Brussels Studies

La revue scientifique pour les recherches sur Bruxelles
/ Het wetenschappelijk tijdschrift voor onderzoek over
Brussel / The Journal of Research on Brussels
Collection générale | 2021

Quels modèles pour le déploiement d'une infrastructure de recharge publique pour véhicules électriques en Région de Bruxelles-Capitale ?

Welke modellen voor de uitrol van publieke laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest?

Possible models for the roll-out of a public charging infrastructure for electric vehicles in the Brussels-Capital Region

Quentin De Clerck et Lieselot Vanhaverbeke

Traducteur : Céline Ponsard

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/brussels/5807>

DOI : 10.4000/brussels.5807

ISSN : 2031-0293

Éditeur

Université Saint-Louis Bruxelles

Référence électronique

Quentin De Clerck et Lieselot Vanhaverbeke, « Quels modèles pour le déploiement d'une infrastructure de recharge publique pour véhicules électriques en Région de Bruxelles-Capitale ? », *Brussels Studies* [En ligne], Collection générale, n° 162, mis en ligne le 07 novembre 2021, consulté le 06 décembre 2021. URL : <http://journals.openedition.org/brussels/5807> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/brussels.5807>

Ce document a été généré automatiquement le 6 décembre 2021.

Licence CC BY

Quels modèles pour le déploiement d'une infrastructure de recharge publique pour véhicules électriques en Région de Bruxelles-Capitale ?

Welke modellen voor de uitrol van publieke laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest?

Possible models for the roll-out of a public charging infrastructure for electric vehicles in the Brussels-Capital Region

Quentin De Clerck et Lieselot Vanhaverbeke

Traduction : Céline Ponsard

NOTE DE L'ÉDITEUR

Pour voir les figures dans une meilleure résolution, accédez à l'article en ligne et cliquez sur « Original » en dessous de celles-ci.

Liste des abréviations

- 1 BAU : Business as usual
- 2 CBC : Choice-based conjoint
- 3 CO₂ : Dioxyde de carbone
- 4 DMCLP : Dynamic Maximal Covering Location Problem
- 5 E2SFCA : Enhanced two-step floating catchment area method
- 6 MCLP : Maximal Covering Location Problem

- 7 NO_x : Oxydes d'azote
- 8 PM : Particules fines
- 9 POI : Point of interest
- 10 UE : Union européenne
- 11 VE : Véhicule électrique
- 12 VEB : Véhicule électrique à batterie
- 13 VEHR : Véhicule électrique hybride rechargeable

Introduction

- 14 Le transport de personnes contribue dans une large mesure au changement climatique en raison de l'utilisation de moteurs à combustion. En Europe, les voitures particulières sont responsables de 12 % des émissions totales de CO₂ [Commission européenne, 2018], mais à ces émissions de CO₂ s'ajoutent celles d'autres gaz à effet de serre qui peuvent s'avérer encore plus préjudiciables dans les villes densément peuplées. Parmi ces émissions plus locales, on retrouve les oxydes d'azote (NO_x) ou encore les particules fines (PM) [Van Mierlo, *et al.*, 2017]. En plus d'être nocives pour l'environnement, ces émissions le sont aussi pour la santé des citoyens. En Région de Bruxelles-Capitale, elles sont principalement issues du transport routier qui, en 2012, était à l'origine de 67 % des émissions de NO_x, de 47 % des émissions de PM_{2.5} et de 27 % des émissions de CO₂ [Willocx, 2015]. Ces valeurs pourraient être réduites en renonçant aux moteurs fonctionnant aux combustibles fossiles au profit de technologies automobiles alternatives moins émettrices. Les véhicules électriques (VE) font partie de ces solutions alternatives aux véhicules à combustion conventionnels. Comme ils ne rejettent pas d'émissions locales, ils pourraient offrir une solution pour améliorer la qualité de l'air en Région de Bruxelles-Capitale, où la zone de basses émissions, entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2018, montre la volonté régionale de s'emparer du problème. Cette zone devrait inciter les Bruxellois à verdier leur parc automobile en achetant des technologies automobiles alternatives. Or, à ce stade, l'adoption de la voiture électrique reste limitée. L'une des causes envisagées tient à la disponibilité de l'infrastructure de recharge. Tout d'abord, le déploiement des bornes de recharge progresse lentement : sans utilisateurs, les gestionnaires de bornes de recharge s'exposent à un business case déficitaire, tandis que les consommateurs ne veulent pas acheter de VE sans avoir la garantie de trouver une borne pour recharger leur véhicule. Ce dernier point s'applique d'autant plus en Région de Bruxelles-Capitale, où seuls 22 % des ménages disposent d'un emplacement de stationnement privé pour une recharge à domicile [Ermans, 2019]. Dans ce contexte, un grand réseau de bornes de recharge devrait stimuler le passage à l'électromobilité [Mersky *et al.*, 2016]. L'absence d'une vaste infrastructure de recharge en Région bruxelloise constitue donc un facteur d'entrave à l'adoption de VE. À cet égard, la Région de Bruxelles-Capitale a publié, en juin 2020, une vision sur l'infrastructure de recharge qui prévoit 11 040 bornes à l'horizon 2035 [Bruxelles Environnement, 2020]. Cette vision souligne également l'ambition régionale d'organiser la planification du déploiement au moyen de cartographies. Dans l'intervalle, la Région s'emploie depuis 2018 à mettre en place un réseau d'infrastructure publique de base, dans le cadre duquel 162 bornes de recharge ont été installées et 25 sont en attente d'approbation par le gouvernement [charge.brussels, 2021]. Cette vision et le besoin

d'une infrastructure de recharge en Région de Bruxelles-Capitale forment le point de départ de cet article.

- 15 Le déploiement de l'infrastructure de recharge s'inscrit également dans le contexte de la récente stratégie de mobilité développée par la Région de Bruxelles-Capitale, Good Move, qui a notamment pour objectif d'améliorer la qualité de l'air par des adaptations de la mobilité bruxelloise [Région de Bruxelles-Capitale, 2019]. Bien que ce plan aborde plus largement les différentes facettes de la mobilité, comme l'amélioration des transports en commun, la stimulation de l'économie collaborative, etc., la voiture reste le mode de transport le plus populaire dans la Région et doit, à ce titre, être aussi améliorée (46 % des déplacements à Bruxelles se font en voiture [Derauw *et al.*, 2019]). Pour y parvenir, la Région ambitionne de réduire le nombre de véhicules et de verdir le parc automobile bruxellois. Sachant que les VE sont moins nocifs pour la qualité de l'air dans un contexte urbain [Hooftman *et al.*, 2018], un glissement des technologies automobiles à combustion vers l'électricité marque un pas dans la direction d'une meilleure qualité de l'air dans la Région.
- 16 Dans cet article, nous présentons deux analyses complémentaires qui visent à identifier des sites pour l'installation d'une infrastructure de recharge publique pour véhicules particuliers en Région de Bruxelles-Capitale. Les deux analyses dressent une évolution de l'infrastructure de recharge en Région bruxelloise entre 2015 et 2020. Elles ont été menées pour le compte d'organismes régionaux entre 2014 et 2016, dans le cadre de deux études préparatoires à la politique.
- 17 La première analyse décrit l'accessibilité de l'infrastructure de recharge en Région de Bruxelles-Capitale et propose une méthode pour étendre l'infrastructure publique destinée à la recharge opportuniste, c.-à-d. la recharge d'un véhicule en stationnement pendant que son utilisateur effectue une activité dans les environs (shopping, attraction touristique, visite horeca...). Cette analyse se concentre donc tant sur les habitants que sur les visiteurs et peut également s'avérer pertinente pour la planification d'une infrastructure de recharge pour les voitures partagées électriques. La deuxième analyse se focalise sur la recharge résidentielle, par exemple pour les VE stationnés la nuit en voirie. Pour ce type de recharge, on utilise un modèle de localisation qui propose des sites optimaux sur la base des caractéristiques sociodémographiques des habitants. Les caractéristiques sociodémographiques des habitants servant de base à l'analyse, cette dernière se concentre surtout sur l'utilisation des bornes de recharge pour les véhicules particuliers des Bruxellois. Si les deux analyses peuvent être menées isolément pour leur usage spécifique, leurs résultats n'en sont pas moins complémentaires. Vu que cet article met l'accent sur une recharge normale (maximum 22 kW), les taxis électriques ne relèvent pas de son champ d'étude. En effet, les taxis électriques utilisent généralement des bornes de recharge rapide pour rester opérationnels plus longtemps et ont moins à gagner d'une infrastructure de recharge normale. De même, cette étude ne s'est pas penchée sur la quantification de l'impact du nombre croissant de VE sur le réseau électrique, mais elle tient néanmoins compte de l'emplacement des cabines basse tension pour limiter les coûts d'installation des bornes de recharge.
- 18 Dans la section suivante, nous dépeindrons tout d'abord la situation bruxelloise quant au nombre de VE et comparerons ces chiffres aux projections, réalisées en 2015, du nombre de VE en 2020. Dans la section 2, nous décrirons les deux méthodes utilisées dans cet article pour déterminer les sites destinés à l'infrastructure publique de

