
La distribution par des véhicules électriques

Bay M.¹, Limbourg S.²

¹ University de Liège, HEC Liège, QuantOM, Rue Louvrex 14, 4000 Liège, Belgique Maud.Bay@ulg.ac.be

² University de Liège, HEC Liège, QuantOM, Rue Louvrex 14, 4000 Liège, Belgique Sabine.Limbourg@ulg.ac.be

RÉSUMÉ. L'objectif des problèmes de tournées de véhicules est la conception d'itinéraires efficaces pour fournir des biens d'un dépôt à un ensemble de clients satisfaisant des contraintes spécifiques. Les variantes classiques de ces problèmes considèrent que les routes sont effectuées par des véhicules alimentés par des moteurs à combustion interne. Ces véhicules ont une grande autonomie, le réseau d'approvisionnement est dense et le temps nécessaire au ravitaillement peut être négligé. En revanche, en raison d'une plus petite autonomie, du temps nécessaire pour recharger la batterie des véhicules électriques (VE) et de la disponibilité limitée des infrastructures de recharge, les algorithmes de tournées de VE doivent être développés. Maximiser l'autonomie entre deux recharges conduit à examiner les principaux facteurs de consommation d'énergie qui sont : le poids du véhicule et sa charge, l'efficacité du moteur, la vitesse, la conduite, la pente de la route et les possibilités de recharge du véhicule pendant la conduite. Les résultats de cette recherche permettront la gestion optimale de la logistique urbaine où la livraison de nuit, rendue possible par l'usage de ces véhicules silencieux, reste un des grands intérêts.

ABSTRACT. The objective of vehicle routing problems is to design a set of efficient vehicle routes to provide goods from a depot to a set of customers satisfying specific constraints. Classical variants of these problems consider that routes are performed by internal combustion engine vehicles. These vehicles have a long and easy-to-restore driving range. However, due to the short driving range, long battery recharging times and the limited availability of charging infrastructure, routing algorithms for EV need to be developed. Maximizing the driving range of the vehicle leads to an examination of the main factors in energy consumption which are: the mass of the vehicle and its payload, engine efficiency, vehicle speed, the drive pattern, road grade, and vehicle recharge ability while driving. Results from this research will provide an optimal management of urban logistics where night delivery, through the use of those silent vehicles, remains one of the main benefits.

MOTS-CLÉS : Véhicules électriques, minimisation de l'énergie, distribution durable, gestion de la batterie, problème du voyageur de commerce

KEYWORDS: Electric vehicles, energy minimization, sustainable distribution, battery management, Travelling salesman problem

1. Introduction

Le livre blanc sur les transports [COM 11], adopté par la Commission européenne, présente une feuille de route pour un système de transport européen plus compétitif et durable. L'un des objectifs est de parvenir à une logistique sans CO_2 dans les grands centres urbains en 2030 par le développement et le déploiement de carburants et des systèmes de propulsion nouveaux et durables. La suppression progressive des véhicules alimentés par des moteurs à combustion interne de l'environnement urbain contribue à réduire la dépendance au pétrole, les émissions de gaz à effet de serre, la pollution atmosphérique et le bruit.

Les problèmes de tournées de véhicules peuvent être décrits comme un problème de conception d'itinéraires efficaces pour fournir des biens d'un dépôt à un ensemble de clients satisfaisant des contraintes spécifiques. D'un point de vue économique, l'application de techniques d'optimisation pour résoudre ces problèmes a conduit à des économies allant de 5% à 20% des coûts de transport aux USA et dans l'UE [TOT 01]. De même, les avantages environnementaux ont été remarquables en contribuant à réduire la congestion et le bruit généré par le transport de marchandises.

