

# 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, ERL CNRS ROOT 7002, 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 Description de la problématique

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 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'allumer tous les chargeurs en même temps pour des raisons de limitation de puissance électrique par le fournisseur. C'est pourquoi il est nécessaire de développer des méthodes pour recharger intelligemment les bus, en considérant ces contraintes de capacité. Dans cette étude, nous considérons donc un problème d'ordonnancement d'opérations de recharge de bus électriques 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 des blocs. 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 entre deux trajets si possible. Ce dernier type de recharge s'effectue à l'aide de chargeurs déployés à différents endroits du réseau de transports. 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, 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. Chaque emplacement de recharge a sa propre vitesse et donc fonction de recharge. Les chargeurs installés sur le réseaux 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 dimensionnement des événements 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 pendant 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. 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. On va donc chercher à 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 afin de respecter des 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.

## 2 Méthode 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 par décomposition. On décompose le problème en un problème maître et un sous-problème. Le problème maître cherche à affecter des bus aux différents blocs ainsi qu'à décider à quel moment du parcours les bus vont se recharger, en minimisant le nombre d'événements de recharge. Le sous-problème va vérifier comment, pour les décisions prises par le problème maître, on peut recharger les bus de manière à créer des blocs réalisables d'un point de vue électrique, en minimisant les coûts de recharge des bus.

## 3 Conclusion

Dans cette étude, nous proposons une formulation du problème d'ordonnancement d'opérations de recharge de bus électriques sur plusieurs jours. Le problème est résolu tout d'abord avec un programme linéaire mixte en nombres entiers. Une heuristique, avec une approche par décomposition, est aussi proposée afin de résoudre efficacement le problème. Les résultats expérimentaux seront présentés lors de la conférence ROADEF 2023.

## Références

- [1] Froger, Mendoza, Jabali, Laporte (2021). The electric vehicle routing problem with capacitated charging stations. *Transportation Science*, 56(2) : 460-482.
- [2] Montoya, Guéret, Mendoza, Villegas (2017). The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. *Transportation Research Part B : Methodological*, 103 : 87-110.
- [3] 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.
- [4] Yao, Liu, Lu, Yang (2020). Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport. *Sustainable Cities and Society*, 52 : 101862.
- [5] Zhang, Wang, Qu (2021). Optimal electric bus fleet scheduling considering battery degradation and non-linear charging profile. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 154, 102445.