recharge opportuniste et de recharge résidentielle. Les résultats de ces deux méthodes seront ensuite abordés à la section 3. Enfin, nous concluons cet article par quelques recommandations.

1. Les véhicules électriques en Région de Bruxelles-Capitale

- 19 Début 2015, on comptabilisait en Belgique 7 402 851 véhicules immatriculés, dont 637 809 en Région de Bruxelles-Capitale [FEBIAC, 2017]. Le nombre de nouveaux véhicules immatriculés en Région bruxelloise s'élevait à 78 470 en 2014 et à 82 889 en 2015. Sur ces nouvelles immatriculations, 434 étaient des véhicules électriques en 2014 et 542 en 2015 (tant des véhicules électriques à batterie (VEB) que des véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR)) [Denys *et al.*, 2020]. Les chiffres de 2016 à 2019 indiquent que le nombre de VE achetés a continué d'augmenter. En 2016, 2017, 2018 et 2019, on dénombrait respectivement 1 016, 1 666, 1 823 et 2 357 nouveaux VE immatriculés en Région de Bruxelles-Capitale [Denys *et al.*, 2020].
- 20 Sur la base des résultats d'une précédente étude *choice-based conjoint* (CBC) réalisée pour la Flandre [Lebeau *et al.*, 2012], les prévisions de parts de marché de VEB et de VEHR pour les nouveaux véhicules immatriculés entre 2016 et 2020 reposaient sur les préférences des consommateurs en matière d'attributs de véhicules (tels que le prix d'achat, la vitesse de recharge ou l'autonomie) et sur les évolutions attendues de ces attributs. En prenant en considération les ventes réelles de 2014 et 2015, on obtient le nombre cumulé de VEB et de VEHR pour les cinq années suivantes en Région de Bruxelles-Capitale (en supposant que la tendance en Région bruxelloise soit similaire à celle observée en Flandre). Cette projection, réalisée en 2016, comprend 3 scénarios : un scénario tendanciel (*business as usual*, BAU), une politique de subventionnement et, enfin, une politique combinant subside et infrastructure. Dans le scénario BAU, les prévisions de ventes partent du principe qu'aucune mesure publique n'est prise pour stimuler l'adoption de VE. Il en résulte un total de 14 000 véhicules en 2020. Le scénario d'une politique de subventionnement mise sur l'octroi d'un incitant financier (un écobonus) pour stimuler le développement du marché. En 2016, ce bonus s'élève à 6 000 € et diminue ensuite dans le temps, à savoir 3 000 € en 2017, 2 000 € en 2018 et 1 500 € en 2019. Comparé au scénario BAU, l'effet de cette mesure incitative se traduit par une adoption plus rapide de VE et donc par un nombre cumulé de VE plus élevé en Région de Bruxelles-Capitale, à savoir plus de 16 000. Le scénario combinant subside et infrastructure s'appuie, quant à lui, sur le scénario d'une politique de subventionnement en y associant l'hypothèse d'investissements dans l'infrastructure de recharge pour augmenter le nombre de bornes de 100 unités par an. La combinaison de ces mesures, qui a également été analysée à l'aune des résultats de l'étude CBC, produirait dans un premier temps les mêmes effets que le scénario de subventionnement, mais porterait à plus long terme, à partir de 2019, le nombre total de VE à plus de 18 000 unités. Cet effet à retardement peut s'expliquer par un nombre de bornes de recharge progressif dans le temps, combiné à un incitant financier dégressif dans le temps. Les résultats de ces prévisions de la demande sur la base des différents scénarios sont représentés à la Figure 1.

Figure 1. Prévisions du nombre de VE en Région de Bruxelles-Capitale en 2016-2020

Sources : MOBI pour les projections et la visualisation et [Denys *et al.*, 2020] pour les données historiques

- 21 Si on compare les chiffres issus du scénario BAU, on constate des prévisions plus positives que les chiffres réels. Les chiffres historiques indiquent également une augmentation du nombre de véhicules immatriculés, mais le nombre d'immatriculations annuelles était en moyenne inférieur de 500 unités par rapport aux prévisions. Si on tient compte des personnes qui ont échangé leur VE contre un nouveau VE ou un autre type de véhicule ou mode de transport, le nombre total de VE immatriculés en Région de Bruxelles-Capitale s'élève, fin 2019, à 6 672 VE [Denys *et al.*, 2020]. Le nombre total réel de VE en 2019 se situe entre les projections pour 2017 et 2018 du scénario BAU et est 35 % inférieur aux prévisions. Cette comparaison avec les chiffres réels montre la difficulté d'établir des prévisions précises pour un marché qui n'en est qu'au début de son développement. Plusieurs facteurs jouent ici un rôle et, à cet égard, la plus grande incertitude entourant l'évolution des attributs de véhicules constitue un défi majeur. Des changements d'attributs, comme le prix d'achat, les coûts d'utilisation, l'autonomie, la densité de l'infrastructure de recharge ou encore la rapidité de recharge, sont tous susceptibles d'influencer les projections finales et doivent être évalués avec précision pour les années à venir. Cet exercice n'est pas simple et requiert une bonne connaissance de la technologie et des tendances du secteur. Un autre facteur susceptible d'avoir influencé les prévisions est le fait que les préférences mesurées pour les Flamands n'étaient pas totalement transposables aux Bruxellois. Cette différence de préférence peut s'observer dans l'évolution de la part de marché de VE entre 2014 et 2019 en Flandre et à Bruxelles (voir Tableau 1) [Denys *et al.*, 2020]. Nous pouvons donc conclure à la nécessité de traiter avec prudence l'utilisation des données CBC pour établir des projections, que ce soit sur le plan de l'évolution technologique ou de la préférence la plus correcte à appliquer.