En raison d'une plus petite autonomie, du temps nécessaire pour recharger la batterie des véhicules électriques (VE) et de la disponibilité limitée des infrastructures de recharge, les algorithmes de tournées de VE doivent être développés. Maximiser l'autonomie entre deux recharges, ou le niveau d'énergie (état de charge de la batterie) à destination, conduit à examiner les principaux facteurs de consommation d'énergie qui sont : le poids du véhicule et sa charge, l'efficacité du moteur, la vitesse, la conduite, la pente de la route et les possibilités de recharge du véhicule pendant la conduite, comme la capture de l'énergie cinétique sur les chemins de descente ([BEK 11]). Les résultats de cette recherche permettront la gestion optimale de la logistique du dernier kilomètre dans des zones urbaines où la livraison de nuit (tôt le matin ou tard le soir), rendue possible par l'usage de ces véhicules silencieux, reste un des grands intérêts.

L'objectif est donc de déterminer la route consommant le moins d'énergie plutôt que la plus courte (ou la moins coûteuse). Toutefois, puisque le développement des véhicules électriques est récent, l'adaptation des problèmes de routage aux caractéristiques de VE est encore rare. [PEL 16] présentent une revue de la littérature sur les recherches dans ce domaine.

Notre papier se concentre sur le problème du voyageur de commerce (Travelling salesman problem en anglais) pour un VE (E-TSP) : étant donnés n clients, l'objectif est de trouver le cycle hamiltonien qui maximise le niveau d'énergie disponible à la fin de la tournée sachant qu'il n'y a pas de recharge. Cet objectif maximise l'autonomie du véhicule alors que le problème classique détermine un plus court chemin qui visite chaque client une et une seule fois et qui retourne au dépôt de départ. C'est un défi algorithmique, puisque les coûts de l'énergie peuvent être négatifs en raison de la capture d'énergie cinétique sur les chemins de descente et que la capacité de la batterie est limitée. La section 2 présente la formulation mathématique, la section 3 discute des premiers résultats avant de conclure.

2. Formulation mathématique

L'E-TSP est défini sur un graphe complet $G = (N, A)$ où N est l'ensemble des nœuds indexés par $i, j \in \{0, \dots, n+1\}$ et $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$ est l'ensemble des arcs. L'ensemble $N \setminus \{0, n+1\}$ dénote la localisation des clients tandis que le dépôt unique est dupliqué en un dépôt origine, identifié comme nœud 0 lorsque le véhicule commence sa tournée, et un dépôt destination, identifié comme nœud $n+1$, où le véhicule termine sa tournée. Une tournée devient ainsi un chemin hamiltonien à partir de 0 et se terminant à $n+1$.

Une distance d_{ij} , un angle correspondant à la pente de la route θ_{ij} et une vitesse limite $[v_{ij}^{min}, v_{ij}^{max}]$ sont associés à tous $(i, j) \in A$. Le temps de parcours du véhicule est limité à T . L'énergie dépensée ou récupérée, e_{ij} , pour parcourir un arc $(i, j) \in A$ est égale à la puissance totale p_{ij} déployé (resp. capturé) moins la puissance p_{ij}^{aux} utilisée pour les appareils auxiliaires (tels que l'air conditionné). La demande de chaque client $i \in N$ est représentée par q_i et il n'y a pas de demande du dépôt ($q_0 = q_{n+1} = 0$). Un véhicule, initialement situé au dépôt, a des capacités suffisante de chargement et de batterie pour trouver un itinéraire satisfaisant toutes les demandes.

