Optimisation des rotations conducteurs de la SETRAM

AIDA Imane[1] et MAHMOUDI Khadîdja[1]

Encadré par : BOUZID M. Cherif [1]

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.

1. Introduction

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.

SETRAM, opérateur de tramways à Alger, fait face à des défis majeurs dans la gestion des horaires de travail, une tâche cruciale pour assurer la qualité des services et le bien-être des employés dans le secteur du transport.

Le but de cet article est d'optimiser la planification des horaires pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la satisfaction des usagers.

La suite de cet article est organisée comme suit: Dans la section 2, nous abordons les travaux connexes à notre thème de recherche. Dans la section 3, nous présentons la méthodologie utilisée pour résoudre le problème de planification des rotations des conducteurs. Dans la section 4, nous discutons des résultats obtenus et leur analyse. Enfin, nous terminons par une conclusion et des perspectives pour des travaux futurs.

[1] Département de logistique et d'ingénierie des transports, École nationale supérieure de technologie avancées (ENSTA) Dergana, Algérie.

2. Travaux Connexes

De nombreux travaux ont été réalisés sur les problèmes de roulement. Il existe plusieurs variantes au problème de roulement. Nous nous intéressons dans ce document à la variante de améliorer l'efficacité opérationnelle et la satisfaction des usagers, nous présentons.

Les travaux antérieurs sur l'optimisation des horaires dans les systèmes de transport public ont exploré diverses approches, incluant la programmation linéaire et la programmation des nombres entiers.

Sanchez A. [1] a étudié les impacts d'un changement de production dans les transports urbains et interurbains, en mettant l'accent sur la gestion et le management dans un contexte de transformation organisationnelle.

Robert Fourer, David M. Gay, Brian W. Kernighan [2] avec le langage de modélisation AMPL. Ces études ont établi les fondations pour l'application de techniques d'optimisation avancées dans le secteur des transports publics.

Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R., & Muñoz, J. C. [3] Ils ont développé un modèle d'optimisation pour la planification des horaires d'équipage dans les systèmes de transport ferroviaire urbain. Leur approche utilise la programmation linéaire pour minimiser les coûts opérationnels tout en respectant les contraintes réglementaires et opérationnelles.

Laurentian, K., Cordeau, J. F., & Laporte, G. [4] Ils ont proposé une approche intégrée pour la planification des véhicules et des équipages dans les transports publics. Leur modèle combine la planification des véhicules et des équipages afin d'améliorer l'efficacité opérationnelle et de réduire les coûts.

Kohl, N., & Karisch, S. E. [5] Ils ont appliqué la programmation en nombres entiers pour résoudre les problèmes de planification des équipages dans l'industrie aérienne. Leur travail se concentre sur la création de plannings optimaux pour les équipages en minimisant les coûts tout en respectant les contraintes de réglementation et de fatigue.

Barnhart, C., Cohn, A., Johnson, E. L., Klabjan, D., Nemhauser, G. L., & Vance, P. H. [6] Ils ont utilisé une approche de décomposition pour résoudre les problèmes de planification des équipages. Leur méthode décompose le problème principal en sous-problèmes plus petits et plus gérables, ce qui permet de trouver des solutions optimales plus efficacement.

Lusby, R. M., Larsen, J., Ehrgott, M., & Ryan, D. M. [7] Ils ont appliqué des modèles de programmation mathématique à la planification des équipages dans les opérations ferroviaires. Leur approche se concentre sur l'optimisation des horaires des équipages pour minimiser les coûts et améliorer l'efficacité opérationnelle.

Gopalakrishnan, B., & Johnson, E. L. [8] Ils ont travaillé sur la planification robuste des équipages avec des stratégies de récupération pour faire face aux perturbations. Leur approche permet de créer des plannings qui peuvent s'adapter aux changements imprévus tout en minimisant les impacts sur les opérations.

Weide, O. V. D., Hurink, J., & Paixão, J. M. P. [9] Ils ont développé des modèles de programmation en nombres entiers mixtes pour la planification des équipages. Leur travail se concentre sur la création de plannings optimaux qui respectent les contraintes réglementaires et opérationnelles tout en minimisant les coûts.

Cacchiani, V., Caprara, A., & Toth, P. [10] Ils ont proposé une heuristique hybride pour la planification des équipages dans les transports en commun. Leur méthode combine des techniques de recherche locale et de programmation mathématique pour trouver des solutions efficaces aux problèmes de planification des équipages.

