

# Matheuristiques pour un problème d’ordonnancement d’opérations de recharge nocturne de bus électriques sur plusieurs jours

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

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

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

<sup>2</sup> Université de Tours, LIFAT, EA 6300, ERL CNRS ROOT 7002, Tours, France

pierre.vende@etu.univ-tours.fr, yannick.kergosien@univ-tours.fr

<sup>3</sup> Département de Mathématiques et Génie Industriel & GERAD, Polytechnique Montréal, 2500, Chemin de Polytechnique, Montréal, Québec, Canada H3T 1J4

guy.desaulniers@polymtl.ca

**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 législatifs. Ces sociétés commencent donc 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 entièrement tous les véhicules en fin de journée. De plus, même en possédant l’équipement nécessaire pour le faire, il serait très difficile d’allumer tous les chargeurs en même temps à cause de contraintes de puissance. 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 nocturne de bus électriques sur plusieurs jours. On considère un ensemble de blocs à assigner à une flotte homogène de bus électriques ayant une batterie de capacité définie. Un bloc est composé d’un ensemble successif de trajets de bus. Ces trajets peuvent être séparés par une étape de recharge de la batterie du bus, à un chargeur situé sur le réseau de transport, pendant une durée prédéfinie. 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. 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 considérés, un bus effectuant un bloc par jour. De plus, les bus électriques ont besoin de se recharger chaque nuit, grâce à un ensemble homogène de chargeurs situés au dépôt. En conditions réelles, ces 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. Un deuxième niveau de décision concerne le dimensionnement des événements de recharge des bus au dépôt entre chaque journée, de manière à ce que chaque bus puisse atteindre le premier chargeur présent dans le bloc et avoir assez d’énergie pour le terminer. Au début de la période de temps, chaque bus commence avec un état de charge initial qui lui est propre. Dans le problème, on cherche donc à ordonnancer les tâches de recharge nocturnes afin de respecter des contraintes de capacité. Ces recharges doivent être effectuées de manière à minimiser les dommages sur le long terme liés à la dégradation de la capacité de la batterie. Cela peut être fait en conservant l’état de charge entre des seuils raisonnables mais aussi en limitant le temps passé à des états de charge élevés. L’objectif du problème consiste à minimiser

le temps entre la fin d'une recharge et le début de l'utilisation de la batterie, ainsi que de minimiser les coûts de recharge des bus.

## 2 Méthodes de résolution

Pour résoudre ce problème, nous proposons plusieurs 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. Une seconde méthode, Assign-then-Schedule, consiste à optimiser la dégradation de la batterie dans un second temps. Une première étape affecte les bus aux blocs et dimensionne les tâches de rechargement nocturnes de manière à construire une solution réalisable, où les coûts de recharge sont optimisés via un programme linéaire mixte en nombres entiers. Ces tâches de rechargement sont ensuite réordonnées en aval de manière à minimiser la dégradation de la batterie. Une troisième méthode, Cyclic Assign-then-Schedule, consiste à créer en amont un planning d'affectation des bus aux blocs. L'affectation des bus aux blocs est faite entre deux jours consécutifs en minimisant l'énergie nécessaire à recharger et en maximisant le temps passé au dépôt pour cette association de blocs. Le planning est créé en répétant cette même association pendant le reste de l'horizon de planification considéré. On applique ensuite la méthode Assign-then-Schedule pour prendre les décisions restantes, où les décisions liées à l'affectation des blocs aux bus sont fixées. De plus, d'autres méthodes ont été développées afin d'imiter le processus actuel de recharge qui s'effectue seulement sur une journée, tel qu'on peut trouver dans le monde industriel, et de pouvoir observer l'intérêt de considérer plusieurs jours. Ces méthodes prennent uniquement en compte la journée à venir, avec impossibilité de compenser une grosse demande de recharge pendant un autre jour. Deux méthodes ont été développées, l'une charge le minimum possible ce qui se traduit par une minimisation des coûts de recharge, l'autre charge le bus au maximum avant qu'il ne reparte effectuer un bloc, on cherche donc à charger le plus possible ce qui se traduit par une maximisation de la quantité et donc des coûts de recharge.

## 3 Conclusion

Dans cette étude, nous proposons une formulation du problème d'ordonnement d'opérations de recharge nocturne de bus électriques sur plusieurs jours. Le problème est résolu tout d'abord avec un programme linéaire mixte en nombres entiers. D'autres méthodes sont aussi proposées, des heuristiques permettant de prendre certaines décisions en amont ou en aval de la résolution du programme linéaire. Les résultats expérimentaux présentés lors de la conférence ROADEF 2022 montreront les bénéfices de chacune des méthodes. D'autres heuristiques sont aussi proposées afin de montrer l'intérêt de considérer plusieurs jours en résolvant le problème.

## Références

- [1] Froger, Mendoza, Jabali, Laporte (2021). The electric vehicle routing problem with capacitated charging stations. *HAL*, hal-02386167v2.
- [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 (2018). Charge scheduling for electric freight vehicles. *Transportation Research Part B : Methodological*, 115, 246-269.
- [4] 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.
- [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.