

OCTOBRE 2019

IMPACTS DES VÉHICULES AUTONOMES ÉLECTRIQUES SUR L'UTILISATION DU SOL ET LES ACTIVITÉS URBAINES

RAPPORT DE RECHERCHE



Consortium international de recherche
sur la gouvernance des grands projets
d'infrastructure



IMPACTS DES VÉHICULES AUTONOMES ÉLECTRIQUES SUR L'UTILISATION DU SOL ET LES ACTIVITÉS URBAINES

Lynda Bellalite

Soumaya Cherkaoui

OCTOBRE 2019

KHEOPS
Consortium international de recherche
sur la gouvernance des grands projets
d'infrastructure

ISBN : 978-2-0818612-1-4

Dépôt légal : 2020

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Bibliothèque et Archives Canada

*Ce document est disponible dans son intégralité en ligne
et en format PDF à l'adresse www.kheops.ca*

NOTES SUR LES AUTEURS

Lynda Bellalite | Université de Sherbrooke

Lynda Bellalite est professeure à l'Université de Sherbrooke depuis 1991. Détentrice d'un doctorat, elle travaille depuis plus de vingt-cinq ans dans le domaine du transport et s'intéresse plus particulièrement au comportement des usagers de la route. Ses travaux antérieurs ont cherché à mesurer l'incidence des aménagements modérateurs, du profil en travers d'une route et de l'abaissement des limites de vitesse sur le comportement des usagers de la route et la sécurité (accidents). Responsable du Laboratoire d'application et de recherche en aménagement (LARA), elle a formé, à ce jour, plus de 40 chercheurs et cumulé plus de 900 000 \$ en subvention et contrat de recherche. Depuis 4 ans, elle occupe la fonction de directrice du Département de géomatique appliquée.

Soumaya Cherkaoui | Université de Sherbrooke

Soumaya Cherkaoui se prévaut d'une longue expérience de recherche dans les domaines des véhiculaires autonomes et connectés, et en systèmes de transports intelligents. Elle est professeure titulaire au Département de génie électrique et génie informatique de l'Université de Sherbrooke qu'elle a joint en 1999. Pendant plus de 10 ans, elle a dirigé 3 projets pancanadiens du réseau de centre d'excellence canadienne AUTO21, sur les véhicules connectés et les systèmes automatisés de conduite avec emphase sur la sécurité routière. Ses travaux dans le domaine ont abouti à de nombreuses publications internationales.

TABLE DES MATIÈRES

NOTES SUR LES AUTEURS.....	iii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
INTRODUCTION	1
1. IMPACTS SUR LA STRUCTURE MÉTROPOLITAINE.....	2
2. IMPACTS SUR LES LIEUX DE RÉSIDENCE	10
3. IMPACTS SUR LES LIEUX D'ENTREPRISE	15
4. IMPACTS SUR LE STATIONNEMENT.....	18
5. IMPACTS SUR L'ESPACE RUE	29
6. IMPACTS SUR LES STATIONS DE RECHARGE.....	36
7. IMPACTS SUR L'INTERMODALITÉ	48
CONCLUSION	54
RÉFÉRENCES	55

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Impact de la mobilité urbaine motorisée sur la structure métropolitaine.....	3
Figure 2 : Variations démographiques en % - scénario haute automatisation	7
Figure 3 : Variations démographiques en % - scénario automatisation complète.....	8
Figure 4 : Optimisation d'un stationnement par l'anonymat des VAE	18
Figure 5 : Reconfiguration d'un stationnement étagé, Autostrade, Wolfsburg, Germany	19
Figure 6 : Reconfiguration d'une rue sans stationnement au centre-ville	21
Figure 7 : Reconfiguration d'une rue sans stationnement en banlieue	22
Figure 8 : Reconfiguration d'une rue sans stationnement en zone rurale	23
Figure 9 : Réaffectation d'une surface de stationnement.....	24
Figure 10 : Configuration d'une zone de débarcadère achalandée (a) et peu fréquentée (b).....	27
Figure 11 : Reconfiguration de la rue avant et après le déploiement des véhicules autonomes	29
Figure 12 : Réaménagement progressif des artères urbaines.....	31
Figure 13 : Réaménagement progressif des rues résidentielles.....	33
Figure 14. Approche zonale de l'espace rue	34
Figure 15 : Infrastructures de recharge par million d'habitants selon certains pays	37
Figure 16 : Nombre de stations de recharge et de véhicules électriques par million d'habitants selon la région métropolitaine et certains pays	37
Figure 17 : Nombre relatif de stations de recharge régulière et rapide par million d'habitants selon la région métropolitaine et certains pays	38
Figure 18 : Répartition des régions métropolitaines selon le nombre de véhicules électriques et leur ratio par station de recharge	40
Figure 19 : Emplacement des stations de recharge selon le nombre moyen d'utilisateurs par jour, région métropolitaine de Rome, Italie	41
Figure 20 : Pourcentage de véhicules électriques ayant recours à une recharge par motif et période de la journée avec une autonomie de 130 km (a) et de 65 km (b)	42

Figure 21 : Station de recharge électrique robotisée avec arrimage automatique	43
Figure 22 : Station de recharge domestique (a) et publique (b) par induction statique.....	44
Figure 23 : Emplacements possibles des plateformes de recharge par induction statique	44
Figure 24 : Réseau filaire d'une ligne de recharge par induction dynamique	45
Figure 25 : Ligne de recharge par induction dynamique sur voie réservée - artère urbaine (a) et autoroute (b)	45
Figure 26 : Répartition modale selon la distance et la capacité de la route dans un système intermodal, New York	49
Figure 27 : Résultats de simulation d'un système de transport public intégrant les véhicules autonomes pour la desserte du premier kilomètre, Singapour	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tendances prévisibles de relocalisation d'entreprise selon le secteur d'activités	16
Tableau 2 : Répercussion de la baisse de la demande en stationnement sur le parc immobilier.....	25
Tableau 3 : Priorisation de l'espace rue selon le type de rue et la zone	34
Tableau 4 : Ratio moyen du nombre de véhicules électriques par station de recharge	39

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, l'automobile a largement contribué à modeler le paysage urbain. Elle a profondément marqué le développement des villes et des régions métropolitaines. Cela s'est d'ailleurs traduit par une prolifération des banlieues, une expansion incessante du réseau routier et une baisse de la densité urbaine. L'attrait de la banlieue s'est également soldé par un éloignement des lieux de travail, un désintérêt à l'égard du transport en commun et un engorgement des centres-villes. Or, le déploiement des véhicules autonomes pourrait exacerber les tendances du passé ou représenter une occasion inespérée de se réapproprier le territoire.

Bien que les véhicules autonomes ne soient pas encore en circulation, leur arrivée est imminente. Il importe dès à présent de s'interroger sur les impacts potentiels qu'ils pourraient engendrer sur la structure métropolitaine afin d'en saisir l'ampleur et de pouvoir en maîtriser la portée, le cas échéant. À juste titre, le but de ce rapport vise à examiner l'impact des véhicules autonomes sur l'utilisation du sol et les activités urbaines.