Le niveau de la batterie ne dépasse jamais la capacité maximale, C , et doit toujours être non négative puisque la batterie ne peut pas être déchargée en dessous de zéro. Les paramètres techniques du véhicule et le modèle de consommation d'énergie sont donnés. La tournée commence et se termine au dépôt ; et chaque client est visité une fois exactement. L'objectif de l'E-TSP est de maximiser le niveau L de l'énergie disponible (ou état de charge de la batterie) à la fin de la tournée. Au début de la tournée, le niveau disponible d'énergie L_0 est connu. Le niveau d'énergie est limité par la capacité maximale de la batterie et ne la dépasse jamais même si plus d'énergie pourrait

être disponible grâce à la récupération. Comme, le niveau L_j d'énergie disponible à chaque noeud $j \in N$ ne peut pas tomber en dessous de zéro ; le niveau d'énergie peut être calculée comme suit :

$$L_j = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{i=0}^n (L_i - e_{ij}) x_{ij} \leq 0 \\ C & \text{if } \sum_{i=0}^n (L_i - e_{ij}) x_{ij} \geq C \\ \sum_{i=0}^n (L_i - e_{ij}) x_{ij} & \text{otherwise.} \end{cases}$$

et le modèle mathématique du E-TSP :

$$\text{Maximize } L_{n+1} \quad (1)$$

subject to :

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \setminus \{n+1\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (3)$$

$$u_0 = 1; u_{n+1} = n + 2 \quad (4)$$

$$1 \leq u_i \leq n + 2 \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (n + 1)(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in N, j \in N \setminus \{0\} \quad (6)$$

$$y_{ij}^l \leq x_{ij} \quad \forall i, j, l \in N \quad (7)$$

$$y_{il}^l \geq x_{il} \quad \forall i \in N, l \in N \setminus \{0\} \quad (8)$$

$$u_j - u_i + y_{ij}^l (n + 1) + (1 - x_{ij}) 2(n + 1) \geq 0 \quad \forall i, j, l \in N \quad (9)$$

$$u_j - u_i - (1 - y_{ij}^l) (n + 1) - (1 - x_{ij}) 2(n + 1) \leq 0 \quad \forall i, j, l \in N \quad (10)$$

$$0 \leq L_i \leq C \quad \forall i \in N \quad (11)$$

$$L_j = \sum_{i=0}^n (L_i - e_{ij}) x_{ij} - s_j \quad \forall j \in N \quad (12)$$

$$e_{ij} = (p_{ij} + p_{ij}^{aux}) \frac{d_{ij}}{v_{ij}} \quad \forall (i, j) \in A \quad (13)$$

$$p_{ij} = M_{ij} g v_{ij} \sin \theta_{ij} + 0.5 c_d \rho A v_{ij}^3 + c_r M_{ij} g v_{ij} \cos \theta_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (14)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} \frac{d_{ij}}{v_{ij}} \leq T \quad (15)$$

$$v_{min} \leq v_{ij} \leq v_{max} \quad \forall (i, j) \in A \quad (16)$$

$$x_{ij}, y_{ij}^l \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, l \in N \quad (17)$$

$$u_i \in N, s_j \in R_+ \quad \forall i \in N, \forall j \in N \quad (18)$$

La fonction objectif (1) consiste à maximiser le niveau d'énergie disponible à la fin de la tournée. Les contraintes (2) indiquent que le véhicule quitte chaque noeud i exactement une fois, et les contraintes (3) qu'un véhicule arrive à un noeuds j exactement une fois. Les contraintes (4)-(6) veillent à exclure les tournées n'incluant pas tous les noeuds en utilisant les variables entières u_i , $i \in N$, qui déterminent le numéro de séquence dans laquelle le noeuds i est visité comme dans la formulation de Miller-Tucker-Zemlin [MIL 60]. Les contraintes (4) garantissent que les noeuds de départ et d'arrivée sont le dépôt. Les contraintes (5) assurent que, pour chaque noeud i , à l'exclusion du dépôt, la variable entière u_i est comprise entre 2 et $n + 1$. Les contraintes (6) définissent l'ordre de visite de chaque noeuds : si $x_{ij} = 1$, le noeuds suivant j doit satisfaire aux contraintes $u_j \geq u_i + 1$; sinon si $x_{ij} = 0$, les contraintes (6) deviennent $u_i - u_j \leq n - 1$ ce qui est toujours satisfait si $2 \leq u_j$ et $u_i \leq n + 1$. Les contraintes (7)

