

# Matheuristique pour un problème d'ordonnancement d'opérations de recharge de bus électriques sur plusieurs jours

Pierre Vendé<sup>1,2,3</sup>, Guy Desaulniers<sup>4,5</sup>, Michel Gendreau<sup>2,4</sup>  
Yannick Kergosien<sup>3</sup>, Jorge E. Mendoza<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Département de Gestion des Opérations et de la Logistique, HEC Montréal, 3000, Côte-Sainte-Catherine, Montréal, Québec, Canada H3T 2A7

{pierre.2.vende,jorge.mendoza}@hec.ca

<sup>2</sup> CIRRELT, 2920, Chemin de la Tour, Montréal, Québec, Canada H3T 1J4

<sup>3</sup> Université de Tours, LIFAT, EA 6300, Tours, France

{pierre.vende,yannick.kergosien}@univ-tours.fr

<sup>4</sup> Département de Mathématiques et Génie Industriel, Polytechnique Montréal, 2500, Chemin de Polytechnique, Montréal, Québec, Canada H3T 1J4

{guy.desaulniers,michel.gendreau}@polymtl.ca

<sup>5</sup> GERAD, 2920, Chemin de la Tour, Montréal, Québec, Canada H3T 1J4

**Mots-clés :** *Bus électrique, Matheuristique, Recharge, Ordonnancement*

## 1 Introduction

Afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre dans le domaine du transport, les états encouragent les sociétés organisatrices de transport à utiliser des bus électriques par des contraintes législatives. Ces sociétés commencent donc à s'équiper de véhicules électriques ainsi que de chargeurs. Cependant, les objectifs d'électrification augmentent avec le temps et il devient économiquement difficile d'acquérir assez de chargeurs pour recharger tous les véhicules pendant la nuit afin de ne pas arriver à court d'énergie pendant le parcours. De plus, même en possédant l'équipement nécessaire pour le faire, il serait très difficile d'activer tous les chargeurs en même temps pour des raisons de limitation de puissance électrique du réseau. Il est donc nécessaire de développer des méthodes pour recharger intelligemment les bus. Une des solutions pour alléger l'activité liée à la recharge des véhicules est de ne plus charger uniquement pendant la nuit au dépôt, mais de compléter par des recharges pendant la journée. La suite du résumé présente le problème étudié pour répondre à cette problématique ainsi que les méthodes de résolution proposées.

## 2 Description du problème

Dans cette étude, nous considérons donc une extension du problème proposé par [3] : un problème d'affectation de bus électriques et d'ordonnancement d'opérations de recharge sur plusieurs jours. On considère un ensemble de blocs à assigner à une flotte homogène de bus électriques chacun équipé d'une batterie de capacité limitée. Un bloc est composé d'un ensemble successif de trajets de bus. Ces trajets sont séparés par des temps de pause pendant lesquels les bus peuvent recharger leur batterie à des stations de recharge installées sur le réseau de transport. Chaque bus est affecté à un dépôt qui sert de point de départ et d'arrivée avant et après avoir assuré les trajets d'un bloc. Une première décision de ce problème est d'affecter les bus à chaque bloc journalier pendant l'ensemble des jours de l'horizon de planification, un bus effectuant un bloc par jour. Pour assurer la réalisabilité énergétique des blocs, les autobus peuvent être rechargés pendant la nuit au dépôt ou pendant la journée sur le réseau de transport entre deux trajets, si possible. Un deuxième niveau de décision consiste à décider à quel moment dans un bloc les bus vont se recharger. Ces recharges

sont conçues de manière à ce que le bus ait l'autonomie suffisante pour atteindre le chargeur suivant ou finir les trajets du bloc et revenir au dépôt tout en respectant des seuils minimaux et maximaux d'état de charge. En conditions réelles, les chargeurs ont une fonction de recharge logarithmique. Cependant, afin d'approcher cette fonction de manière linéaire, elle est représentée par une fonction linéaire par morceaux [1, 4]. Chaque emplacement de recharge a sa propre vitesse et donc fonction de recharge. Les chargeurs installés sur le réseau sont conçus pour être utilisés pour des événements de recharge courts pendant la journée de travail des bus. Un troisième niveau de décision concerne le temps de recharge des bus, que ce soit au dépôt pendant la nuit de manière à ce que chaque bus puisse atteindre le premier chargeur sur le réseau lors de la journée suivante, ou bien sur le réseau pour atteindre le prochain chargeur ou le dépôt en fin de journée. L'utilisation des temps de pause entre les trajets pour effectuer une opération de recharge doit être choisie de manière à minimiser les dommages sur le long terme liés à la durée de vie de la batterie. Les batteries ont un nombre prédéterminé de recharges possibles, il faut donc chercher à charger le moins de fois possible [2]. De plus, les chargeurs ayant une vitesse de recharge plus élevée (c.-à-d. ceux localisés en dehors du dépôt) soumettent les batteries à un stress important qui impacte négativement leur durée de vie. L'objectif est donc d'utiliser au maximum la recharge nocturne, où la vitesse de recharge est plus faible, et à limiter les événements de recharge sur le réseau. Pour finir, on cherche à ordonnancer les tâches de recharge en respectant les contraintes de capacité ainsi que des contraintes horaires liées à l'affectation des bus aux différents blocs. Toutes ces décisions doivent être prises de manière à minimiser les coûts de recharge des bus ainsi que le nombre d'événements de recharge.

### 3 Méthodes de résolution

Pour résoudre ce problème, nous proposons deux méthodes. Une première méthode consiste à formuler le problème sous forme de programme linéaire mixte en nombres entiers puis à le résoudre à l'aide d'un solveur commercial. La seconde méthode est une heuristique avec une approche itérative par décomposition. On décompose le problème entre décisions nocturnes et décisions sur le réseau. Les décisions nocturnes indiquent l'affectation des bus aux différents blocs ainsi que la séquence de recharge des bus pendant la nuit au dépôt. Les décisions sur le réseau établissent à quel moment du parcours les bus vont se recharger, ainsi que les durées de rechargement sur le réseau pendant la journée et au dépôt pendant la nuit, tout en minimisant le nombre d'événements de recharge et les coûts de recharge. Lors de chaque itération, une partie de la solution correspondant aux décisions nocturnes est détruite puis reconstruite en utilisant les décisions sur le réseau, et inversement à l'itération suivante. Les expérimentations numériques ont été réalisées sur un ensemble de 72 instances générées à partir de données fournies par un opérateur de bus. Les résultats expérimentaux seront présentés lors de la ROADEF 2024.

### Références

- [1] Montoya, Guéret, Mendoza, Villegas (2017). The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. *Transportation Research Part B : Methodological*, 103 : 87-110.
- [2] Pelletier, Jabali, Laporte, Veneroni (2017). Battery degradation and behaviour for electric vehicles : Review and numerical analyses of several models. *Transportation Research Part B : Methodological*, 103 : 158-187.
- [3] Vendé, Desaulniers, Kergosien, Mendoza (2023). Matheuristics for a multi-day electric bus assignment and overnight recharge scheduling problem. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 156 : 104360.
- [4] Yao, Liu, Lu, Yang (2020). Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport. *Sustainable Cities and Society*, 52 : 101862.