Tableau 1. Évolution des parts de marché de véhicules électriques en Flandre et en Région de Bruxelles-Capitale [Denys *et al.*, 2020]

	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Région de Bruxelles-Capitale	0,55 %	0,66 %	1,31 %	2,18 %	2,42 %	3,01 %
Flandre	0,50 %	1,01 %	2,38 %	3,55 %	3,09 %	3,99 %

- 22 Si on compare la distribution spatiale de l'adoption de VE aux prévisions par commune pour 2020, représentées à la Figure 2, on remarque que les tendances sont globalement correctes¹. Les communes de Bruxelles-Ville, Ixelles, Woluwe-Saint-Lambert, Woluwe-Saint-Pierre et Uccle présentent, comme prévu, le plus haut taux d'adoption. À l'inverse, des communes affichent un taux d'adoption plus faible que prévu, telles qu'Evere, Auderghem, Molenbeek-Saint-Jean et Watermael-Boitsfort. Cette dernière commune connaît tout particulièrement une adoption plus lente que prévu, dans la mesure où elle était considérée comme un potentiel chef de file. Saint-Josse-ten-Noode, par contre, présente une adoption beaucoup plus forte qu'annoncé. L'adoption dans cette commune est surtout due au nombre croissant de voitures de société électriques. Hormis pour les communes de Watermael-Boitsfort et de Saint-Josse-ten-Noode, la répartition territoriale de l'adoption suit donc le schéma projeté, mais, comme indiqué plus haut, dans une moindre mesure que prévu en termes de chiffres. À ces exceptions près, la distribution spatiale de la demande dans le modèle de localisation peut toujours être considérée comme relativement adéquate. Ce qui nous amène à trois conclusions concernant l'utilisation des projections VE pour prédire la demande : la demande est surestimée en raison du caractère imprévisible du marché VE (qui se trouve en phase de lancement), les préférences automobiles doivent être mieux affinées au contexte spécifique de Bruxelles et, enfin, la distribution spatiale de la demande a été relativement bien projetée. Sachant que la répartition spatiale des projections est plus importante qu'une prévision précise du nombre de véhicules, l'utilisation de cette méthode ne pose pas problème tant qu'il est tenu compte de la sous-estimation des chiffres.

Figure 2. Nombre de voitures électriques dans la Région de Bruxelles-Capitale fin 2018 et mi-2019 comparé aux prévisions faites en 2015 pour 2020

Source : SPF Mobilité pour les données historiques et MOBI pour la projection et la visualisation)

2. Méthodologie

- 23 Ces sections décrivent la méthodologie utilisée pour la recharge opportuniste publique, la recharge résidentielle publique et le modèle de localisation.

2.1. Recharge opportuniste publique

- 24 Pour déterminer l'accessibilité des emplacements pour une recharge opportuniste publique, on applique la méthode « *enhanced two-step floating catchment area method* » (E2SFCA) [Luo et Qi, 2009 ; Marion *et al.*, 2015]. Dans la littérature scientifique, le terme « accessibilité » est défini comme « *l'aisance relative permettant d'atteindre une facilité ou une activité à partir d'un lieu donné* » [Luo et Wang, 2003]. Autrement dit, l'« accessibilité » exprime le rapport entre l'offre et la demande pour l'utilisation d'un certain type de facilité.
- 25 Dans cette analyse, l'accessibilité mesurera le ratio entre le nombre de points de recharge (l'offre) et le nombre de points d'adresses (la demande). Cette méthode tient compte de la distance entre la demande et l'offre, en mesurant la quantité de la demande au sein d'une zone délimitée autour de la borne de recharge. L'étendue de la zone est définie par une valeur seuil égale à une distance de marche de 9 minutes à partir de la borne. La demande est donc égale au nombre de points d'adresses situés aux alentours d'une borne de recharge. Un point d'adresses renvoie à un ou plusieurs numéros d'habitation au sein d'un bâtiment. Le point d'adresses peut être utilisé à plusieurs fins, p. ex. résidences, commerces, bureaux, écoles, loisirs, etc. Pour chaque point d'adresses, le score calculé indique dans quelle mesure ce point est desservi.

Sachant qu'un point d'adresses peut revêtir différentes fonctions, son accessibilité n'est pas uniquement calculée pour les habitants bruxellois, mais aussi pour les visiteurs ou les navetteurs qui programment une activité (shopping, visite à la famille ou aux amis, travail...) à ce point d'adresses. Ce ne sont donc pas les motifs ou profils des utilisateurs potentiels qui entrent en ligne de compte, mais bien leur quantité sur la base du nombre de points d'adresses. Cette approche souligne l'applicabilité de cette méthode pour la recharge opportuniste et les différents segments du public cible.

- 26 Pour le calcul des scores, la première étape consiste à calculer un score d'accessibilité pour chaque borne de recharge sur la base du nombre de points d'adresses situés dans la zone. Pour chaque point d'adresses, un score est calculé en additionnant les scores d'accessibilité des points de recharge présents dans son rayon (généralement 2 points de recharge par borne). Ce score est ensuite adapté en fonction, d'une part, de la distance de marche entre le point d'adresses et la borne de recharge et, d'autre part, du nombre d'autres adresses présentes dans le rayon des points de recharge. Autrement dit, plus une adresse est éloignée d'une borne de recharge ou plus il y a d'autres adresses dans la zone de la borne, moins cette borne est accessible pour cette adresse. Cette méthode livre un score par point d'adresses situé dans le rayon d'une ou plusieurs bornes. Ce score indique le degré d'accessibilité de l'infrastructure de recharge pour les points d'adresses en Région de Bruxelles-Capitale.
- 27 Trois jeux de données sont nécessaires pour appliquer la méthode E2SFCA, à savoir les données liées aux bornes de recharge, au réseau des rues et aux adresses des bâtiments en Région de Bruxelles-Capitale. Pour cette étude, nous avons utilisé la base de données administrative d'UrbIS [CIRB, 2021] pour les données de rues et d'adresses. Étant donné qu'il n'existait pas en 2015 de relevé officiel de l'infrastructure de recharge en Région bruxelloise, une liste de l'infrastructure de recharge existante a été établie sur la base de la consultation de 5 bases de données différentes (ASBE, Chargemap, Oplaadpunten.nl, Oplaadpunten.org et OpenChargeMap). Cette liste initiale a été complétée par les données obtenues auprès de certains opérateurs de bornes de recharge, avant d'être validée par une enquête de terrain pour toutes les bornes listées. Au total, 144 points de recharge ont été identifiés pour 220 004 points d'adresses en Région de Bruxelles-Capitale.

2.2. Recharge résidentielle publique : ventilation de la demande VE par îlot

- 28 L'analyse CBC précédemment réalisée [Lebeau *et al.*, 2012], qui est évoquée à la section 1, a été utilisée pour établir une projection de l'adoption de VE en Région de Bruxelles-Capitale. Vu le caractère spatial inhérent à l'analyse de localisation, la demande projetée en VE doit être attribuée aux entités spatiales sur la base d'un quadrillage plus fin. Idéalement, toutes les données sont disponibles au même niveau spatial ; ce n'est cependant pas le cas dans la pratique, d'où l'application d'une approche progressive. Ainsi, le nombre de VE immatriculés est réparti uniformément du niveau régional au niveau des îlots, ces derniers formant la plus petite entité spatiale de notre analyse. Nous calculons un *EV suitability score* pour chaque district afin de tenir compte des différences sociodémographiques sur le territoire. La suite de ce calcul repose sur les résultats du scénario BAU.