Le présent rapport comporte plusieurs sections destinées à faire le point sur les impacts des véhicules autonomes à l'égard de la structure métropolitaine, du choix du lieu de résidence, du choix de localisation des entreprises, de la demande en stationnement, de la configuration de l'espace rue, des besoins en station de recharge et de l'intermodalité. Chacune des sections comporte un résumé des faits saillants.

L'actuel rapport repose sur une recension exhaustive de la littérature scientifique, rédigée à partir de 2015. Pour ce faire, il a fallu éplucher plus de 3000 titres et lire au-delà d'une centaine de documents afin de conserver les références les plus appropriées (60). Les références ont été retenues en fonction de leur pertinence et de leur capacité à mesurer l'impact des véhicules autonomes à la lumière de divers scénarios de déploiement.

1. IMPACTS SUR LA STRUCTURE MÉTROPOLITAINE

Selon la plupart des chercheurs [3, 6, 8, 18, 22, 28, 49, 56, 60], l'impact des véhicules autonomes sur la structure spatiale d'une région métropolitaine serait tributaire de l'usage du véhicule, à savoir : privé, communautaire ou partagé.

Les véhicules autonomes privés sont des automobiles possédées par une personne ou un ménage [6]. Leur itinéraire est flexible et la plupart du temps, leur taux d'occupation est faible.

Les véhicules autonomes communautaires sont des voitures en libre-service, semi-privées ou semi-publiques à l'usage d'une ou plusieurs personnes moyennant des frais d'utilisation [6]. En général, ces personnes se connaissent mutuellement (par ex. membres d'une famille, collègues, voisins). Le taux d'occupation de ces véhicules est généralement faible, bien qu'ils soient utilisés plus souvent que les véhicules autonomes privés. Leur itinéraire est flexible. Dans les deux cas de figures (i.e. véhicules autonomes privés et les véhicules autonomes communautaires) ces véhicules sont associés au concept d'auto-solo.

Les véhicules autonomes partagés sont publics et destinés à l'usage de personnes partageant des itinéraires ou des destinations [6]. Ils font souvent partie de l'offre de transport en commun. Dans une certaine mesure, les véhicules à la demande (de type taxi) sont associés à cette catégorie. Dans la plupart des cas, les passagers sont étrangers les uns aux autres et peuvent varier selon les jours de la semaine. L'itinéraire des véhicules autonomes partagés est flexible avec des arrêts le long du trajet.

Enfin, les navettes autonomes sont des véhicules publics pouvant accueillir un nombre plus grand de passagers (par ex. 10 passagers). Elles sont destinées à l'usage de personnes partageant des itinéraires ou des destinations. Elles sont apparentées au transport en commun. Leur itinéraire est flexible ou prédéterminé avec des arrêts le long du trajet [6].

Une étude menée en 2016 a cherché à dégager l'impact des véhicules autonomes sur la structure métropolitaine [6]. Pour ce faire, deux scénarios antinomiques ont été étudiés. Le premier scénario repose sur un aménagement du territoire en faveur du piéton. Il favorise le partage de la rue, les vitesses modérées et le transport en commun. La vitesse de déplacement est modérée et les distances parcourues sont courtes. Ce scénario favorise les fortes densités, des rues inclusives et promeut le développement urbain ou la consolidation des noyaux urbains. Le second scénario repose sur un aménagement orienté vers l'usage de l'automobile. Il privilégie la ségrégation des usagers de la route, les vitesses élevées et le transport individuel. La vitesse de déplacement est plus rapide et permet de parcourir de longues distances. Ce scénario mène à l'étalement urbain et à la prolifération des banlieues [6].

Selon le type d'usage, le véhicule autonome pourrait ou non contribuer à l'un ou l'autre des scénarios décrits [6]. Ainsi, l'usage des véhicules autonomes privés est apparenté aux déplacements auto-solo. À cet égard, ces véhicules circulent à vitesse élevée et parcourent rapidement de longues distances. Leur impact

perpétue l'étalement urbain et favorise la prolifération des banlieues. Il en est de même des véhicules communautaires. À l'opposé, les véhicules partagés et les navettes sont des véhicules publics apparentés au transport en commun. Ils sont destinés à l'usage de personnes partageant des itinéraires ou des destinations. Leur impact favorise la consolidation des noyaux urbains [6].



Figure 1 : Impact de la mobilité urbaine motorisée sur la structure métropolitaine

Source : Smolnicki P. M. and Soátys J. (2016) "Driverless Mobility: The Impact on Metropolitan Spatial Structures", Procedia Engineering, vol. 161, p. 2188

Une récente revue de littérature [56] a inventorié plusieurs publications traitant de l'impact des véhicules autonomes sur la forme urbaine. Les résultats de ces publications ont été analysés selon deux scénarios antinomiques (usage privé ou partagé). Dans le scénario où l'usage privé domine, la plupart des études concluent que la demande globale en stationnement et en infrastructure routière augmentera de manière significative et exigera davantage d'espace en milieu urbain. Cela devrait d'ailleurs se traduire en particulier par une augmentation de la demande en stationnement au centre-ville. Cela devrait aussi s'accompagner d'une hausse de la pression exercée par la circulation véhiculaire dans les centres urbains. Par conséquent, cela engendrera la formation de nouveaux centres urbains. À l'inverse, le scénario basé sur les véhicules partagés mènerait à une baisse considérable de la consommation d'espace à des fins de stationnement.

L'espace libéré offrirait l'occasion de consolider les noyaux urbains par de nouveaux développements ou des espaces publics additionnels. Même dans ce scénario, un accroissement modeste de la superficie urbanisée est envisagé. Enfin, il semble que les véhicules partagés pourraient concourir à réduire la demande en transport public conventionnel. [56]

Une étude menée aux États-Unis [8] a sopesé les impacts des véhicules autonomes sur le design urbain en élaborant deux scénarios antinomiques fondés sur le type d'usage du véhicule. Le premier scénario repose sur l'utilisation exclusive de véhicules autonomes privés. Le second est établi sur l'usage exclusif de véhicules publics partagés. Les scénarios retenus sont des cas de figure extrêmes, sachant que la réalité sera vraisemblablement une situation mitoyenne.

Selon le premier scénario, les véhicules autonomes privés pourront circuler seuls après avoir déposé leurs passagers. Ils pourraient retourner au lieu de résidence ou rejoindre un parc de stationnement. Aussi, des cases de stationnement seraient vraisemblablement requises dans les centres-villes, sur des terrains à forte valeur foncière. De plus, dans l'éventualité où l'utilisation du transport en commun déclinerait, cela risquerait d'accroître la congestion du réseau routier et des parcs de stationnement dans les centres-villes. La livraison de marchandises pourrait également recourir aux véhicules autonomes. De petits véhicules opérés à la demande seraient susceptibles de réduire la consolidation des marchandises en un seul chargement. Cela aurait pour conséquence d'augmenter le volume de circulation dans les villes centres [8].