3. Méthodologie

La méthodologie repose sur la décomposition du problème en un problème maître et un sous-problème:

3.1. Décomposition du problème

La méthodologie repose sur la décomposition du problème en un problème maître et un sous-problème, permettant une gestion efficace et structurée de la planification des rotations des conducteurs. Le problème maître détermine les jours de présence, de formation, de congé et de repos des conducteurs. Il vise à assurer que chaque conducteur dispose du nombre approprié de jours de travail, de formation, et de congé tout en respectant les contraintes de l'entreprise et les réglementations en vigueur. Le sous-problème se concentre sur l'affectation quotidienne des conducteurs aux services spécifiques ou à la réserve. En utilisant les résultats fournis par le problème maître, il assigne les conducteurs présents aux services requis chaque jour, en garantissant que chaque service est couvert et que les conducteurs sont correctement affectés. Les résultats du problème maître sont utilisés comme paramètres pour le sous-problème. Cette approche garantit que les décisions prises au niveau stratégique (problème maître) sont respectées au niveau opérationnel (sous-problème).

3.2. Modélisation du problème

3.2.1. Modélisation mathématique du problème maitre

A. Ensembles :

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

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

B. Paramètres :

Tableau 1 : Paramètres du modèle du problème maitre et leur définition

Paramètre	Définition
n	Nombre de jours dans l'année
m	Nombre de conducteurs
R	Nombre de jours de repos total pour chaque conducteur
Sj	Nombre de service nécessaire le jour j

C. Variables de décisions :

$x_{i,j} = 1$ si le conducteur $i \in I$ est présent le jour $j \in J$, 0 Sinon

$f_{i,j}$= 1 si le conducteur i ∈ I est en formation le jour j ∈ J, 0 Sinon

$c_{i,j}$= 1 si le conducteur i ∈ I est en congé le jour j ∈ J, 0 Sinon

r_j : Variable entière représente le nombre de conducteurs en réserve le jour j ∈ J ; Le décideur impose que : 9 <= r_j<= 12

$\alpha_{i,j}$: Variable binaire auxiliaire (j ∈ J, i ∈ I)

D. Contraintes du problème maître:

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

$$r_j = \sum_{i=1}^{m}(x_{i,j} - s_j) \qquad \forall j \in J \qquad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n}(x_{i,j} + f_{i,j} + c_{i,j}) \leq 366 - R \qquad \forall i \in I \qquad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{n} f_{i,j} = 3 \qquad \forall i \in I \qquad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{n} c_{i,j} = 22 \qquad \forall i \in I \qquad (5)$$

$$f_{i,j} \leq 1 - x_{i,j} \qquad \forall j \in J \qquad \forall i \in I \qquad (6)$$

$$c_{i,j} \leq 1 - x_{i,j} \qquad \forall j \in J \qquad \forall i \in I \qquad (7)$$

$$f_{i,j} + c_{i,j} \leq 1 \qquad \forall j \in J \qquad \forall i \in I \qquad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{i,j} = 213 \qquad \forall i \in I \qquad (9)$$

$$\sum_{k=0}^{5} x_{i,j+k} \leq 5 \qquad \forall i \in I \qquad \forall j \in \{1... n-5\} \qquad (10)$$

$$\sum_{k=0}^{3}(1 - x_{i,j+k}) \leq 3 \qquad \forall i \in I \qquad \forall j \in \{1... n-3\} \qquad (11)$$

$$(1 - x_{i,j+5}) + (1 - x_{i,j+6}) \geq 2*\alpha_{i,j} \qquad \forall i \in I \qquad \forall j \in \{1... n-6\} \qquad (12)$$

$$5*\alpha_{i,j} \leq \sum_{k=0}^{4} x_{i,j+k} \qquad \forall i \in I \qquad \forall j \in \{1... n-6\} \qquad (13)$$

$$\sum_{k=0}^{4} x_{i,j+k} \leq 5*\alpha_{i,j} + 4*(1- \alpha_{i,j}) \qquad \forall i \in I \qquad \forall j \in \{1... n-6\} \qquad (14)$$

Fonction objective : La fonction objectif choisie pour ce modèle est triviale, visant à minimiser 0.

À ce stade, notre priorité principale est de garantir que toutes les contraintes sont respectées afin d'établir une préaffectation annuelle efficace.

Contraintes : Le modèle comprend plusieurs contraintes essentielles.