garantissent que si $x_{ij} = 0$ (c'est-à-dire que l'arc (i, j) n'est pas dans la tournée) alors il n'y a pas de chargement transporté sur cet arc : $y_{ij}^l = 0$. Sinon, si $x_{ij} = 1$, les contraintes (8) et (9) imposent que $y_{ij}^l = 1$ pour tous les arcs (i, j) tels que $u_i \geq u_j$. Notons que pour les nœuds déjà visités, $u_i < u_j$, $y_{ij}^l = 0$ en raison de (10). Les contraintes relatives au niveau de charge de la batterie (11)-(12) impliquent que ce niveau, L_i , ne peut pas être inférieur à zéro ni excéder la capacité de la batterie, s_j est une variable d'écart non négative qui permet d'inclure les arcs pour lesquels le gain d'énergie seraient trop important par rapport à la capacité de la batterie, en n'effectuant pas de stockage au-delà de cette limite. Puisque la fonction d'énergie est monotone sur chaque arc, les contraintes au niveau de chaque nœud impliquent que cette propriété est valide sur tout le parcours d'un arc. Les contraintes (13) représentent l'énergie e_{ij} requise (resp. produite) quand le véhicule parcourt l'arc, et les contraintes (14) définissent la puissance p_{ij} nécessaire pour vaincre la gravité, la traînée et la force de résistance au roulement ([BEK 11]), p_{ij} est négative lorsque l'énergie est récupérée. Dans ce modèle, nous considérons que la vitesse est constante sur un arc (accélération est nulle). Dans l'équation (14), $M_{ij} = M_E + \sum_{l=1}^n q_l y_{ij}^l$ est la masse du véhicule (en kg), c'est-à-dire masse de véhicule vide, M_E , plus les quantités transportées sur l'arc (i, j) ; g est la constante gravitationnelle ($9.81 m/s^2$), ρ est la densité de l'air (kg/m^3), A est la surface frontale du véhicule (en m^2), c_r et c_d sont les coefficients adimensionnels de résistance au roulement et de la traînée, respectivement. Comme dans le modèle développé par [BEK 11] tous les paramètres sont constants sur un arc donné, mais la charge et la vitesse peuvent varier d'un arc à l'autre. La contrainte (15) assure que le temps de parcours maximum ne soit pas dépassé. Les contraintes (16) définissent les bornes inférieures et supérieures pour la vitesse sur chaque arc. Finalement, les contraintes (17)-(18) sont les conditions binaires et de non-négativité sur les variables.

La formulation mathématique conduit à un modèle non linéaire avec des variables mixtes (discrètes et continues). En effet, les variables de décision utilisées dans la formulation sont un ensemble de variables binaires x_{ij} égales à 1 si et seulement si l'arc (i, j) est dans la tournée; un ensemble de variables binaires $y_{ij}^l = 1$ si et seulement si l'arc (i, j) est dans la tournée et la demande du client l , q_l , transportée sur cet arc; et un ensemble de variables v_{ij} , associées à la vitesse du véhicule sur l'arc (i, j) , qui vont de v_{min} à v_{max} . Le niveau d'énergie disponible est défini à l'aide d'un modèle de consommation d'énergie proposé et testé dans la littérature ([BEK 11]) dans lequel le poids du véhicule, la vitesse et la pente de la route sont considérés.