Une hausse de la mobilité des personnes est envisagée avec le déploiement des véhicules autonomes privés. Or, la capacité de maintenir un style de vie de qualité sans les tracas associés à la conduite automobile pourrait inciter les navetteurs à préférer les banlieues comme lieu de résidence, ce qui aurait pour effet d'accroître la nécessité de construire des routes et des autoroutes. Par ailleurs, les avantages associés aux véhicules autonomes privés représentent un défi de taille pour les systèmes de transport public, en particulier lorsque le marché permettra d'accéder à des véhicules plus abordables. Comme l'expansion des systèmes de transport souterrain (ex. métro) est relativement dispendieuse et difficilement rentable, les villes de banlieues devraient continuer à prospérer avec les véhicules privés. Par ailleurs, on estime qu'ils favoriseront davantage les déplacements motorisés que ceux à pied ou à vélo. Aussi, la nécessité et l'utilisation des trottoirs en milieu suburbain serait réduite. En revanche, dans les centres-villes, un réseau connecté de trottoirs et de pistes cyclables serait vraisemblablement maintenu mais confiné à un périmètre restreint [8].

Comme les véhicules autonomes privés seront en mesure de se garer seuls, la construction de nouveaux édifices pourrait recourir à des parcs de stationnement détachés ou éloignés comme solutions alternatives. Cela permettrait de réduire les coûts liés aux travaux souterrains pour le stationnement et la durée de construction des édifices. Cependant, la localisation des stationnements serait comprise à l'intérieur d'un périmètre restreint en vue de faciliter leur accessibilité à des coûts raisonnables. Bien que les accès aux édifices seraient limités, de généreuses zones de débarcadère devraient être prévues pour accommoder les passagers et les livraisons, en particulier aux heures de pointe. Durant ces périodes, l'accroissement de la demande se traduirait par une hausse du nombre de véhicules entrant dans la ville [8].

L'attrait des véhicules autonomes privés risque de porter préjudice au transport en commun qui devrait éprouver des difficultés à desservir les futures zones de développement. La desserte des banlieues extensives deviendra de plus en plus difficile, réduisant l'achalandage et la fiabilité du transport en

commun. Par ailleurs, l'affluence de véhicules privés rendra nécessaire une adaptation et une automatisation des stations de recharge (essence, électrique). Cela devrait mener à des pôles de service plus centralisés et décourager les établissements au détail [8].

Dans le scénario favorisant l'étalement urbain, la dépendance du véhicule pour les déplacements liés au magasinage ne devrait pas décliner. L'accès aux centres commerciaux devrait être plus simple et plus facile grâce aux véhicules autonomes. Ces centres devraient être positionnés stratégiquement afin de desservir les nouvelles banlieues. Les parcs de stationnement continueront d'être un élément primordial des centres commerciaux, bien qu'ils pourraient être localisés plus loin [8].

Les services de livraison de marchandises s'adapteront vraisemblablement aux conditions de circulation (ex. : congestion) et aux règlements municipaux (ex. : interdiction d'accès aux camions à certaines heures ou à l'intérieur de certains périmètres). Quel que soit le scénario de développement (ville densifiée vs étalée), les systèmes de livraison pourraient contribuer à réduire le nombre de camions circulant à l'intérieur des villes centres et offrir des services de livraison à la demande. Les commerces de grande surface devraient encore recourir à de plus gros camions, mais en ajustant les livraisons aux périodes moins achalandées. Si la tendance se maintient, les véhicules entrant dans les centres-villes devraient diminuer au profit de méthodes d'expédition plus durables [8].

Enfin, la vitalité du commerce de détail sur rue (rue commerçante) dépend, en grande partie, de l'achalandage piétonnier. En privilégiant les véhicules autonomes privés au détriment des piétons, l'accessibilité aux devantures de même que la vitalité commerciale seraient réduites. Par ailleurs, il existe une forte corrélation entre le déclin des rues commerçantes et l'apparition de centres commerciaux ou de magasins de grande surface. En ce sens, une ségrégation de l'utilisation du sol pourrait s'avérer plus attrayante avec le déploiement des véhicules autonomes privés. Parallèlement, les projets de construction de complexes multifonctionnels impliquant des déplacements entre les édifices ou les aménagements urbains devraient régresser [8].

Dans le second scénario reposant sur les véhicules publics partagés [8], les véhicules autonomes circuleraient en libre-service dans les zones à fort achalandage. Par conséquent, les parcs de stationnement situés à l'intérieur des centres-villes deviendraient superflus. À l'extérieur des centres urbains, des solutions alternatives seraient envisagées pour le stockage à long terme des véhicules et leur entretien. Ces sites de dépôt pourraient être localisés sur des terrains inutilisables ou à faible valeur foncière. Du stationnement de courte durée est envisagé aux abords des édifices mais non sur une large échelle afin de permettre le débarquement des passagers, les expéditions ou les livraisons de marchandises. Par ailleurs, l'emprise actuelle des rues pourrait être réduite en vue de favoriser les modes de transport alternatif (ex. : transport en commun, modes actifs). Le déploiement des véhicules partagés permettrait d'offrir un service de transport à la demande en proposant une alternative au problème du premier/dernier kilomètre connecté au réseau de transport en commun [8].

Les véhicules autonomes partagés pourraient être combinés au réseau de transport en commun actuel en vue de supporter une forme urbaine plus dense. En revanche, les projets d'expansion de réseau de transport souterrain (ex. : métro) devraient s'avérer difficiles dans la mesure où d'autres modes de transport public seraient susceptibles d'être plus économiques et mieux arrimés aux flottes de véhicules autonomes. Cela pourrait réduire les besoins en infrastructures majeures [8].

Comme corollaire à la réduction de l’emprise du réseau routier, les infrastructures associées aux modes de transport alternatifs et actifs (ex. : trottoirs, pistes cyclables, autres commodités) pourraient favoriser les villes piétonnes. Les accès véhiculaires seraient encore permis dans la plupart des cas pour des fins de livraison ou les services d’urgence. En revanche, ils seraient appelés à disparaître au sein des nouveaux centres urbains conçus à l’échelle humaine [8].

Les nouveaux édifices nécessiteraient moins de stationnement et d’accès souterrains, réduisant par le fait même les coûts de construction. Les projets de construction d’envergure réinvestiraient les rez-de-chaussée afin d’accueillir davantage de piétons au sein de larges vestibules. Comme moins de véhicules auraient accès aux bâtiments eux-mêmes, de spacieuses zones de débarcadère seraient aménagées afin de soutenir les nombreux déplacements aux heures de pointe. Des zones de livraison de marchandises seraient aussi requises. Dans les édifices plus âgés, les espaces libérés pourraient être graduellement réaffectés à d’autres usages (ex. : entreposage, commerce). Avec le temps, les nouvelles constructions pourraient être érigées à moindre coût en raison de l’absence d’infrastructures souterraines lourdes [8].

