 C R 531 563 513 R 515 R 514 R R 539 C 511 R 524 549 R V C 56 512 526 R R 546 540 575 R 566 51 549 541 R 510 R V 545 R 515 R R R 5
*36*: 524 R 562 526 542 544 C 532 R R 522 V 533 R 52 R 58 529 R 552 513 C 565 527 531 R R R 535 C 534 R 531 R F V 575 537 R 525 R 53 V R 575 557 V R
*37*: C 565 537 V C 543 519 567 546 R V 52 R 522 540 531 516 R 518 R R 545 R R 529 542 C 573 564 573 515 R 54 538 R 510 R R 51 R 523 R V 561 557 547
*38*: 523 521 550 565 R V V 514 516 R 540 R R 535 540 F R 532 537 566 558 R 550 546 C 538 517 R 529 532 534 R C 552 513 536 R 570 C 543 520 525 512
*39*: 526 R 519 R 56 R R 57 55 R 526 R R 532 R 568 R 545 R 558 516 R R 522 565 R 552 537 C 538 R 530 526 V R C 550 566 516 R 531 563 R 576 R V 520
*40*: 550 R V R 563 V 547 C 547 538 542 R R 517 562 535 546 R 550 554 546 518 R R 550 R 552 V 552 C V V 571 R 549 R C 524 R 54 538 V 538 R 544
*41*: R R V R V 521 R 533 563 R 543 R C V C 572 R 536 R 521 F 558 R R 565 533 521 566 R R V R R 556 522 R 564 V R 555 520 514 C 511 R 564 V C R 5
*42*: 520 R 57 567 541 V R 526 545 51 R R 554 557 518 R 528 524 535 531 R 514 512 56 R 53 514 R 560 512 53 564 R R F 512 R V 529 58 R R 571 V 554 5
*43*: R 518 529 C R 565 515 R 52 525 563 545 R R 543 533 563 527 R 562 533 571 R V 545 R 542 R R V 562 R R 56 R 554 570 V 548 R V 538 R C 540 563 536
*44*: R 56 570 520 R 556 561 R R 515 552 544 543 R R 558 R 560 514 V 548 564 R C R V R 570 557 R 547 R R 533 553 R R 566 R 57 540 554 R R 538 R 5
```

Figure .28: Extrait de l'Affectation Annuelle Optimisée par NEOS avec Gurobi

IV.4.2 Analyse des Résultats

Pour analyser les résultats de l'affectation annuelle, nous avons exporté les données dans un fichier Excel.

A. Respect des Contraintes du nombre de jours de travail, de repos, de congé et de formation :

Id_conducteur	Nombre de jours de travail	Nombre de jours de repos	Nombre de jours de congé	Nombre de jours de formation
1	213	128	22	3
2	213	128	22	3
3	213	128	22	3
4	213	128	22	3
5	213	128	22	3
6	213	128	22	3
7	213	128	22	3
8	213	128	22	3
9	213	128	22	3
10	213	128	22	3
11	213	128	22	3

Figure .29 : Extrait de tableau récapitulatif des jours de travail, de repos, de congé et de formation annuels pour chaque conducteur

CHAPITRE IV : Implémentation et résultats

Après l'analyse des données nous avons constaté que toutes les contraintes relatives au nombre de jours de travail, de repos, de congé et de formation pour les 137 conducteurs ont été strictement respectées. C'est-à-dire quel que soit le conducteur, il obtient 213 jours de travail, 128 jours de repos, 22 jours de congé et 3 jours de formation.

B. Respect des Contraintes de couverture des Services Requis et Conducteurs en réserve :

Pour évaluer ces aspects cruciaux, nous avons construit un graphique représentant la couverture des services requis et la gestion des conducteurs en réserve sur l'année.