3. Résultats

Pour résoudre notre modèle de programmation non linéaire en variables mixtes, l'algorithme de décomposition par Outer Approximation initialement proposé par [DUR 86] est utilisé grâce à l'outil d'optimisation AIMMS, un acronyme pour Advanced Interactive Multidimensional Modeling System. Dans [POL 15], une synthèse des instances de référence sur les problèmes de routage avec des contraintes de chargement est fournie. Pour chaque instance, les références des articles qui les utilisent et le lien vers le site sont donnés. Comme nous sommes les premiers à étudier E-TSP avec des contraintes de chargement et la prise en compte de la pente, de nouvelles instances de référence ont été générées. Les distances entre les clients, l'élévation de différents endroits et la pente ont été prises en compte pour assurer la cohérence de l'ensemble de données. Aussi des valeurs réalistes ont été choisies pour les caractéristiques du véhicule utilitaire : $M_E = 2220$ kg, la charge utile est 770 kg, les coefficients aérodynamiques ($A = 3.2$ m^2 , $c_r = 0.015$, $c_d = 0.4$ et $\rho = 1.225$ kg/m^3), $C = L_0 = 24$ kwh, $p_{ij}^{aux} = 1000$ W $\forall i, j \in N$. Nous supposons que la valeur minimale de la vitesse est 5 m/s = 18 km/h et que la valeur maximale de la vitesse est 33.33 m/s ≈ 120 km/h.

Une pratique de plus en plus courante en logistique urbaine est la création de centres de consolidation urbains (CCU) pour traiter le problème de livraison du dernier kilomètre. Les CCU sont situés à proximité de la zone urbaine et fonctionnent comme une jonction entre les zones urbaines et interurbaines dans la chaîne de transport. Le tableau 1 reprend le dépôt, localisé à la rue Ernest Solvay et 5 clients. La figure 1 représente la tournée optimale qui a une distance de 16.992 km, lorsque chaque client a une demande de 10 kg. Les évolutions de la vitesse et du niveau de la batterie en fonction de la limite de temps sont représentées à la figure 2.

Dans ce qui suit, l'impact de la variation de la quantité à transporter est examinée. Nous supposons que chaque client a toujours une demande de 10 kg sauf un client qui a une demande de 700 kg. Dans le cas 1, 700 kg doivent être transportés au Sart Tilman, dans le cas 2 à Tilff, le cas 3 à Embourg, le cas 4 à Magotteaux et le cas 5 à Belle-île. Dans tous ces cas, la vitesse optimale est de 50.98 km/h pour une limite de temps de parcours fixé à 1200s. Le routage optimal pour les cas 3, 4 et 5 sont identiques à la figure 1 tandis que le routage optimal pour les cas 1 et 2 est représenté à la figure 3. La figure 4 représente les évolutions du niveau de batterie le long de chaque itinéraire pour chaque cas. Notons qu'il y a une récupération d'énergie entre Embourg et Magotteaux pour les cas 1 et 2 et entre le Sart Tilman et le dépôt dans les autres cas.

Tableau 1. Centres de consolidation urbains : CCU case.

| Name | Latitude | Longitude | Elévation (m) | Chargement (kg) |
|-----------------------|-----------|-----------|---------------|-----------------|
| Rue E. Solvay (Depot) | 50.610059 | 5.564638 | 65 | 0 |
| Belle-ile | 50.615870 | 5.593285 | 72 | 10 |
| Tilff | 50.563340 | 5.595421 | 177 | 10 |
| Embourg | 50.591451 | 5.617160 | 188 | 10 |
| Magotteaux | 50.603652 | 5.640281 | 112 | 10 |
| Sart Tilman | 50.57819 | 5.57965 | 213 | 10 |

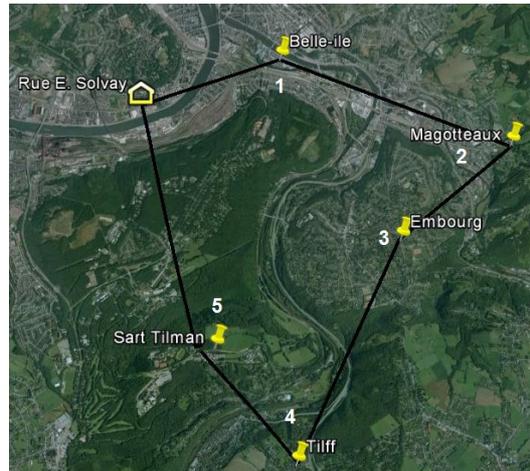


Figure 1. CCU : routage optimal lorsque chaque client a une demande de 10 kg.