Dans les quartiers centraux, les véhicules autonomes partagés pourraient coexister ou remplacer graduellement le transport public rapide. En réduisant la congestion et en optimisant la connectivité, les véhicules partagés pourraient s’avérer plus efficaces même sans voie réservée. En revanche, durant la période d’ajustement, il est possible que des voies réservées soient nécessaires afin de coordonner le flux de trafic traditionnel et autonome [8].

Les véhicules autonomes partagés seront en mesure d’accéder seuls aux services d’entretien et de recharge (essence, électricité). Cela pourrait mener à une relocalisation des stations de service vers des pôles plus centralisés, aux endroits où la rente foncière est plus faible [8].

En milieu plus densifié, les tendances du marché favoriseront le commerce de petite surface et local. Les commerces de grande surface s’adapteront au parcellaire. Avec le commerce en ligne et les véhicules partagés, la livraison de grands formats et les détaillants à rabais seront moins nécessaires. Comme les valeurs foncières resteront élevées en centre urbain, les commerces de banlieue devraient demeurer compétitifs [8].

Enfin, en considérant l’expansion des infrastructures piétonnes et la réduction des espaces de stationnement, les véhicules autonomes partagés pourraient insuffler un renouveau et contribuer à la revitalisation de rues commerçantes. Dans ce scénario, les usages interdits (bureaux, commerces haut de gamme, résidences) par certaines politiques municipales en raison du bruit ou de la pollution pourraient être réintroduits au niveau de la rue. Cela pourrait avoir des effets sur la valeur des propriétés et contribuer à la transformation des façades de bâtiments [8].

Selon un rapport du *Conference Board* du Canada [3], les véhicules autonomes partagés pourraient compromettre les bénéfices attendus par l’implantation des TOD (*Transit Oriented Development*). Les TOD sont des stratégies visant à constituer des pôles multifonctionnels (bureaux, commerces et résidences) localisés à proximité de stations majeures de transport en commun. Or, un accès aux véhicules partagés à faible coût pourrait mener à l’effondrement du transport public, induire un changement dans les valeurs foncières et mettre en péril les investissements consentis dans ces développements.

Une étude récente [18] a simulé l'effet du déploiement des véhicules autonomes sur la concentration ou la dispersion démographique aux Pays-Bas. Les simulations ont considéré deux retombées possibles, soit : une réduction du temps de trajet perçu et la substitution du transport public par des services porte-à-porte plus confortables et plus efficaces. Calibré sur les données des Pays-Bas, le modèle a permis de calculer les changements de distribution de la population.

Dans le scénario de haute autonomie de l'étude [18], les résultats montrent une redistribution de la population sur le territoire. Les véhicules privés et partagés ont toutefois des effets opposés. Ainsi, une augmentation de l'efficacité du transport en commun s'accompagne d'un accroissement de la population dans les régions les plus urbanisées. Comme le transport public s'avère plus efficace dans les zones denses, elles bénéficient encore plus de l'automatisation du transport public. En contrepartie, les banlieues des petites villes isolées et des régions rurales éloignées subissent une baisse significative de leur population, attribuable à leur éloignement des grands centres urbains et à l'absence de services. Quant au déploiement des véhicules privés, il favoriserait plutôt les banlieues et les zones non-urbaines. Ce phénomène serait attribuable au fait que les longs trajets seraient désormais perçus comme acceptables. En définitive, l'effet combiné des véhicules autonomes privés et partagés favoriseraient un apport de population dans les grandes villes et leurs banlieues périphériques alors que les petites villes isolées et leur région immédiate connaîtraient une décroissance démographique [18].

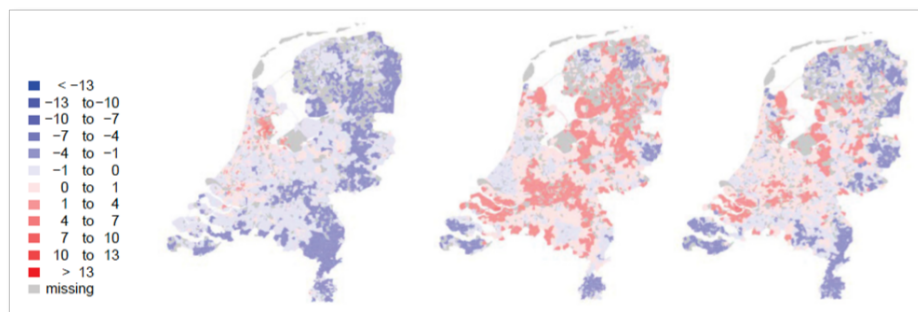


Figure 2 : Variations démographiques en % - scénario haute automatisation

Légende : transport public (gauche), voiture privée (centre), effet combiné (droite)

Source : Gelauff G., Ossokina I. and Teulings C. (2017) "Spatial effects of automated driving: dispersion, concentration or both?". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, 121, p. 13

Dans le scénario de complète autonomie de l'étude [18], les résultats montrent que les effets des véhicules autonomes sont 3 à 4 fois supérieurs à ceux de la haute autonomie. Le transport public autonome tend à attirer la population au sein des régions urbanisées alors que les véhicules privés encouragent plutôt la prolifération des banlieues. Or, l'effet combiné des véhicules autonomes privés et publics mène à une relocalisation de la population dans les grands centres urbains et leurs banlieues périphériques. À l'opposé, les petites villes isolées et leur région immédiate sont celles où la population régresse le plus.

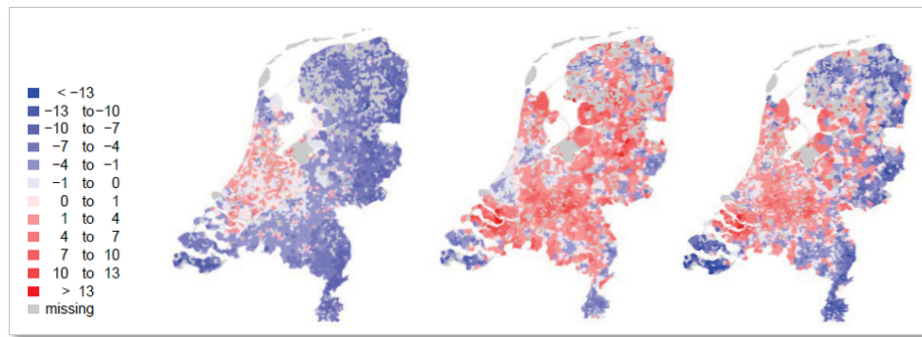


Figure 3 : Variations démographiques en % - scénario automatisé complet

Légende : transport public (gauche), voiture privée (centre), effet combiné (droite)

Source : Gelauff G., Ossokina I. and Teulings C. (2017) "Spatial effects of automated driving: dispersion, concentration or both?". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, 121, p. 14

Une étude réalisée en Corée [28] a simulé les effets des véhicules autonomes privés sur l'utilisation du sol jusqu'en 2060. Le modèle de simulation, calibré sur la région métropolitaine de Séoul, arrive à des résultats similaires. Ainsi, la région serait marquée par un développement dispersé au-delà de sa ceinture verte. Par comparaison à l'étalement urbain actuel, ces développements seraient encore plus éloignés de la ville centre.