- 29 Dans la première phase d'attribution, le nombre total de VE projetés est réparti proportionnellement sur les 19 communes sur la base du nombre de nouveaux véhicules électriques immatriculés par des particuliers dans chaque commune en 2015. Vu qu'un des objectifs de cette étude est de localiser de manière optimale l'infrastructure de recharge publique au profit des habitants, seuls sont pris en considération les véhicules électriques vendus à des particuliers (voir annexe pour plus de détails).
- 30 La distribution de ce nombre est présentée sur la carte de la Figure 3. Il est à noter que dans 2 communes, Berchem-Sainte-Agathe et Saint-Gilles, aucun VE particulier n'a été immatriculé ; Uccle recense le plus grand nombre d'immatriculations. Pour simuler l'adoption de VE dans les premières communes citées, nous avons appliqué un petit facteur de correction afin d'obtenir une projection valable pour le futur.

Figure 3. Nombre total de VE possédés par des particuliers par commune en 2015

Source : SPF Mobilité pour les données historiques et MOBI pour la visualisation

- 31 Dans la phase suivante, la demande en VE (tant VEHR que VEB) est distribuée entre les différents quartiers d'une commune. Cette étape est cruciale pour tenir compte de la variation spatiale liée aux caractéristiques sociodémographiques des habitants. La base de données du Monitoring des quartiers bruxellois a ici servi de source d'information.
- 32 Notons que la Région de Bruxelles-Capitale est divisée en 118 quartiers résidentiels (où vit 99,7 % de la population), 6 zones industrielles et gares, 18 zones vertes et 3 cimetières. Dans notre analyse, nous excluons les 3 cimetières et ne disposons pas d'informations concernant les îlots de bâtiments dans les quartiers Parc des Étangs et Parc Astrid (à Anderlecht), Gare de Schaerbeek et Parc du Cinquantenaire (à Bruxelles).
- 33 Notons encore que les limites des quartiers du Monitoring ne correspondent pas nécessairement aux frontières communales. C'est pourquoi la demande d'un quartier

est calculée proportionnellement sur la base de la superficie qu'il occupe dans deux (voire, sporadiquement, trois ou quatre) communes.

- 34 Pour établir les profils sociodémographiques des habitants, nous utilisons les variables « revenu », « superficie résidentielle par habitant » et « taille du ménage » afin de ventiler la demande du niveau communal au niveau des quartiers. Un indicateur *EV suitability score* a été calculé pour chaque quartier. Ce score est multiplicativement proportionnel au revenu moyen et à la superficie résidentielle par habitant dans un quartier et inversement proportionnel à la taille moyenne du ménage. Dans la littérature scientifique Plötz *et al.* [2014]; Axsen *et al.* [2016]; Hardman *et al.* [2016], un revenu élevé et des ménages composés de plusieurs personnes sont souvent cités comme caractéristiques de ménages possédant un VE. Le revenu figure aussi parmi les critères de planification retenus pour le déploiement soutenu dans la vision de la Région de Bruxelles-Capitale [Bruxelles Environnement, 2020]. La superficie résidentielle par habitant n'est pas explicitement mentionnée dans la littérature. Cependant, dans l'étude de Plötz *et al.* [2014], les villes plus petites ou de taille moyenne sont définies comme idéales pour l'adoption de VE par rapport aux grandes villes. Et ce, pour les raisons suivantes : la possession d'un véhicule y est supérieure et on y dénombre plus de ménages possédant un emplacement de stationnement privé. Ces caractéristiques se retrouvent dans les communes disposant d'une plus grande superficie résidentielle par habitant comme Uccle, Auderghem, Woluwe-Saint-Lambert, Woluwe-Saint-Pierre et Watermael-Boitsfort [IBSA, 2018]. La demande moyenne projetée par quartier varie de 14,68 VE en 2016 à 69,45 en 2020 ; la médiane varie de 9,18 à 43,43 (voir Figure 4).
- 35 À la dernière étape de la création de points de demande pour le modèle de localisation, la demande par quartier est allouée de manière uniforme au nombre d'îlots présents dans un quartier. Un îlot est délimité par des rues ou des frontières communales. L'analyse englobe 4 992 îlots. La demande moyenne projetée par îlot varie de 0,6 VE en 2016 à 2,81 VE en 2020 ; la médiane varie de 0,26 à 1,23. Nous ne représentons pas isolément les îlots, mais ceux-ci peuvent être identifiés à l'aide des centroïdes sur la Figure 5, avec des dégradés de jaune (prévision d'une faible demande) à brun (prévision d'une forte demande). Comme mentionné à la Section 1, la demande par îlot est distribuée de manière similaire à l'adoption réelle de VE dans la Région pour mi-2019 (à l'exception de Saint-Josse-ten-Noode et de Watermael-Boitsfort). Cette approche valide, pour les autres communes, la répartition spatiale de la demande et les localisations identifiées progressivement dans le modèle de localisation dynamique.

Figure 4. Prévisions d'adoption VE par quartier

Source : MOBI

Figure 5. Prévisions d'adoption VE par îlot

Source : MOBI

2.3. Modèles de localisation pour la recharge résidentielle publique

- 36 Le but de cette analyse est d'offrir, de la perspective des pouvoirs publics, un service maximal aux habitants de la Région de Bruxelles-Capitale en installant (faisant installer) un nombre donné de bornes de recharge. Pour une modélisation mathématique, le *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) est appliqué [Church et ReVelle, 1974].
- 37 Nous considérons $d_i > 0$ comme étant la demande projetée ci-dessus en infrastructure de recharge publique dans un îlot $i \in I$. Des bornes de recharge publiques sont ouvertes sur des sites candidats $j \in J$. Un budget donné B est disponible pour l'ouverture de nouvelles bornes qui desserviront les propriétaires de VE. L'ensemble N_i indique quels lieux candidats se situent à une distance maximale d de l'îlot i .

$$N_i = \{j \in J : d_i \geq d\} \quad \forall i \in I \quad (1)$$

- 38 Le modèle MCLP est formulé intégralement ci-dessous :

$$\max \sum_{i \in I} d_i x_i \quad (2)$$

$$s.t. \sum_{j \in N_i} y_j \geq x_i \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} y_j \leq B \quad (4)$$

$$x_i \in 0, 1 \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$y_j \in 0, 1 \quad \forall j \in J \quad (6)$$

- 39 où x_i indique si un îlot est desservi par une ou plusieurs bornes de recharge publiques et y_j indique quels sites candidats ont été choisis. La fonction objectif est la maximisation du taux de desserte pour tous les îlots, compte tenu de la contrainte de surcouverture des ensembles (3) et de la contrainte budgétaire (4).
- 40 Le modèle MCLP permet d'utiliser la demande projetée ci-dessus au niveau des îlots. Dans le premier scénario, les sites candidats pour une borne de recharge sont les 1 292 cabines du gestionnaire de réseau qui sont déjà équipées d'une tension de raccordement de 400 V et d'un tableau basse tension, et pour lesquelles aucun coût substantiel ne doit être engagé pour l'alimentation électrique d'une borne. Dans le deuxième scénario, les sites candidats pour une borne de recharge sont aussi les cabines existantes du gestionnaire de réseau mais, dans ce scénario, des investissements doivent être consentis pour rendre la cabine conforme. Il s'agit de 2 345 cabines. Les deux scénarios tiennent donc compte du réseau de distribution d'électricité, qui est aussi cité comme critère de planification dans la vision de la Région de Bruxelles-Capitale [Bruxelles Environnement, 2020]. On définit un rayon d qui représente la distance qu'un habitant doit parcourir à pied jusqu'à la borne de recharge (via le réseau routier) ; le point de départ assumé est l'approvisionnement des habitants d'un îlot dans un rayon de 350 m. Le modèle maximise le service des bornes de recharge en installant le nombre donné de bornes là où la demande s'annonce la plus forte.