La contrainte (1) garantit que chaque jour, le nombre de conducteurs affectés xi,j satisfait au moins les besoins en services sj.

La contrainte (2) calcule le nombre de conducteurs en réserve rj en fonction des affectations par rapport aux besoins. La contrainte (3) impose une limite annuelle sur le nombre total de jours de présence, de formation et de congé pour chaque conducteur, en s'assurant que la somme de ces jours ne dépasse pas 366 jours moins les jours

de repos R. Les contraintes (4) et (5) imposent que les jours de formation et de congé soient spécifiquement fixés à 3 et 22 jours respectivement par an pour chaque conducteur.

Les contraintes (6), (7), (8), (9), (10) et (11) assurent l'absence de conflits entre les jours de travail, de formation et de congé pour chaque conducteur, et régulent également les périodes consécutives de travail et de repos.

La contrainte (12) garantit que si un conducteur travaille cinq jours consécutifs, il bénéficiera d'au moins deux jours de repos consécutifs. Enfin, l'utilisation des variables $\alpha_{i,j}$ dans les contraintes (13) et (14) permet de réguler plus précisément les affectations et les périodes de repos en fonction des jours de travail.

Ce modèle vise à optimiser la planification annuelle des conducteurs en tenant compte des exigences opérationnelles et des besoins réglementaires en matière de travail et de repos, assurant ainsi une gestion efficace des ressources humaines.

3.2.2. Modélisation mathématique du Sous-problème

A. Ensembles :

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

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

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

B. Paramètres :

Tableau 2 : Paramètres du modèle du Sous-problème et leur définition

Paramètre	Définition
n	Nombre de jours dans l'année
m	Nombre de conducteurs
hj	Nombre de services le jour j
$\mathbf{x_{i,j}}$	Présence des conducteurs (donnée par le problème maître).
$\mathbf{f_{i,j}}$	Formation des conducteurs (donnée par le problème maître).
$\mathbf{c_{i,j}}$	Congé des conducteurs (donnée par le problème maître).
$\mathbf{r_j}$	Réserve le jour j (donnée par le problème maître).

C. Variable de décision :

$y_{i,j,l} = 1$ si le conducteur $i \in I$ est assigné au service $l \in S(j)$ le jour $j \in J$, 0 Sinon

D. Contrainte du sous problème :

$$\sum_{i=1}^{m} y_{i,j,l} = 1 \quad \forall j \in J \quad \forall l \in S(j) \tag{16}$$

$$\sum_{i=1}^{m} y_{i,j,0} = r_j \quad \forall j \in J \tag{17}$$

$$\sum_{l \in S(j) \cup \{0\}} y_{i,j,l} = x_{i,j} \qquad \forall j \in J \qquad \forall i \in I \qquad (18)$$

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

Contraintes : La contrainte (16) assure que chaque service l le jour j est couvert par exactement un conducteur.

La contrainte (17) garantit que le nombre de conducteurs en réserve le jour j est égal à la réserve préétablie rj.

Enfin, la contrainte (18) assure la correspondance entre les variables du sous-problème et celles du problème maître, stipulant que chaque conducteur doit être affecté à un service ou à la réserve s'il est présent ce jour-là.

4. Implémentation Et Résultats

Notre formulation a été écrite en AMPL **[2]**, et résolue à l'aide du solveur Gurobi **[11]** version 9.0 sur le serveur NEOS **[12]**.

Nous avons utilisé des codes permet de générer et de visualiser de manière efficace et précise.

4.1. Résultats du modèle de planification

4.1.1 Résultats du problème maitre

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

- Nombre total de variables : 200112, dont 199746 variables binaires.
- Nombre total des contraintes : 398854, comprenant 777 égalités et 398077 inégalités.

Nous arrivons à dresser une préaffectation annuelle des conducteurs qui satisfait toutes les contraintes du problème maître avec un temps de résolution de 15 secondes (voir tableau 3).

4.1.2 Résultats su sous-problème

Pour le sous problème, l'affectation annuelle a été obtenue avec les caractéristiques suivantes :

- **Nombre total de variables** : 2111311 toutes binaires.
- **Nombre total des contraintes** : 55218 toutes linéaires et égales.

A partir des résultats du problème maître que nous insérons en tant que paramètre du sous problème, nous parvenons à dresser l'affectation finale des conducteurs sur année en un temps d'exécution ne dépassant pas 14 secondes.