Une étude menée aux États-Unis [22] a évalué les effets à long terme des véhicules autonomes sur la forme urbaine et l'utilisation du sol. Pour ce faire, les chercheurs ont eu recours à un modèle de simulation calibré sur quatre villes américaines jugées similaires, soit : Charlotte, Indianapolis, Kansas City et San Antonio. Sur les huit scénarios étudiés, trois portent sur le déploiement de véhicules autonomes électriques. Dans ces simulations, le stationnement disparaît du centre-ville (retour du véhicule au domicile, déplacement vers un site de dépôt, covoiturage) et l'espace libéré est réaffecté aux usages commerciaux. Quel que soit le scénario retenu, l'étendue de la ville croît alors que la densité résidentielle diminue. Qui plus est, la valeur de la rente foncière baisse dans les secteurs centraux en raison d'une forte diminution de la demande immobilière consécutive à une réduction des coûts de transport [22].

Résumé

Les impacts des véhicules autonomes sur la structure métropolitaine sont nombreux. La plupart des études considèrent deux scénarios antinomiques (usage privé ou partagé) dont les retombées sont fort différentes. Il va sans dire que la réalité correspondra vraisemblablement à une situation entre ces deux cas de figure.

Dans les cas où le véhicule autonome privé dominerait largement le marché, il faudrait s'attendre à une deuxième vague d'étalement urbain, caractérisée par un exode démographique, une baisse de la densité résidentielle, une prolifération des banlieues en zone rurale et une ségrégation accentuée des usages. L'expansion des banlieues devrait mener à la construction de nouvelles autoroutes de même qu'à une baisse de l'efficacité du transport en commun. En considérant la hausse de la mobilité, cela devrait se traduire au centre-ville par une augmentation du nombre de véhicules, une congestion accrue, des besoins additionnels en espace de stationnement et une baisse de la vitalité des rues commerçantes. Dans les centres urbains, un nivellement ou une baisse des valeurs foncières est à craindre en raison d'une forte diminution de la demande immobilière.

Dans les cas où le véhicule autonome partagé dominerait le marché (mobilité servicielle), il faudrait s'attendre à une consolidation des noyaux urbains, à une hausse de la densité démographique et à une mixité des usages. En raison de l'éventuel effet de débordement des noyaux urbains, plusieurs études anticipent un accroissement modeste de la superficie urbanisée. On envisage aussi une hausse de l'efficacité du transport en commun. Mais, les véhicules partagés pourraient concurrencer et se substituer au transport en commun dans sa forme actuelle. Dans un tel scénario, la rentabilité des TOD (*Transit Oriented Development*) pourrait même être menacée. Cependant, d'autres scénarios envisagent plutôt une coexistence des véhicules autonomes partagés sur les lignes peu achalandées et un renforcement du transport en commun dans les corridors à forte densité. Quel que soit le scénario, les besoins en infrastructures majeures seraient réduits (ex. : métro). Une accessibilité accrue à des véhicules en libre-service devrait se traduire au centre-ville par une baisse du nombre de véhicules, de la congestion et des besoins en espace de stationnement. On s'attend à une revitalisation des rues commerçantes alors que les centres commerciaux de banlieue resteraient compétitifs en raison de la rente foncière plus faible. Dans les centres urbains, on estime que les valeurs foncières seraient en hausse.

2. IMPACTS SUR LES LIEUX DE RÉSIDENCE

Le déploiement des véhicules autonomes aura vraisemblablement des retombées sur le choix du lieu de résidence. Selon toute vraisemblance, les personnes seraient disposées à se déplacer quotidiennement sur de plus longues distances si elles étaient en mesure d'être productives à bord du véhicule, en particulier si elles pouvaient accéder à des propriétés ou des logements à plus bas prix. Cela pourrait se traduire par de l'étalement urbain [24, 25, 26] et une réduction de la valeur foncière dans les banlieues existantes [3].

La capacité de réaliser d'autres activités à bord d'un véhicule autonome serait en mesure de modifier la perception du facteur temps. Les longs trajets ne seraient plus perçus contraignants. Les ménages choisiraient de résider plus loin de la ville centre afin d'habiter dans un environnement de qualité. En d'autres termes, les véhicules autonomes pourraient modifier le choix du lieu de résidence. Bien que ce choix puisse dépendre de nombreux facteurs, il s'agit généralement d'un compromis entre le milieu de vie, la qualité de l'environnement et la distance de navettage vers le lieu de travail [4, 5, 9, 12]. Depuis plusieurs années, les distances parcourues ne cessent d'augmenter. Or, les véhicules autonomes pourraient renforcer cette tendance et occasionner de plus longs trajets quotidiens [5, 9, 12, 24, 25]. Selon toute vraisemblance, ils pourraient contribuer à éliminer les contraintes spatio-temporelles associées à la ségrégation des fonctions urbaines [12]. Il semble évident que ce scénario repose sur les véhicules privés.

Paradoxalement, la densification pourrait aussi être favorisée par les véhicules autonomes dans la mesure où cela se traduirait par une réduction des infrastructures de stationnement et une requalification de ces espaces en zone d'habitations. Cette tendance serait favorisée par des frais de transport réduits pour les ménages urbains qui ne possèdent pas de véhicule privé, et qui utilisent les flottes de véhicules autonomes en autopartage ou en covoiturage. La valeur foncière changerait globalement et modifierait ultérieurement l'utilisation du sol [3].

Une étude menée en Autriche [11] a recensé et analysé près d'une quarantaine de modèles de simulation visant à mesurer l'impact des véhicules autonomes sur l'utilisation du sol au moyen de diverses hypothèses. Dans l'éventualité où les véhicules privés seraient prédominants, les modèles révèlent qu'il y aurait une amélioration de l'accessibilité et un exode de la population vers la banlieue éloignée et les zones rurales. Ainsi, l'étalement urbain et la dispersion de l'habitat seraient attribués à une forte réduction de la valeur du temps, une hausse de la capacité routière et conséquemment à une réduction du temps de trajet. En contrepartie, le recours aux véhicules autonomes partagés pourrait infléchir la tendance à l'étalement urbain bien que les effets seraient plus mitigés. En effet, certains groupes de population pourraient tout de même décider de s'établir plus loin en raison d'une accessibilité accrue aux zones rurales, d'une réduction de la valeur du temps et d'un accroissement de la capacité routière. Cependant, dans les cas où la valeur du temps demeurerait inchangée, la population continuerait de résider en milieu urbain, en particulier dans les secteurs centraux alors qu'on assisterait à une légère diminution de la population en banlieue éloignée. La tendance à l'urbanisation serait possible à la condition que les systèmes de transport en commun soient plus efficaces grâce à l'automatisation et la réduction de leur temps de trajet. [11]