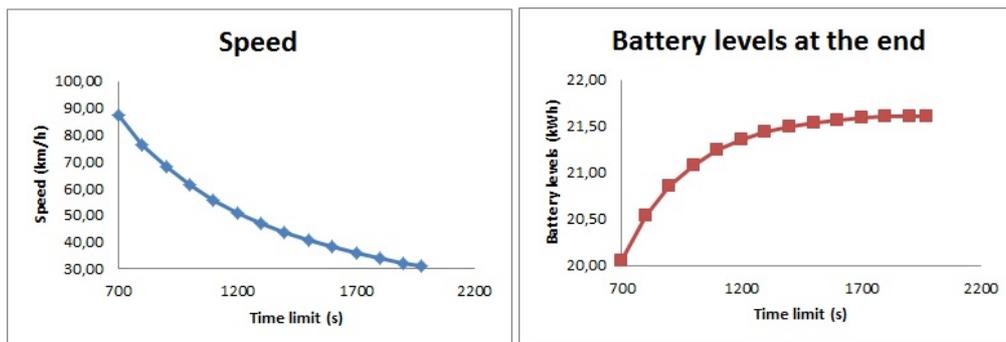


Figure 2. Vitesse et niveau de la batterie

4. Conclusions

Cet article présente un nouveau modèle de TSP utilisant des véhicules électriques. Le problème est de livrer chaque client et d'optimiser l'état de charge de la batterie à la fin de la tournée. Puisque le temps nécessaire au chargement de la batterie est important, cette opération est interdite pendant le routage dans notre modèle. Une caractéristique importante de notre approche est que la formulation générique ne se limite pas à un type spécifique de véhicules.

Afin de tester le modèle, de petites instances représentent des cas réels. Les distances entre les clients, l'élévation de différents endroits et la pente des routes ont été prises en compte. Le but est de vérifier la validité du modèle et d'obtenir des indications utiles pour le développement d'algorithmes pour des problèmes réalistes de grande taille.

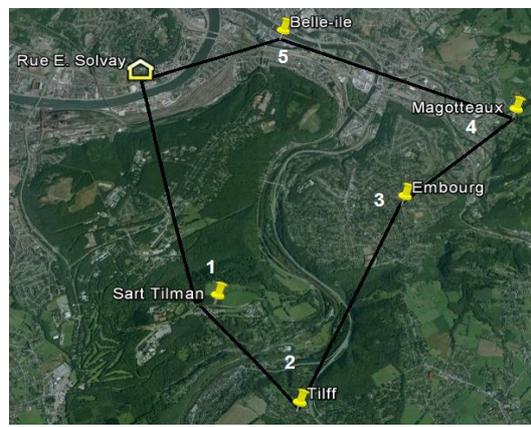


Figure 3. Cas : Tilff, Sart Tilman.