La figure 1 montre que tous les services sont couverts à travers notre affectation tout en gardant une réserve de 9 à 12 conducteurs par jour pouvant palier aux aléas.

a) Respect des contraintes du nombre de jours de travail, de repos, de congé, et de formation

Tableau 3: Extrait de tableau récapitulatif des jours de travail, de repos, de congé, et de formation annules pour chaque conducteur

Id_ conducteurs	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
: **:**	: :	: :	: :	: :
137	213	128	22	3

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

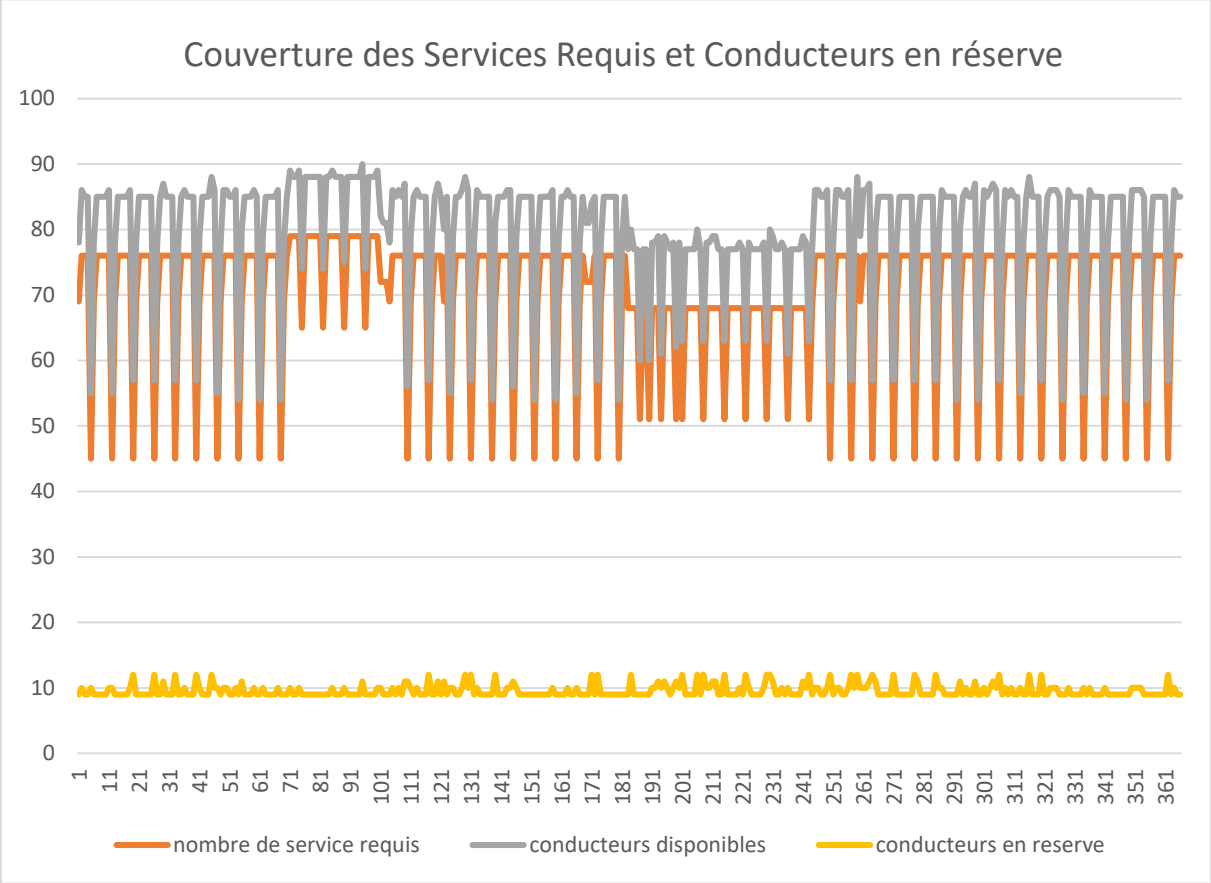

Figure 1: Graphique de la Couverture des Services Requis et de la Gestion des Conducteurs en Réserve Pendant l'Année

4.1.2.1. Analyse des Résultats

L'analyse des résultats montre que le modèle de planification couvre tous les services requis chaque jour, avec une réserve de conducteurs maintenue entre 9 et 12 par jour. Toutes les contraintes imposées par SETRAM, incluant les jours de travail, de repos, de congé et de formation, ont été respectées. Cela confirme la robustesse et la fiabilité du modèle pour répondre aux besoins opérationnels tout en améliorant la qualité de vie des conducteurs.