Une étude menée sur la région de Melbourne en Australie visant à simuler l'impact des véhicules autonomes sur la forme urbaine parvient aux mêmes résultats [13]. Reposant sur le modèle LUTI (*Land Use*

and Transport Interaction) conçu pour l'aide à la décision en urbanisme et en aménagement du territoire, l'étude a simulé l'effet de plusieurs scénarios de déploiement des véhicules autonomes sur la demande en infrastructure routière et la forme urbaine. Les scénarios consistaient à modifier la valeur du temps de trajet et la part des déplacements quotidiens réalisés en covoiturage (transfert modal de l'automobile privée vers les véhicules à itinéraires partagés). Pour chacun des scénarios, le modèle a procédé à la redistribution de la population sur le territoire en mettant l'accent sur l'accessibilité à l'emploi comme variable explicative du choix de localisation résidentielle. Les scénarios retenus sont des cas de figure extrêmes, sachant que la réalité sera vraisemblablement une situation mitoyenne. Ainsi, le premier scénario assume que la valeur du temps de trajet demeure inchangée et qu'aucun transfert modal ne se produit. Le second scénario postule une réduction de 50 % de la valeur du temps de trajet, mais sans transfert vers le covoiturage. Le troisième scénario repose sur une valeur du temps de trajet inchangée mais 100 % des déplacements réalisés en covoiturage. Enfin, le dernier scénario prévoit une réduction de 50 % du temps de trajet et 100 % des déplacements en covoiturage [13].

Les résultats révèlent que le statu quo (scénario 1) mène à une réduction de la valeur du temps de trajet attribuable aux véhicules autonomes. Cela se traduit par une augmentation de la demande en infrastructure routière, un accroissement de 30 % du kilométrage parcouru par personne aux heures de pointe, un rallongement des trajets quotidiens et un désintérêt à l'égard du transport public. Dans le premier, tout comme dans le deuxième scénario, les impacts sur l'utilisation du sol montrent une migration des résidents vers les banlieues très excentriques (+ 30 km) et une réduction de la population dans la ville centre de même que dans les banlieues proches (5-15 km) et éloignées (15-30 km). Le troisième scénario basé sur le covoiturage (100 % des trajets) réduit le kilométrage parcouru par personne, entraînant une réduction de la longueur des trajets et un transfert modal au bénéfice du transport public. Ce scénario favorise une migration de la population vers la ville centre et les banlieues proches au détriment des banlieues éloignées et très excentriques. Enfin, le dernier scénario est celui dont les impacts sont les plus importants sur les banlieues très excentriques entraînant une forte diminution de leur population. [13]

Une étude très récente [17] réalisée à Sydney en Australie s'est penchée sur l'impact des véhicules autonomes sur le choix du lieu de résidence. Pour ce faire, un sondage a été mené auprès de 500 personnes afin d'évaluer le choix du lieu de résidence combiné au mode de transport privilégié. Plusieurs facteurs ont été considérés dont le type de résidence (appartement, maison en rangée, maison isolée), le nombre de chambres (0 à 2), les services de proximité (aucun, boutiques et restaurants avec ou sans commerces spécialisés), le temps de marche aux services (10, 20 ou 30 mn), les coûts de location et l'âge de la propriété (moins de 5 ans, 5 à 15 ans, plus de 15 ans). De surcroît, les répondants devaient choisir un mode de transport privilégié parmi les véhicules autonomes, les véhicules traditionnels et le transport public et ce, sur la base du temps du trajet, son coût et la proportion du temps passé dans les embouteillages. Les préférences des répondants ont été introduites dans plusieurs modèles de simulation. Les résultats révèlent que l'impact des véhicules autonomes sur les déplacements et le choix du lieu de résidence seraient relativement modestes. Ainsi, le temps de trajet en véhicule autonome privé est jugé équivalent aux autres modes de transport en dépit du fait qu'il permette d'être libéré des tâches de conduite. De plus, les avantages associés aux véhicules autonomes privés (ex. : diminution du stress lié à la conduite, trajet confortable et période productive) seraient insuffisants pour induire des trajets plus longs. Pour cette raison, les véhicules autonomes auraient un potentiel limité à modifier la perception du temps de trajet et les préférences en matière de localisation résidentielle. Plusieurs explications sont émises afin d'expliquer

ces résultats. Ainsi, on présume qu'une partie seulement de la population serait en mesure de tirer pleinement profit des véhicules autonomes. En second lieu, les avantages pourraient apparaître seulement avec le temps et l'expérience associée aux véhicules autonomes. En troisième lieu, la réduction du temps de trajet pourrait simplement contribuer à accroître le confort des déplacements sans avoir d'impact sur la productivité des personnes. Enfin, la capacité de pouvoir être productif à bord des véhicules autonomes pourrait s'avérer non souhaitable par les occupants. [17]

Aux Pays-Bas, une étude [18] a simulé l'effet du déploiement des véhicules autonomes sur la concentration ou la dispersion démographique de même que sur la valeur des terrains résidentiels. Les simulations ont considéré deux scénarios possibles, soit : une réduction du temps de trajet perçu et la substitution du transport public par des services porte-à-porte plus confortables et plus efficaces. Calibré sur les données des Pays-Bas, le modèle a permis de calculer les changements de localisation résidentielle de même que la valeur des propriétés. [18]

Selon le modèle, la localisation résidentielle pourrait être affectée par les véhicules autonomes [18]. Ainsi, les banlieues et les zones non-urbaines seraient plus attrayantes pour les personnes possédant un véhicule privé considérant que la durée du trajet ne serait plus une contrainte. En revanche, les régions urbanisées et les villes denses seraient plus attrayantes en présence d'un transport public autonome. De façon générale, le modèle est conçu de manière à ce que la valeur foncière et celle des habitations augmente avec la demande. Et, la hausse de la valeur foncière ferait contrepoids en freinant l'accroissement de la demande future. Dans les cas où les véhicules privés seraient prédominants, il faudrait s'attendre à un nivellement des valeurs foncières. En effet, les valeurs foncières diminueraient en ville et augmenteraient dans les zones périphériques. Mais, puisque cette valeur demeure nettement plus élevée en ville, elle ne serait pas complètement compensée par l'augmentation des propriétés situées en périphérie. Dans les cas où le transport public serait prédominant, la valeur foncière augmenterait en ville et dans les centres urbains, deux endroits où elle est déjà élevée. Enfin, l'effet combiné des véhicules autonomes privés et partagés devrait s'annuler. Si bien que les valeurs foncières demeureraient inchangées. [18]

Deux études [20, 23] sont également d'avis que la distribution de la valeur foncière sur le territoire serait grandement affectée par le déploiement des véhicules autonomes en raison de la réduction du temps de trajet perçu. Cela encouragerait une partie de la population à se relocaliser en banlieue alors que les zones urbaines poursuivraient leur densification.