- 41 Le point de départ est le déploiement d'ici 2020 de 500 bornes, chacune pourvue de 2 points de recharge, soit 1 000 points de recharge. Ceci correspond à la règle empirique de 1 point de recharge par 10 VE sur la base de la projection de 14 000 véhicules et en supposant qu'une infrastructure semi-publique peut aussi desservir la demande. Pour simuler le déploiement sur plusieurs années, le *Dynamic Maximal Covering Problem* (DMCLP) est appliqué [Gunawardane, 1982]. Étant donné que la solution à long terme doit être optimale, la solution du MCLP pour l'année 2020 sert de point de départ. Ensuite, on obtient un aperçu des bornes de recharge ouvertes pour chaque année $t \in T$ (2016-2019).

$$\min \sum_{i \in I, t \in T} d_{it} x_{it} \quad (7)$$

$$s.t. \sum_{j \in N_i} y_{jt} + x_{it} \geq 1 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} y_{jt} \leq B_t \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$y_{jt} \geq y_{jt-1} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (10)$$

$$x_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (11)$$

$$y_{jt} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (12)$$

3. Résultat

- 42 Cette section aborde séparément les résultats des applications des modèles pour la recharge opportuniste publique (section 3.1) et la recharge résidentielle publique (section 3.2).

3.1. Recharge opportuniste publique

- 43 La Figure 6 présente le résultat de la méthode E2FSCA pour l'infrastructure de recharge publique en 2015. Les carrés sur la carte de la Région représentent les points de recharge. Les zones en jaune, orange et rouge représentent les points d'adresses qui se situent à une distance de marche de 9 minutes d'une borne. L'accessibilité de l'infrastructure de recharge se constate au score accordé aux points d'adresses sur la base de la demande (nombre d'autres adresses dans la zone) et du nombre de bornes de recharge accessibles pour les points d'adresses. Ce score d'accessibilité peut donc être interprété comme le nombre de points de recharge accessibles par point d'adresses, compte tenu des distances entre les points d'adresses et les points de recharge. Un score de 1 est égal à un point d'adresses qui disposerait d'un point de recharge devant sa porte, sans aucune concurrence d'autres points d'adresses. En d'autres termes, plus la couleur rouge des points d'adresses est foncée, plus l'infrastructure de recharge est accessible à proximité. Les facteurs suivants (seuls ou combinés) favorisent l'accessibilité de l'infrastructure de recharge pour un point d'adresses, à savoir une courte distance entre l'infrastructure de recharge et le point d'adresses, une plus grande offre d'infrastructures de recharge au départ du point d'adresses ou un plus faible nombre d'autres points d'adresses dans la zone autour du point de recharge. Au

total, 36 % des adresses étaient desservies par l'infrastructure en 2015, soit un peu plus d'un tiers des adresses bruxelloises.

Figure 6. Accessibilité de l'infrastructure de recharge en 2015

Source : MOBI

- 44 Les scores d'accessibilité les plus élevés sont obtenus dans les quartiers bien desservis par l'infrastructure de recharge. Dans l'ouest de la Région bruxelloise, l'infrastructure de recharge est très accessible, selon la métrique. Cela s'explique par un faible taux de concurrence dû à la très faible présence de bâtiments pour le nombre de points de recharge. Un exemple de borne située dans ce quartier est celle de l'IKEA. Il s'agit typiquement d'une borne qui sera utilisée pour des recharges opportunistes. Cette borne se situe dans un environnement comptant peu d'autres bâtiments et dans une zone commerciale, contrairement aux bornes situées dans le centre de la Région, qui se trouvent aussi dans un noyau économique et obtiennent un taux d'accessibilité raisonnable en raison de la grande quantité de bornes présentes dans le même quartier. De plus faibles scores d'accessibilité s'observent pour les bornes de recharge comptant peu d'autres infrastructures à proximité et beaucoup de bâtiments. De tels cas entraînent un taux de concurrence plus élevé pour l'utilisation des points de recharge dans ces quartiers.
- 45 Pour stimuler la recharge opportuniste, nous pourrions installer de nouvelles infrastructures publiques à proximité des pôles importants (POI) de transports en commun selon le plan Iris 2 [Région de Bruxelles-Capitale, 2011] et des parkings publics de la Région de Bruxelles-Capitale. Ces pôles importants sont des lieux spécifiques en Région bruxelloise où le transport public et la multimodalité doivent être améliorés. Un grand nombre de ces pôles sont abordés en détail dans le « Projet de Plan régional de Développement durable » [Région de Bruxelles-Capitale, 2013]. Ces lieux incluent des noyaux économiques (noyaux commerciaux, pôles d'activités tels que bureaux ou industries...), des universités, des hôpitaux, de grandes gares ferroviaires, etc. Cette

stratégie basée sur un POI désigne des sites représentatifs de destinations potentielles pour les utilisateurs de VE (outre leur lieu de travail et leur domicile) [Wagner *et al.*, 2013]. Ces emplacements permettent ainsi aux utilisateurs de VE de recharger leur véhicule pendant leurs activités dans ces POI. Le placement de bornes de recharge à proximité de POI modifierait la couverture de l'infrastructure de recharge, comme le montre la Figure 7. Quatre points de recharge sont attribués par site, ce qui correspond à deux bornes équipées chacune de deux points de recharge. Au total, on dénombre 620 points de recharge qui desservent environ 65 % des points d'adresses dans la Région, soit près de deux tiers des adresses bruxelloises. Notons aussi que les scores repris dans cette figure sont supérieurs à ceux de la Figure 6. Cela signifie que, de manière générale, l'accessibilité de l'infrastructure est améliorée.

Figure 7. Accessibilité de l'infrastructure de recharge après une approche POI

Source : MOBI

3.2. Recharge résidentielle publique

- 46 Dans le premier scénario, il est supposé que les bornes de recharge à installer doivent être placées à proximité immédiate d'une cabine basse tension.
- 47 Le résultat de l'optimisation est représenté à la Figure 8 : les points bleus indiquent les localisations optimales pour bornes de recharge en 2020.

Figure 8. Localisations optimales pour bornes de recharge en 2020 sur la base des cabines basse tension

Source : MOBI

- 48 Sur la base de cette configuration du réseau de bornes publiques, environ 11 800 des 14 000 propriétaires de VE estimés en 2020 ont accès à une station de recharge à une distance de marche de 350 m. Naturellement, ce chiffre doit être nuancé puisque seules deux voitures peuvent être raccordées simultanément à une station de recharge. Dans la pratique, le taux de service sera donc beaucoup plus faible que ce que laissent supposer les chiffres ci-dessus.
- 49 Le déploiement de l'infrastructure (en résultat du modèle dynamique) au fil des années 2016-2019 est représenté à la Figure 9. Il est clair qu'un déploiement plus intensif s'observera en premier lieu à proximité d'endroits où l'adoption estimée de VE est élevée (communes du sud-est) et qu'interviendra ensuite une distribution plus équilibrée de l'infrastructure sur l'ensemble du territoire de la Région. Autrement dit, dans un premier temps, l'infrastructure de recharge sera installée principalement dans des quartiers où vit une population aisée. Même si on trouve plus souvent dans ces quartiers des maisons dotées d'un emplacement de stationnement privé où les ménages peuvent recharger leur véhicule, on y trouve aussi des ménages qui possèdent les moyens financiers d'acheter un VE, mais ne disposent pas d'un emplacement de stationnement privé. Quand un point de recharge public est disponible dans un quartier, les ménages sans emplacement de stationnement privé peuvent être incités à passer plus facilement à la conduite électrique. Il est important de remarquer que même si on déploie en premier lieu l'infrastructure de recharge dans les quartiers plus aisés, les avantages d'un nombre croissant de VE dans la Région bénéficient à tous grâce à une meilleure qualité de l'air et à une diminution des nuisances sonores. Cette stratégie de déploiement a également pour effet favorable de rendre, durant les années de lancement, l'étude d'opportunité pour les fournisseurs de bornes de recharge plus intéressante que si l'on poursuivait un déploiement géographique uniforme sans tenir