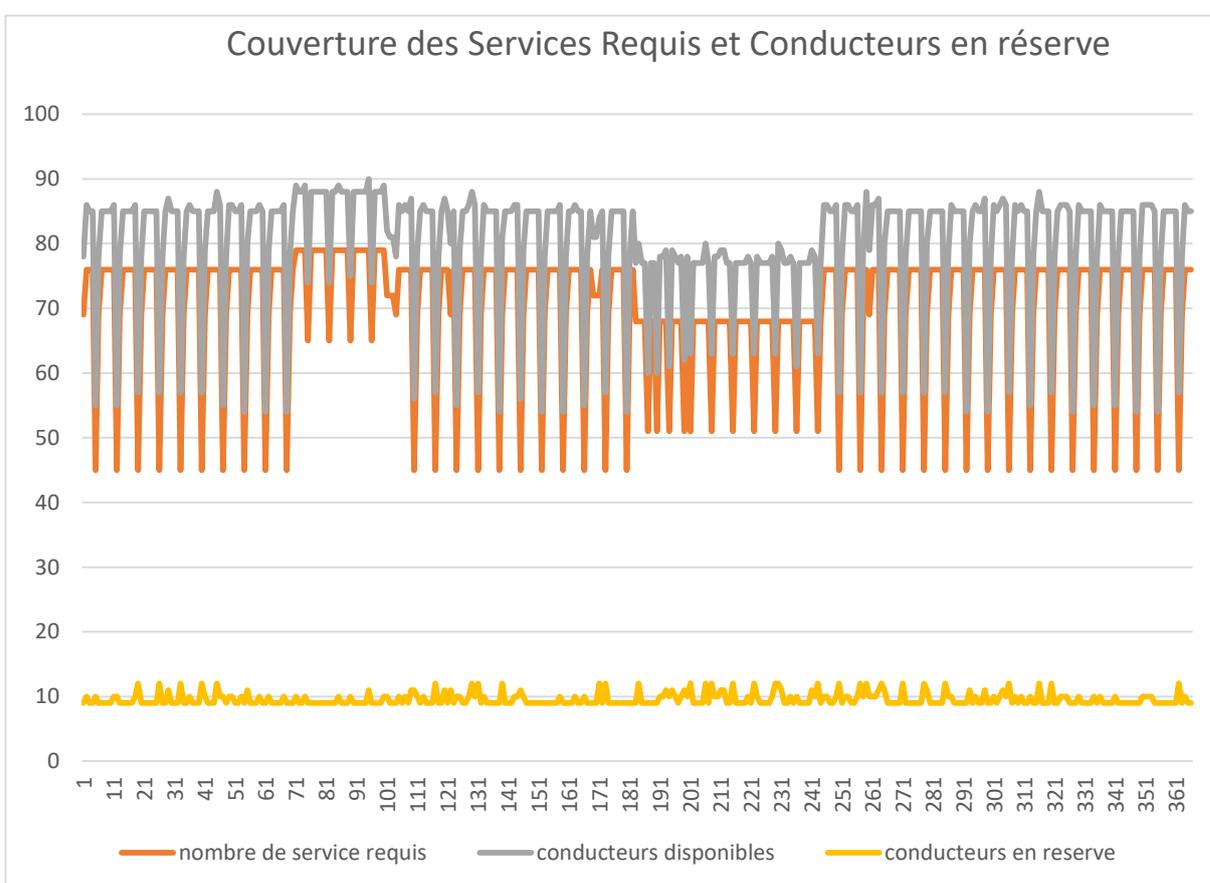


Figure. 30 : Graphique de la Couverture des Services Requis et de la Gestion des Conducteurs en Réserve pendant l'Année

➤ Analyse de graphique

D'après le graphe, il est clair que le nombre de conducteurs en réserve reste constant entre 9 et 12 tout au long de l'année. Cette plage est conforme aux exigences opérationnelles qui

CHAPITRE IV : Implémentation et résultats

garantissent un nombre suffisant de conducteurs disponibles pour répondre aux besoins imprévus tout en maintenant une efficacité opérationnelle optimale.

De plus, la courbe représentant le nombre de conducteurs disponibles est constamment au-dessus de la courbe des services requis. Cela indique que tous les services requis sont couverts chaque jour de l'année, sans exception. Cette observation témoigne de l'efficacité du modèle de planification des rotations des conducteurs de TRAMWAY, assurant ainsi un service fiable et continu sans compromettre les standards de qualité et de performance."

Cette analyse met en lumière deux aspects critiques du graphique : la gestion efficace des conducteurs en réserve et la garantie de la couverture des services requis, renforçant ainsi la validation des contraintes opérationnelles dans notre projet.

IV.5 Conclusion

En conclusion, les résultats obtenus confirment que notre modèle de planification des rotations des conducteurs de TRAMWAY est robuste et répond efficacement aux besoins opérationnels de l'organisation. Les analyses approfondies et les graphiques présentés renforcent la validité et la fiabilité de notre approche, ouvrant la voie à des améliorations continues et à de nouvelles applications dans le domaine de la gestion des transports urbains.