Une étude américaine [19, 50] a, par ailleurs, examiné l'impact des véhicules autonomes partagés sur le choix de localisation résidentielle. L'approche a consisté à intégrer deux modèles et à simuler leurs effets respectifs. Les modèles ont été calibrés à l'aide des données provenant de l'enquête origine-destination et du parc domiciliaire de la région métropolitaine d'Atlanta. Plusieurs variables explicatives ont été introduites dans le modèle de localisation résidentielle, dont : les attributs du domicile, le profil sociodémographique des ménages, les caractéristiques du milieu bâti et les coûts de transport. Le modèle en transport repose sur une flotte de 367 000 véhicules communautaires et un temps d'attente moyen de 7 minutes. La population a été divisée en 4 segments de marché selon l'âge du chef de ménage (âgé de plus de 40 ans ou non) et le cycle de vie familial (avec ou sans enfants). Les tendances actuelles observées révèlent que les ménages préfèrent les résidences plus récentes, à un prix abordable, les trajets de courte durée et peu dispendieux de même qu'un environnement où les groupes ethniques sont similaires. Les ménages avec enfants quel que soit leur âge ont une préférence pour les maisons individuelles et

affectionnent les banlieues à faible densité. Ils recherchent la proximité d'écoles de bonne réputation, les parcs et les espaces verts. [19, 50]

Sur la base de ces préférences, le modèle en transport a permis de dégager un certain nombre de faits saillants [19, 50]. Ainsi, la présence de véhicules communautaires mènerait à une redistribution de la population sur le territoire. Les couples sans enfants auraient tendance à se relocaliser plus loin du centre d'affaires (*Central Business District*) et à se concentrer dans un rayon de 30 à 40 km. En revanche, un certain nombre d'entre eux se déplaceraient nettement plus loin (45 à 55 km) en raison des coûts de transport réduit et d'un accès à des propriétés plus abordables. Une tendance similaire s'observe chez les jeunes ménages avec enfants. En raison des coûts réduits en transport, ils seraient plutôt enclins à s'éloigner de leur lieu de travail (plus de 60 km). Vraisemblablement, la proximité d'écoles publiques de bonne réputation compenserait largement le temps passé en déplacement. Pour leur part, les couples âgés préféreraient s'éloigner quelque peu du centre d'affaires. Les propriétés plus récentes et à meilleur prix localisées à l'intérieur d'un rayon de 15 km autour du centre-ville seraient plus attrayantes en raison du coût de trajet réduit. Chez les ménages âgés avec enfants, la tendance serait inversée. Ils seraient plutôt enclins à se rapprocher à moins de 30 km du centre-ville. Ces ménages seraient en mesure d'assumer des propriétés plus dispendieuses avec une meilleure accessibilité aux services et aux écoles de qualité en raison d'une réduction significative des coûts de transport. [19, 50]

Globalement, les résultats montrent que la distance au lieu de travail et au centre d'affaires est influencée par les coûts de transport [19, 50]. Si les coûts devaient être élevés, la plupart des ménages seraient enclins à demeurer plus près de leur lieu de travail. Chez les ménages avec enfants, l'économie réalisée dans les transports serait réinvestie dans une propriété plus éloignée du lieu de travail, dans des secteurs convoités pour leur faible densité, la proximité des services et des écoles. En revanche, certains de ces ménages, parmi les mieux nantis, seraient en mesure d'assumer l'achat de propriétés plus dispendieuses situées à proximité du centre-ville. Le segment constitué des jeunes couples est sans doute celui qui s'avère le plus sensible aux coûts de transport. En résumé, les résultats suggèrent que l'ensemble des segments de marché serait moins attaché à leur lieu de travail, ce qui permettrait une plus grande latitude dans le choix de la localisation résidentielle. Enfin, les résultats indiquent un accroissement significatif de la distance de navettage de l'ordre de 11 à 23 %. [19, 50]

Une étude européenne [21] a examiné l'impact des véhicules autonomes sur la localisation résidentielle au sein de la ville de Rome. L'approche a reposé sur une enquête menée auprès de 200 personnes afin de sonder leur comportement en matière de choix résidentiel, leur intention de déménager en banlieue advenant le déploiement des véhicules autonomes de même que leurs préférences sur le type de service (véhicule privé, communautaire ou partagé) et les voies réservées. Les informations recueillies ont été introduites dans un modèle afin de simuler l'impact du déploiement des véhicules autonomes sur la dispersion de la population. Dans cette étude, le modèle postule que les véhicules traditionnels et autonomes partagent les mêmes voies de circulation et que la capacité du réseau routier demeure inchangée. Les résultats révèlent un accroissement substantiel de la population en banlieue immédiate (zone comprise entre le centre et l'autoroute de contournement de Rome – A90) alors que les véhicules autonomes constituent la moitié du parc automobile. La préférence des répondants pour les véhicules privés explique ces résultats. De plus, cette migration est d'autant plus significative que la majorité des répondants possèdent déjà une résidence (70 %) dans les secteurs centraux. Il va sans dire que cette relocalisation se traduirait par une hausse de la congestion automobile dans la banlieue immédiate. En

revanche, les résultats montrent que la congestion pourrait être enrayée en banlieue et dans les secteurs centraux si l'ensemble des véhicules autonomes était partagé. Il semble évident que le déploiement des véhicules autonomes privés contribuerait à une seconde vague d'étalement urbain en raison d'une relocalisation résidentielle au profit de la banlieue. [21]

Résumé

Selon les études, l'autonomisation permettra de se dégager des tâches de conduite si bien que les occupants pourront se consacrer à d'autres activités durant le trajet (ex. : travail, loisir, etc.). Pour cette raison, la distance parcourue ne serait plus une contrainte et entraînerait une réduction du temps de trajet perçu. Aussi, l'impact des véhicules autonomes sur le choix du lieu de résidence dépendrait plutôt de l'usage que l'on ferait des véhicules (usage privé, communautaire ou partagé).

Dans les cas où le véhicule autonome privé dominerait largement le marché, une hausse de l'accessibilité à des propriétés abordables s'ensuivrait. Les ménages seraient alors disposés à parcourir de plus longues distances et à s'éloigner davantage de leur lieu de travail pour accéder à un milieu de vie de qualité. Il faudrait alors s'attendre à une migration des résidents vers les banlieues très excentriques (30 à 50 km) accompagnée d'une baisse démographique correspondante dans la ville centre et sa banlieue proche (5 à 15 km). Selon les estimations, la surface urbanisée devrait augmenter de près de 15 %.

Dans les cas où le véhicule autonome communautaire dominerait le marché, les ménages seraient également disposés à s'éloigner de leur lieu de travail en échange d'un accès à des propriétés abordables et à un cadre de vie de qualité. Les véhicules communautaires auraient pour effet de diminuer le parc automobile, ce qui résulterait en une hausse de la capacité routière favorable aux longs trajets. Dans ce cas, il faudrait s'attendre à une migration des résidents vers la banlieue proche (5 à 15 km) et une baisse démographique de la ville centre. Cependant, l'attraction exercée par les propriétés abordables serait variable selon le cycle de vie familial. De fait, les jeunes ménages (≥ 40 ans) seraient disposés à s'installer en banlieue excentrique (30 à 50 km) alors que les ménages plus âgés (< 40 ans) financièrement à l'aise auraient tendance à se rapprocher quelque peu de la ville centre (2 km).