compte de l'adoption projetée. Une étude d'opportunité favorable est importante pour garantir les investissements, étant donné que la vision de la Région de Bruxelles-Capitale prévoit qu'il reviendra aux fournisseurs de bornes de recharge de consentir ces investissements sans subsides. Éventuellement, une stratégie « la borne suit la voiture » peut venir compléter le besoin en infrastructure de recharge dans les quartiers où apparaîtrait un manque de couverture et où la demande émanerait des habitants. Cette stratégie est actuellement appliquée par PitPoint et la Région de Bruxelles-Capitale, comme décrit dans la vision régionale [Bruxelles Environnement, 2020]. Dans une phase ultérieure, le modèle DMCLP permet la poursuite du déploiement de l'infrastructure de recharge dans les quartiers dont les habitants sont financièrement moins aisés. Enfin, l'approche POI proposée pour la recharge opportuniste assure une complémentarité avec cette méthode. En effet, cette approche ne tient pas compte du revenu des ménages installés à proximité des POI et pourrait être mise en œuvre simultanément pour lutter contre les inégalités sociales.

Figure 9. Localisations optimales pour le déploiement de bornes de recharge en 2016-2019 sur la base des cabines basse tension

Source : MOBI

- 50 Sachant que le nombre de bornes de recharge est déterminant pour la qualité de la solution, c.-à-d. le taux de service, ce paramètre a également fait l'objet d'une analyse de sensibilité. Si on limite le nombre de bornes installées à 50 par an (soit 250 nouvelles bornes en 2020), le taux de service s'avère logiquement significativement moins élevé qu'avec le scénario de référence de 100 bornes par an. La Figure 10 reflète l'évolution du taux de service au fil des années en utilisant le modèle DMCLP et des paramètres de 50, 75, 100 et 125 nouvelles bornes de recharge, le dernier groupe de barres représentant le nombre total de VE projetés par an qui a été utilisé comme entrée du modèle (et qui représenterait donc un taux de service de 100 %).

Figure 10. Analyse de sensibilité par rapport au paramètre bornes de recharge

Source : MOBI

- 51 La Figure 11 reproduit l'implantation des 500 bornes de recharge en considérant toutes les cabines comme des sites candidats. Vu la distribution plus uniforme sur le territoire des cabines qui ne sont pas encore conformes, la répartition des bornes de recharge est également moins concentrée, bien que le schéma général soit similaire à la configuration optimale de la Figure 8.

Figure 11. Localisations optimales pour bornes de recharge en 2020 sur la base de toutes les cabines

Source : MOBI

- 52 Vu le plus grand nombre de possibilités de sites candidats pour les bornes de recharge, le taux de service résultant de cette implantation s'avère aussi un peu plus élevé que dans le scénario 1. Ainsi, 13 281 des 14 028 propriétaires estimés de VE en 2020 ont accès à une station de recharge à une distance de marche maximale de 350 m. À nouveau, il convient ici de nuancer que seule l'accessibilité est garantie, et non la disponibilité, étant donné que le ratio points de recharge/VE est inférieur à 1 sur 14.

Conclusion

- 53 Cet article présente deux analyses visant à identifier des emplacements pour le déploiement d'une infrastructure de recharge publique pour véhicules particuliers. La première analyse vise la mise en œuvre d'un réseau d'infrastructure de recharge opportuniste articulé autour d'importants pôles de mobilité et parkings publics. La deuxième analyse localise les bornes de recharge sur la base des données sociodémographiques des habitants, de manière à maximiser le taux de service. L'infrastructure de recharge rapide ne relève pas du champ d'étude de cet article.
- 54 Selon Wagner *et al.* [2013], les POI sont des lieux propices à l'installation de bornes de recharge opportuniste. Le déploiement d'une infrastructure de recharge à proximité d'importants pôles de mobilité et parkings publics améliore d'un tiers la couverture du nombre d'adresses bruxelloises par rapport à la situation en 2015. Les scores d'accessibilité plus élevés témoignent également d'une amélioration de l'accessibilité de l'infrastructure. Ceci confirme que la localisation d'importants POI en Région de Bruxelles-Capitale offre un bon point de départ pour poursuivre le déploiement de l'infrastructure de recharge. Sachant qu'on mesure la demande autour d'un site potentiel sur la base du nombre de points d'adresses situés à une distance de marche de 9 minutes, et non sur la base des motifs ou profils d'utilisation, l'analyse vaut tant pour les habitants bruxellois que pour les visiteurs ou les navetteurs.
- 55 La deuxième analyse examine où implanter de nouveaux emplacements pour la recharge résidentielle. Le modèle de localisation s'appuie sur la demande projetée jusqu'au niveau spatial des îlots. La demande est égale au nombre de VE par îlot selon les prévisions de 2015 à 2020. À titre de contrôle des données utilisées dans l'analyse, la projection de la demande a été confrontée aux plus récents chiffres de VE en Région de Bruxelles-Capitale. Le résultat de cette comparaison indique que les prévisions étaient trop optimistes. Par contre, la distribution spatiale de la demande correspond en grande partie à la répartition spatiale des prévisions. Sur la base des modèles d'optimisation spatiale MCLP et DMCLP, le taux de service des nouvelles bornes de recharge à localiser a été maximisé en utilisant le réseau 400 V existant. Deux scénarios ont été élaborés : d'une part, à l'aide des cabines basse tension existantes et, d'autre part, à l'aide des cabines qui ne sont pas encore totalement conformes. Les deux approches nous renseignent sur l'implantation proposée des nouvelles bornes de recharge : la plus grande disponibilité de cabines non conformes par rapport aux cabines basse tension résulte en un taux de service plus élevé pour les propriétaires de VE en 2020, bien que la mise en conformité de ces cabines pour les raccorder à une station de recharge engendre un coût supplémentaire.
- 56 En résumé, la combinaison des deux méthodes met l'accent sur les quartiers où l'on s'attend à une plus grande adoption de VE de la part des résidents, tout en couvrant la

plupart des zones de la Région grâce à une approche POI complémentaire. Cette complémentarité permet de prévoir l'infrastructure aux endroits pertinents, tant pour les visiteurs que pour les navetteurs et les habitants.