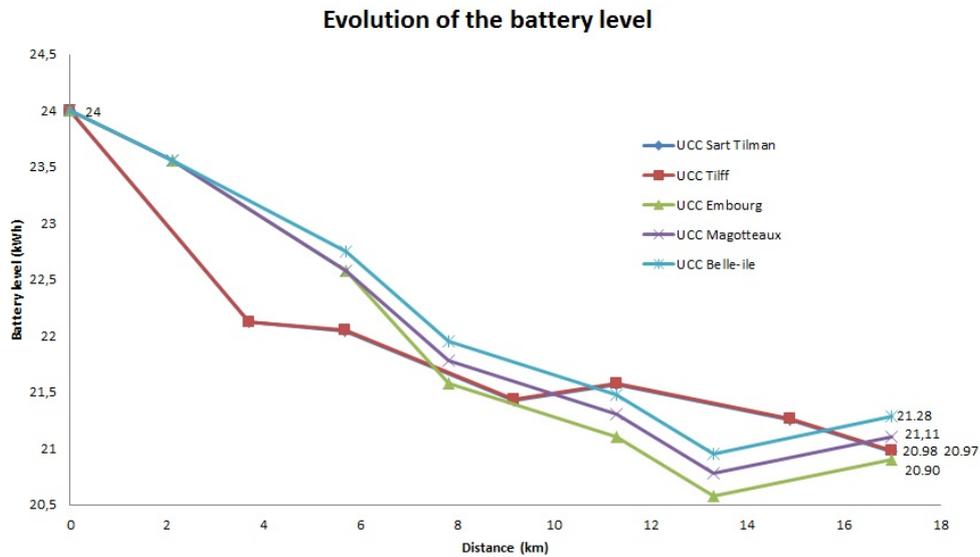


Figure 4. Evolutions du niveau de la batterie pendant la tournée pour chaque cas.

Les résultats de ce modèle peuvent contribuer à améliorer l'environnement urbain et la mobilité des villes. Les chemins optimaux obtenus permettent de réduire la consommation d'énergie et d'avoir la recharge la plus efficace du véhicule pendant la conduite. De plus, les demandes plus lourdes sont déchargées en priorité tandis que les demandes plus légères sont déchargées plus tard. Une vitesse plus lente permettra de réduire la congestion sur les routes, le nombre d'accidents et leur gravité.

Les résultats peuvent également fournir de l'aide dans le processus de prise de décision. Par exemple, l'élévation de l'emplacement du dépôt ne devrait pas être trop élevée car il est probable que, au début de la tournée, le niveau d'énergie soit à la capacité maximale. En outre, certaines rues ou routes seront souvent prises dans une direction spécifique au profit, par exemple de la pente de descente. Cela peut être un support pour déterminer les rues à sens unique.

Une étude réalisée par [PEL 16] révèle que les véhicules électriques sont appropriés pour les arrêts fréquents car ils ont système de récupération d'énergie au freinage, des longueurs de route restreintes et de faibles vitesses de déplacement. La réduction de la pollution et du bruit sont également des facteurs pertinents qui encouragent l'utilisation de véhicules électriques dans les zones urbaines.

Remerciements

Ce projet a été partiellement financé par le pôle d'attraction interuniversitaire initié par la Politique scientifique fédérale (subvention P7/36). Ce article, cependant, n'exprime que le point de vue des auteurs.

5. Bibliographie

- [BEK 11] BEKTAŞ T., LAPORTE G., « The Pollution-Routing Problem », *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 45, n° 8, p. 1232 - 1250, 2011, Supply chain disruption and risk management.
- [COM 11] COMMISSION E., *White Paper - Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and Resource Efficient Transport System*", 2011.
- [DUR 86] DURAN M. A., GROSSMANN I. E., « An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs », *Mathematical Programming*, vol. 36, n° 3, p. 307–339, 1986.
- [MIL 60] MILLER C. E., TUCKER A. W., ZEMLIN R. A., « Integer programming formulations and traveling salesman problems », *J. ACM*, vol. 7, p. 326 - 329, 1960.
- [PEL 16] PELLETIER S., JABALI O., LAPORTE G., « 50th Anniversary Invited Article—Goods Distribution with Electric Vehicles : Review and Research Perspectives », *Transportation Science*, vol. 50, n° 1, p. 3-22, 2016.
- [POL 15] POLLARIS H., BRAEKERS K., CARIS A., JANSSENS G. K., LIMBOURG S., « Vehicle routing problems with loading constraints : state-of-the-art and future directions », *OR Spectrum*, vol. 37, n° 2, p. 297–330, Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [TOT 01] TOTH P., VIGO D., « The Vehicle Routing Problem », chapitre An Overview of Vehicle Routing Problems, p. 1–26, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, 2001.