En perspective, il reste à assurer que deux services successifs assurés par un même conducteur soient séparés par au moins 11 heures. Pour atteindre cet objectif, on peut envisager l'utilisation de la génération de colonnes, où les colonnes représenteraient des roulements types réalisables. Cette méthode permettrait de garantir des intervalles de repos adéquats entre les services, améliorant ainsi encore plus la qualité de la planification et le bien-être des conducteurs.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La gestion des rotations des conducteurs de tramway constitue un défi majeur pour SETRAM, responsable de l'exploitation du réseau de tramways à Alger. La complexité réside dans la nécessité d'assurer une couverture complète des services quotidiens tout en respectant diverses contraintes telles que les jours de repos, les congés, et les périodes de formation. Notre projet visait à relever ce défi en développant un modèle d'optimisation robuste utilisant la programmation des nombres entiers mixtes.

En utilisant des outils performants comme le solveur Gurobi et la plateforme NEOS, nous avons pu résoudre le modèle de manière efficace. Les résultats ont démontré que notre approche permet de couvrir tous les services requis chaque jour, tout en maintenant une réserve de conducteurs entre 9 et 12 par jour. Cela garantit non seulement la satisfaction des exigences opérationnelles mais aussi le bien-être des conducteurs.

Une analyse plus approfondie a montré que toutes les contraintes imposées par SETRAM étaient respectées, y compris le nombre de jours de travail, de repos, de congé et de formation. Cependant, pour aller plus loin, il serait pertinent d'assurer une séparation minimale de 11 heures entre deux services successifs pour un même conducteur. Pour atteindre cet objectif, nous pourrions envisager l'utilisation de la génération de colonnes, où chaque colonne représenterait une rotation type réalisable.

En conclusion, notre modèle d'optimisation des rotations des conducteurs de tramway est non seulement viable mais aussi efficace, répondant aux besoins opérationnels tout en améliorant la qualité de vie des conducteurs. Cette approche ouvre des perspectives intéressantes pour des améliorations continues et des applications étendues dans le domaine de la gestion des transports urbains.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

1. **Andrés Sanchez**, *Les enjeux et les impacts d'un changement de production dans une exploitation de transport urbaine et interurbains, gestion et management*, Mémoire de stage en vue de l'obtention de diplôme Master , soutenu le 7 septembre 2015 à l'institut de l'homme de Lyon, sous la supervision de Sylvain LOGUT, université Lumière Lyon 2-France.
2. **Bixby, R. E. (2012)**. "A Brief History of Linear and Mixed-Integer Programming Computation." *Documenta Mathematica, Extra Volume: Optimization Stories*, 107-121.
3. **Eurodecision. (2024)**. *Optimisation dans le secteur Transport Public & Collectif*. Eurodecision.
4. **Fourer, R., Gay, D. M., & Kernighan, B. W. (2003)**. "AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming." Brooks/Cole Publishing Company.
5. **Gropp, W., Moré, J. J. (1997)**. "Optimization Environments and the NEOS Server." In M. D. Buhmann & A. Iserles (Eds.), *Approximation Theory and Optimization: Tributes to M. J. D. Powell* (pp. 167-182). Cambridge University Press.
6. **Gurobi Optimization, LLC. (2024)**. "**Gurobi Optimizer Reference Manual**."
7. **Lo Bianco, G., Lorca, X., & Rottembourg, B. (2024)**. *Création simultanée des tables horaires et du graphicaage sur une ligne de bus*. IMT-Atlantique, TASC (LS2N), Nantes, France; Eurodecision, Versailles, France.
8. **Mitchell, J. E., & Borchers, B. (2000)**. "Solving Linear and Mixed-Integer Programming Problems on the NEOS Server." *SIAM News*, 33(6), 8-9.
9. **Robert FAURE**, *Etablissement Automatique Des Tableaux De Marche Et Feuilles De Service Dans Un Reseau De Transport*, 53 ter quai des Grands-Augustins Paris (6^e) France.
10. **Transbus. (2024)**. *Études et méthodes*. Transbus. Retrieved.
11. **Vanderbei, R. J. (2015)**. "Linear Programming: Foundations and Extensions." Springer.
12. **Williams, H. P. (2013)**. "Model Building in Mathematical Programming." John Wiley & Sons.
13. **Zembri-Mary, G. (2016)**. *Concevoir une offre de transport public*. Le Moniteur.