5. Conclusion

Dans cette étude, nous nous sommes intéressées à construire un roulement des conducteurs de la SETRAM sur un horizon de temps d'une année. Vu la complexité du problème, nous l'avons décomposé en deux niveau: un problème maître dressant une préaffectation annuelle des conducteurs et un sous-problème qui affecte définitivement les conducteurs. Les implications de nos résultats sont significatives pour SETRAM et potentiellement pour d'autres opérateurs de transport public. En optimisant la planification des horaires des conducteurs, nous avons pu :

Améliorer l'efficacité opérationnelle en garantissant que tous les services sont couverts avec un nombre adéquat de conducteurs en réserve. Cela permet d'assurer la continuité du service même en cas d'absences imprévues ou de pics de demande.

Réduire le stress et la fatigue des conducteurs en respectant les contraintes de repos et de congé. Cela contribue à une meilleure qualité de vie pour les conducteurs et à une réduction du risque d'accidents liés à la fatigue, ce qui est essentiel pour la sécurité des passagers et du personnel.

Offrir une base solide pour des ajustements futurs et des améliorations continues grâce à un modèle flexible et adaptable aux besoins changeants du terrain.

En somme, notre modèle d'optimisation représente une avancée importante dans la gestion des rotations des conducteurs de tramway. Il offre une solution pratique et efficace aux défis complexes de la planification des horaires dans le secteur des transports publics. En garantissant une meilleure allocation des ressources humaines tout en respectant les contraintes opérationnelles et réglementaires, notre modèle contribue à améliorer la qualité du service offert aux passagers et le bien-être des employés. Cela ouvre la voie à des innovations futures et à une gestion plus durable et efficace des transports urbains.

Les perspectives futures incluent l'introduction d'une séparation minimale de 11 heures entre deux services successifs par le biais de la génération de colonnes. Cette approche avancée permettra d'optimiser davantage les horaires et de répondre encore mieux aux besoins des conducteurs et de l'opérateur. Ainsi, notre modèle n'est pas seulement une solution actuelle, mais aussi une base pour des améliorations continues et des applications élargies dans la gestion des transports urbains et interurbains.

6. Bibliographie

[1] **Sanchez, A. (2015).** *Les enjeux et les impacts d'un changement de production dans une exploitation de transport urbaine et interurbaine*. Mémoire de stage, Master Professionnel Transports Urbains et Régionaux de Personnes (TURP), Université Lumière Lyon 2, École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE).

[2] **Fourer, R., Gay, D. M., & Kernighan, B. W. (2003).** "AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming." Brooks/Cole Publishing Company.

[3] **Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R., & Muñoz, J. C. (2014).** An optimization model for crew scheduling in urban rail transit systems. *Transportation Research Part B: Methodological, 67*, 1-13.

[4] **Laurentian, K., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2017).** Integrating vehicle and crew scheduling in public transit. *Computers & Operations Research, 78*, 441-451.

[5] **Kohl, N., & Karisch, S. E. (2004).** Crew scheduling in airline operations. *In Desaulniers, G., Desrosiers, J., & Solomon, M. M. (Eds.), Column Generation (pp. 343-363)*. Springer.

[6] **Barnhart, C., Cohn, A., Johnson, E. L., Klabjan, D., Nemhauser, G. L., & Vance, P. H. (1998).** Airline crew scheduling. *In Handbook of Transportation Science (pp. 517-560)*. Springer.

[7] **Lusby, R. M., Larsen, J., Ehrgott, M., & Ryan, D. M. (2011).** Railway crew scheduling: Models, methods and applications. *European Journal of Operational Research, 130*, 1-21.

[8] **Gopalakrishnan, B., & Johnson, E. L. (2005).** Robust crew scheduling with recovery strategies. *Operations Research, 53*(3), 353-364.

[9] **Weide, O. V. D., Hurink, J., & Paixão, J. M. P. (2010).** Mixed integer programming models for crew scheduling. *Journal of Scheduling, 13*(4), 323-338.

[10] **Cacchiani, V., Caprara, A., & Toth, P. (2012).** A hybrid heuristic for crew scheduling in mass transit. *Computers & Operations Research, 39*(12), 2735-2746.

[11] **Gurobi Optimization, LLC. (2021).** *Gurobi Optimizer Reference Manual*. Retrieved from.

[12] **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.