- 57 Une série de recommandations peuvent être formulées concernant les données et les hypothèses utilisées dans le cadre de ces méthodes. Premièrement, en 2015, il n'existait pas encore de relevé officiel de l'ensemble de l'infrastructure de recharge en Région de Bruxelles-Capitale. Depuis lors, la situation a en partie évolué, dans la mesure où la Région a octroyé en 2018 une concession à PitPoint (Total) pour développer le réseau d'infrastructure de recharge. Un relevé de l'infrastructure de recharge publique est désormais disponible sur le site internet de charge.brussels [Charge.brussels, 2021]. Il ne présente cependant pas l'aperçu complet de l'infrastructure de recharge en Région de Bruxelles-Capitale. Ce jeu de données comprend toutes les bornes de recharge publiques que PitPoint a aménagées, mais pas les bornes de recharge semi-publiques (bornes de recharge situées hors voirie publique, mais néanmoins disponibles pour les utilisateurs) que nous avons listées en 2015. Un jeu de données incluant les deux types de bornes de recharge offrirait un état des lieux plus complet de la situation actuelle en Région bruxelloise. Deuxièmement, concernant les prévisions du nombre de VE, on peut conclure que les chiffres qui en résultent doivent être traités avec prudence. En effet, ces chiffres peuvent être facilement surestimés, surtout lorsque le marché n'en est encore qu'au début de son développement, comme c'était le cas du marché VE 2015.
- 58 Pour de plus amples recherches, une piste possible serait d'intégrer les résultats de l'analyse d'accessibilité au modèle de localisation. En d'autres termes, le score d'accessibilité résultant de l'analyse pourrait être ajouté au modèle afin de tenir compte non seulement de la distance entre les points, mais aussi du nombre d'adresses alentour qui représentent la demande. Une autre piste serait de considérer les POI comme des bornes de recharge permanentes dans le modèle de localisation. Cette piste pourrait constituer un scénario supplémentaire dans l'hypothèse où la Région de Bruxelles-Capitale voudrait réaliser un déploiement complémentaire axé sur les POI. Étant donné que les critères de planification cités pour la cartographie de la vision régionale sont semblables aux paramètres repris dans le modèle de localisation proposé, un modèle semblable pourrait être utilisé dans le futur pour le déploiement des 11 040 bornes de recharge de la vision régionale. Cependant, pour la quantité de bornes de recharge que la Région souhaite installer à l'horizon 2035, ce ne sera possible que moyennant certaines adaptations des paramètres, comme la recherche d'autres sites candidats (p. ex. des rues ou des places de parking), un rayon inférieur pour la couverture de la demande et une distribution plus quadrillée de la demande. Une dernière piste est de travailler avec des données CBC spécifiquement adaptées aux habitants de Bruxelles. Ces données, associées aux plus récents chiffres de VE, permettraient de mieux prédire les préférences et l'adoption de VE par les Bruxellois. Il peut également être tenu compte de la transition annoncée vers une mobilité zéro émission, tant au niveau européen [Commission européenne, 2021] qu'au niveau bruxellois [Bruxelles Environnement, 2021], avec l'objectif d'atteindre à l'horizon 2035 un parc de véhicules particuliers sans émission.

Cette étude a été en partie financée dans le cadre de projets menés pour Bruxelles Environnement, Bruxelles Mobilité et BRUGEL.

BIBLIOGRAPHIE

- AXSEN, J., GOLDBERG, S. et BAILEY, J., 2016. How might potential future plugin electric vehicle buyers differ from current "pioneer" owners? In : *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 06/07/2016, Vol. 47, pp. 357–370.
- BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2020. Vision sur le déploiement d'une infrastructure de recharge pour véhicules électriques. Bruxelles.
- BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2021. Stratégie « Low Emission Mobility ». In : Bruxelles Environnement. [En ligne] 2021. [Consulté le 3/09/2021]. Disponible à l'adresse : <https://environnement.brussels/thematiques/mobilite/strategie-low-emission-mobility>
- CHARGE.BRUSSELS, 2021. État du réseau. In : charge.brussels. [En ligne] 2021. [Consulté le 26/03/2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.charge.brussels/fr/etat-du-reseau/>.
- CHURCH, R. et REVELLE, C., 1974. The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*. In : *Papers of the Regional Science Association*. 12/1974, vol. 32, n° 1, pp. 101–118.
- CIRB, 2021. UrbIS Data. In : cirb.brussels. [En ligne] 2021. [Consulté le 26/03/2021]. Disponible à l'adresse : <https://cirb.brussels/fr/nos-solutions/urbis-solutions/urbis-data>.
- COMMISSION EUROPÉENNE, 2021. CO₂ emission performance standards for cars and vans. In: European Commission. [Online] 2021. [Consulté le 02/11/2021]. Disponible à : https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission_en
- COMMISSION EUROPÉENNE, 2021. CO₂ emission performance standards for cars and vans. In : European Commission. [En ligne] 2019. [Consulté le 03/09/2021]. Disponible à l'adresse : https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action/delivering/vehicles_en
- DENYS, T., BECKX, C. et VANHUTSEL, M., 2020. Analysis of the Belgian Car New Registrations (2008-2019). In : ecoscore.be. [En ligne] 2020. [Consulté le 28/12/2020]. Disponible à l'adresse : <https://ecoscore.be/en/fiches/new>
- DERAUW, S., GELAES, S. et PAUWELS, C., 2019. Enquête Monitor sur la mobilité des Belges.
- ERMANS, T., 2019. Les ménages bruxellois et la voiture. Bruxelles : Perspective Brussels.
- FEBIAC, 2017. Datadigest 2017. In : FEBIAC. [En ligne] 2017. [Consulté le 26/02/2018]. Disponible à l'adresse : <http://www.febiac.be/public/statistics.aspx?FID=23&lang=FR>.
- GUNAWARDANE, G., 1982. Dynamic versions of set covering type public facility location problems. In : *European Journal of Operational Research*. 06/1982, vol. 10, n° 2, pp. 190–195.
- HARDMAN, S., SHIU, E. et STEINBERGER-WILCKENS, R., 2016. Comparing high-end and low-end early adopters of battery electric vehicles. In : *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 12/04/2016, vol. 88, pp. 40–57.
- HOOFTMAN, N., MESSAGIE, M., JOINT, F., SEGARD, J. B. et COOSEMANS, T., 2018. In-life range modularity for electric vehicles: The environmental impact of a range-extender trailer system. In : *Applied Sciences*, vol. 8, n° 7 pp. 1016.
- IBSA, 2018. Institut bruxellois de Statistique et d'Analyse. In : ibsa.brussels. [En ligne] 2018. [Consulté le 22/11/2018]. Disponible à l'adresse : http://ibsa.brussels/?set_language=fr.

LEBEAU, K., VAN MIERLO, J., LEBEAU, P., MAIRESSE, O. et MACHARIS, C., 2012. The market potential for plug-in hybrid and battery electric vehicles in Flanders: A choice-based conjoint analysis. In : *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 06/09/2012, vol. 17, n° 8, pp. 592–597.

LUO, W. et WANG, F., 2003. Measures of spatial accessibility to health care in a GIS environment: synthesis and a case study in the Chicago region. In : *Environment and Planning B: Planning and Design*. 1/12/2003, vol. 30, n° 6, pp. 865–884.

LUO, W. et QI, Y., 2009. An enhanced two-step floating catchment area (E2SFCA) method for measuring spatial accessibility to primary care physicians. In : *Health & place*. 01/12/2009, vol. 15, n° 4, pp. 1100–1107.

MARION, G., VANHAVERBEKE, L., MESSAGIE, M., MACHARIS, C. et VAN MIERLO, J., 2015. Spatial accessibility study of slow charging infrastructure for electric vehicles: case study in a belgian mid-sized city. In : *XIII NECTAR International Conference*. NECTAR International Conference. Ann Arbor, MI. 14-15/06/2015.

MERSKY, A. C., SPREI, F., SAMARAS, C. et QIAN, Z. S., 2016. Effectiveness of incentives on electric vehicle adoption in Norway. In : *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 31/03/2016, vol. 46, pp. 56–68.

