

# Problème d’emplacement de bornes de recharge dans les réseaux de transport avec bus hybrides

Pierre Vendé<sup>1,2</sup>, Jorge E. Mendoza<sup>1</sup>, Yannick Kergosien<sup>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> Université de Tours, LIFAT, EA 6300, ERL CNRS ROOT 7002, Tours, France  
yannick.kergosien@univ-tours.fr

**Mots-clés :** *Problème d’emplacement de bornes de recharge, Bus hybrides, Réseau de transport de bus, Branch-and-check.*

## 1 Description de la problématique

Le déploiement de bus électriques dans un réseau de transport en commun représente une première étape dans la limitation de nos émissions de gaz à effet de serre. Ces bus nécessitent l’installation de bornes de rechargement, le long des lignes, en fin des lignes ou au dépôt. L’utilisation de ces bornes le long des lignes permet recharger plus souvent ce qui rend possible l’utilisation de batteries plus petites et donc moins onéreuses. Cependant, à cause du prix des bornes de recharge, un nombre limité de bornes peuvent être installées à des arrêts stratégiques permettant de mutualiser leur utilisation entre plusieurs lignes. Ce nombre limité de bornes implique également que le réseau de transport ne peut pas être entièrement « électrifié » et nécessite l’exploitation de bus hybrides. Dans cette étude, nous considérons donc un problème d’emplacement de bornes de recharge dans un réseau de transport utilisant des bus hybrides et des bornes de recharge partagées.

Le problème peut être décrit de la manière suivante. Soit  $G(V, A)$  un réseau de transport public avec  $V$  un ensemble de sommets (représentant les arrêts de bus), et  $A$  un ensemble d’arcs (représentant les trajets sur la route entre les différents arrêts). Soit  $L$  l’ensemble des lignes de bus du réseau et  $G_l(V_l, A_l)$  le sous-graphe de  $G$  représentant la ligne  $l$ . Ce réseau de transport est couvert par une flotte homogène de bus hybrides et ont une batterie de capacité  $Q$ . Les bus peuvent changer de mode de conduite (entre électrique et essence) à n’importe quel arrêt  $i$  mais pas pendant les trajets entre des arrêts. Les bus d’une ligne passent selon une fréquence fixe  $f_l$  et ne peuvent pas s’arrêter à une station de chargement à l’arrêt  $i$  plus de  $w_{li}$  unités de temps. Ce temps d’attente maximum est associé à la qualité de service de la ligne. À cause de leur moteur électrique, les bus ont besoin d’énergie fournie par un ensemble homogène de bornes de recharge qui doivent être situées à des arrêts dans le réseau. Installer un chargeur à l’arrêt  $i$  encourt un coût  $c_i$ . Bien que le coût d’un chargeur soit fixe, le coût d’installation varie dépendamment de l’emplacement à cause des aménagements d’installations à prévoir. Un arc  $(i, j) \in A$  a une distance  $d_{ij}$ , un temps de voyage  $tt_{ij}$ , une consommation en énergie électrique  $e_{ij}$  et un mode de conduite  $m_{ij}$  indiquant si l’utilisation du moteur électrique est obligatoire.

L’objectif du problème est de décider i) le nombre de chargeurs  $x_i$  à installer à chaque arrêt  $i \in V$  (décisions infrastructurelles), ii) le mode de conduite  $y_{lij}$  sur l’arc  $(i, j) \in A$  d’un bus couvrant la ligne  $l$  (décisions de sélection du mode de conduite), et iii) la durée de chargement  $t_{li}$  d’un bus couvrant la ligne  $l \in L$  à chaque chargeur  $i \in V_l$  (décisions de chargement). Le principal objectif est de maximiser la distance totale couverte par la flotte en mode électrique. Le second objectif est de minimiser le budget utilisé pour l’installation des chargeurs. En plus des contraintes de niveau de service, une solution doit vérifier trois contraintes additionnelles :

l'investissement total dans l'installation des chargeurs ne doit pas excéder un budget maximal fixé, les bus ne doivent pas attendre pour utiliser les chargeurs, certains trajets doivent être couverts en utilisant le mode électrique dans un objectif de limitation de la pollution sonore et de protection des bâtiments (à cause des particules de pollution).

## 2 Méthode de résolution

Pour résoudre ce problème, il faut déterminer l'emplacement des chargeurs sur le réseau puis pour chaque ligne, déterminer l'heure de passage des bus à chaque arrêt, les trajets effectués en mode électrique ou en mode classique et la durée de chargement des batteries à chaque borne de recharge. Cependant, un chargeur installé un l'arrêt peut être utilisé par n'importe quel bus couvrant une ligne passant par cet arrêt. Ainsi, des incompatibilités peuvent apparaître pour certaines bornes de recharge si des événements de chargement se chevauchent. C'est pourquoi il faut chercher d'éventuelles incompatibilités, en ordonnant toutes les opérations de chargement sur chaque chargeur, à chaque fois qu'une solution est trouvée. La méthode de résolution proposée s'inspire de l'algorithme Branch and Check [2]. La méthode s'appuie sur la résolution de deux modèles mathématiques, un modèle principal et un modèle de faisabilité. Le modèle principal choisit l'infrastructure, le mode de conduite, les décisions de chargement, en cherchant à maximiser la distance totale couverte en mode électrique, tout en vérifiant que la contrainte liée au budget soit respectée. En utilisant une solution du modèle principal, le modèle de faisabilité vérifie si, pour chaque ligne, il existe un planning de chargement qui garantit les fréquences de passage. Durant la résolution du premier modèle, à chaque fois qu'une solution réalisable est trouvée et améliore la borne supérieure, le modèle de faisabilité est résolu pour vérifier s'il existe un planning de chargement. Si un tel planning est trouvé, la nouvelle solution entière est acceptée.

Le problème étudié a deux objectifs : maximiser la distance totale couverte par la flotte en mode électrique et minimiser le budget utilisé pour l'installation des chargeurs. Cependant, ces deux objectifs n'ont souvent pas la même importance. Étant donné que le modèle principal prend une contrainte de budget maximal, il est plus important de maximiser la distance totale couverte en mode électrique. Ainsi, nous utilisons une méthode lexicographique pour optimiser les deux objectifs. Tout d'abord, nous résolvons le problème avec l'objectif de première importance. Cela permet de borner une contrainte d'électrification du réseau, cette contrainte est ajoutée au modèle. Le modèle modifié est ensuite résolu avec l'objectif de seconde importance.

## 3 Conclusion

Dans cette étude, nous proposons une formulation du problème d'emplacement de bornes de recharge, sous l'hypothèse de l'utilisation de bus hybrides et de partage des bornes. Le problème est résolu en s'inspirant de l'algorithme de Branch-and-check et par une méthode lexicographique afin de maximiser la distance parcourue en utilisant le moteur électrique et de minimiser le budget dépensé, tout en s'assurant qu'un planning de chargement réalisable existe. Les résultats expérimentaux présentés lors de la conférence ROADEF 2021 montreront les bénéfices du partage des bornes aux niveaux opérationnel et économique et les bénéfices des bus hybrides.

## Références

- [1] Kunitz, Mendelevitich, Goehlich. Electrification of a city bus network. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(10), 707-720, 2017.
- [2] Thorsteinsson. *Branch-and-check : A hybrid framework integrating mixed integer programming and constraint logic programming*. Paper presented at the International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, 2001.