PLÖTZ, P., SCHNEIDER, U., GLOBISCH, J. et DÜTSCHKE, E., 2014. Who will buy electric vehicles? Identifying early adopters in Germany. In : *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 30/07/2014, vol. 67, pp. 96–109.

RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE, 2011. Plan de mobilité Iris 2. Bruxelles.

RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE, 2013. Projet de plan régional de développement durable. Bruxelles.

RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE, 2019. Projet de plan régional de mobilité : Plan stratégique et opérationnel. Bruxelles.

VAN MIERLO, J., MESSAGIE, M. et RANGARAJU, S., 2017. Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment. In : *Transportation research procedia*. 08/06/2017, vol. 25, pp. 3435–3445.

WAGNER, S., GÖTZINGER, M. et NEUMANN, D., 2013. Optimal location of charging stations in smart cities: A points of interest based approach. In : *Thirty Fourth International Conference on Information Systems*. International Conference on Information Systems. Milan. 15-18/12/2013.

WILLOCX, B., 2015. Improvement of airquality through mobility management in Brussels. Bruxelles : Bruxelles Environnement.

ANNEXES

Tableau 2. Nombre de VE immatriculés par commune en 2015 et 2018

Commune	INS	2015			2018			Prévisions 2020
		Société	Particulier	Total	Société	Particulier	Total	Total
Anderlecht	21001	30	5	35	137	16	153	958
Auderghem	21002	13	3	16	49	13	62	575
Berchem-Sainte-Agathe	21003	7	0	7	30	10	40	19
Bruxelles	21004	119	6	125	1978	42	2020	1150
Etterbeek	21005	10	2	12	77	13	90	383
Evere	21006	132	4	136	62	7	69	767
Forest	21007	10	1	11	72	16	88	192
Ganshoren	21008	6	1	7	24	7	31	192
Ixelles	21009	132	4	136	273	19	292	767
Jette	21010	30	1	31	58	4	62	192
Koekelberg	21011	2	1	3	16	2	18	192
Molenbeek-Saint-Jean	21012	17	4	21	61	5	66	767
Saint-Gilles	21013	12	0	12	52	9	61	19
Saint-Josse-ten-Noode	21014	33	1	34	395	1	396	192
Schaerbeek	21015	69	2	71	154	12	166	383
Uccle	21016	71	20	91	311	78	389	3833
Watermael-Boitsfort	21017	16	7	23	72	14	86	1342
Woluwe-Saint-Lambert	21018	70	4	74	232	22	254	767
Woluwe-Saint-Pierre	21019	27	7	34	161	47	208	1342
Région de Bruxelles-Capitale	04000	806	73	879	4214	337	4551	14032

NOTES

1. Ces chiffres détaillés ont été fournis personnellement par M. Kwanten du SPF Mobilité. Les chiffres pour mi-2019 sont une sous-estimation du nombre de VE par commune en 2019.

RÉSUMÉS

L'impact du transport sur le changement climatique ne cesse de s'intensifier, faisant des véhicules durables une étape importante pour réduire les émissions. Dans ce contexte, un grand réseau de bornes de recharge permettrait de stimuler l'adoption de la voiture électrique, mais ce réseau demeure trop limité à Bruxelles. Dans cet article, nous présentons deux méthodes complémentaires susceptibles de soutenir le déploiement d'une infrastructure de recharge. L'analyse pour la recharge opportuniste publique consiste en une approche basée sur un point d'intérêt (*point of interest*, POI) qui démontre que l'accessibilité de l'infrastructure de recharge tend à s'améliorer avec l'installation de bornes à proximité d'importants pôles de mobilité bruxellois. Pour la recharge résidentielle publique, des emplacements sont identifiés sur la base de modèles de localisation tenant compte des prévisions de la demande en véhicules électriques (VE). Le déploiement qui en résulte s'impose en premier lieu dans les quartiers où l'adoption escomptée de VE est forte, et s'étend ensuite de manière équilibrée sur l'ensemble du territoire de la Région. La combinaison des deux méthodes offre une solution tant aux habitants (modèles de localisation) qu'aux visiteurs et aux navetteurs (approche POI).

De impact van vervoer op de klimaatverandering wordt steeds aanzienlijker waardoor het overschakelen naar duurzame voertuigen een belangrijke stap is om emissies te reduceren. Een groot netwerk van laadpalen zou de adoptie van elektrische voertuigen (EV's) kunnen stimuleren. Dit netwerk blijft echter nog beperkt in Brussel. In deze paper stellen we twee complementaire methodes voor die de uitrol van laadinfrastructuur kunnen ondersteunen. De analyse voor publiek gelegenheidsladen is een point of interest (POI) gebaseerde aanpak die aantoonst dat de toegankelijkheid van de laadinfrastructuur verbeterd wordt als er laadpalen komen bij belangrijke Brusselse mobiliteitspolen. Locaties voor publiek residentieel laden worden geïdentificeerd a.d.h.v. locatiemodellen die rekening houden met voorspellingen van de vraag naar EV's. De resulterende uitrol wordt eerst doorgedreven waar de geschatte EV adoptie hoog is en spreidt zich vervolgens evenwichtig uit over het volledige Gewest. De combinatie van beide methodes biedt een oplossing voor zowel inwoners (locatiemodellen), als voor bezoekers of pendelaars (POI-aanpak).

The impact of transport on climate change is becoming increasingly significant, making switching to sustainable vehicles an important step in emission reduction. The use of electric vehicles could be stimulated by a large network of charging stations. However, in Brussels, this network is still limited. In this paper, we propose two complementary methods that can support the deployment of a charging infrastructure. The analysis for public occasional charging is a point of interest (POI) based approach as it demonstrates that the accessibility of the charging infrastructure is improved if charging stations are installed at important Brussels mobility poles. Locations for public residential charging are identified by means of location models that take into account demand forecasts for EVs. The resulting roll-out is first pushed through where the estimated EV adoption is high and then spreads evenly across the entire Region. The combination of both methods offers a solution for residents (location models), as well as for visitors or commuters (POI approach).

INDEX

Mots-clés : mobilité, infrastructures urbaines

Trefwoorden mobiliteit, stedelijke infrastructuur

Thèmes : 7. aménagement du territoire – logement – mobilité, 8. environnement – énergie – développement durable

AUTEURS

QUENTIN DE CLERCK

Quentin De Clerck a obtenu en 2014 son Master scientifique en Sciences appliquées et Ingénierie : Informatique à la Vrije Universiteit Brussel. Depuis 2014, il est chercheur sous la supervision de Lieselot Vanhaverbeke, pour le centre de recherche MOBI. Ses domaines d'expertise sont les véhicules électriques, l'analyse de localisation pour l'infrastructure de recharge et le Coût total de possession.

quentin.de.clerck[at]vub.be

LIESELOT VANHAVERBEKE

Prof. dr. Lieselot Vanhaverbeke est professeure assistante à la Vrije Universiteit Brussel, au département Business Technology and Operations (BUTO) et au centre de recherche Mobility, Logistics and Automotive Technology (MOBI). Elle enseigne la recherche opérationnelle et les

méthodes de recherche. Ses recherches sur l'analyse de localisation, la mobilité des consommateurs et les aspects économiques des véhicules électriques sont publiées dans des revues académiques ISI. Elle est membre de la Société belge de recherche opérationnelle (ORBEL) et de l'Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS).
lieselot.vanhaverbeke[at]vub.be