Dans les cas où le véhicule partagé dominerait le marché, la diminution du parc automobile et l'accroissement de la capacité routière s'accompagneraient d'un transfert modal en faveur d'un transport en commun plus efficace. Dans ce cas, il faudrait s'attendre à une forte concentration démographique dans la ville centre (1 à 5 km) et sa banlieue proche (5 à 15 km).

3. IMPACTS SUR LES LIEUX D'ENTREPRISE

Le choix de localisation des entreprises pourrait être affecté par le déploiement des véhicules autonomes. Une étude menée en Autriche [11] a recensé et analysé près d'une quarantaine de modèles de simulation visant à mesurer l'impact des véhicules autonomes sur l'utilisation du sol au moyen de diverses hypothèses. Ces travaux révèlent que le déploiement des véhicules partagés accompagné d'une réduction de la valeur du temps et des espaces de stationnement, contribuerait à encourager la décentralisation des industries vers les banlieues. En fait, les entreprises du secteur manufacturier seraient enclines à se relocaliser en périphérie. Selon les paramètres retenus, cette décroissance en nombre d'emplois pourrait varier de 2 à 18 % dans les secteurs centraux et se traduirait par un accroissement plus modéré en banlieue de l'ordre de 0 à 10 %. En ce qui concerne les entreprises du secteur tertiaire, la tendance serait inversée. Les simulations révèlent que le nombre d'emplois associés aux activités de service pourrait augmenter jusqu'à 12 % dans les secteurs centraux et diminuer de 3 à 8 % en banlieue [11].

Une recherche menée sur Atlanta [50] est parvenue à estimer l'impact des véhicules autonomes communautaires sur la localisation des entreprises. Afin de simuler des scénarios réalistes de redistribution, elle s'est d'abord penchée sur les facteurs expliquant la répartition des entreprises (cf. économie d'échelle, capital humain et personnel qualifié, marché d'écoulement, infrastructures de transport, environnement bâti) par secteur d'activités dans l'ensemble de la région métropolitaine. Actuellement, les entreprises manufacturières, de construction, de transport, de communication et d'énergie de même que les commerces de gros sont incapables de payer la rente foncière des secteurs centraux et préfèrent les zones plus éloignées du centre-ville. Les entreprises associées à la finance, aux assurances, à l'immobilier, aux services et à l'administration publique privilégient les quartiers centraux qui leur assurent une activité intensive. Quant aux commerces de détail, ils sont fortement influencés par la taille du marché et tendent à reproduire la distribution de la population. La modélisation repose sur la conversion de 90 % des cases de stationnement en espaces commerciaux et industriels, contribuant à une hausse de la densité globale d'occupation. Les résultats révèlent que la superficie commerciale et industrielle augmente de 10 %, assumant un taux de conversion de 90 % des espaces de stationnement. Cette superficie est nettement plus élevée dans les quartiers centraux et les zones situées à proximité des autoroutes ou des voies rapides. De plus, l'accès au capital humain et au personnel qualifié mène à une augmentation de la densité d'occupation commerciale et industrielle particulièrement dans les centres urbains de la région métropolitaine d'Atlanta. [50]

Dans le but d'étudier la redistribution de l'emploi sur l'ensemble du territoire d'Atlanta [50], des simulations ont été réalisées en considérant la densité d'occupation des commerces et de l'industrie de même que l'accès au capital humain actuel et projeté. Les résultats suggèrent que les véhicules autonomes communautaires pourraient exacerber la tendance migratoire des activités commerciales et industrielles observée dans la région. Dans ce scénario, les entreprises manufacturières, de construction, de transport, de communication et d'énergie de même que les commerces de gros ont tendance à se relocaliser en banlieue. La densité d'emplois associée à ces secteurs d'activités décroît de façon significative au centre-ville et dans les quartiers centraux alors qu'elle augmente dans les banlieues immédiates et éloignées. En particulier, les emplois liés à la construction se concentrent en banlieue immédiate pendant que ceux

associés à l'industrie, au transport, à la communication, à l'énergie et au commerce de gros se relocalisent en banlieue éloignée. Par ailleurs, les entreprises associées à la finance, aux assurances, à l'immobilier, aux services et au secteur public tendent à se concentrer au centre-ville et dans les quartiers centraux. À ces endroits, la densité d'emplois augmente jusqu'à 11 % selon le type d'entreprise. Quant au commerce de détail, les emplois augmentent partout sur le territoire bien qu'avec une hausse plus marquée (5 %) en banlieue immédiate. En général, les emplois associés au commerce de détail tendent à reproduire la distribution de la population. En définitive, les véhicules autonomes communautaires auraient tendance à modifier la répartition des emplois sur le territoire par secteur d'activités. En revanche, certaines entreprises ne quitteraient pas la ville pour des raisons d'économie d'échelle. Il semble probable que les véhicules autonomes contribueront à ségréger les différents types d'emplois à l'échelle de la région et accéléreront la tendance de l'industrie à la relocalisation, observée aux États-Unis. [50]

Tableau 1 : Tendances prévisibles de relocalisation d'entreprise selon le secteur d'activités

Secteurs d'activités	Zones			
	Centre-ville	Ville centre	Banlieue proche	Banlieue éloignée
Manufacture	--	--	=	+
Construction	--	---	++	+
Transport & énergie	---	--	=	+
Commerce de gros	---	-	++	++
Commerce de détail	=	+	=	=
Finance, assurance & immobilier	+++	=	--	-
Services	+	=	--	-
Administration publique	+	=	--	--

Légende : changement nul (=), baisse par tranche de 5 % (-), hausse par tranche de 5 % (+)

Adapté de Zhang W. (2017) The interaction between land use and transportation in the era of shared autonomous vehicles: a simulation model. Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, p. 127.

Résumé

L'impact des véhicules autonomes sur la localisation des entreprises aura pour effet d'accentuer les tendances actuelles observées. Les entreprises devraient se redistribuer différemment par secteur d'activités au sein de la région métropolitaine.

Ainsi, les manufactures et les entreprises de transport et d'énergie devraient quitter la ville centre afin de s'établir en banlieue éloignée (30 à 40 km). Les entreprises de construction privilégieraient plutôt la banlieue proche (5 à 15 km). Le commerce de gros opterait davantage pour les banlieues proche et éloignée en raison de la surface requise et de la valeur abordable de la rente foncière. Les services et l'administration publique favoriseraient vraisemblablement le centre-ville. Quant au secteur de la finance, de l'assurance et de l'immobilier, les entreprises seraient fortement attirées par le centre-ville.

La relocalisation des entreprises n'aurait vraisemblablement pas d'effet sur le nombre total d'emplois mais plutôt sur leur redistribution dans la région métropolitaine.

4. IMPACTS SUR LE STATIONNEMENT

Selon un projet européen qui a étudié les tendances actuelles en matière d'automatisation des véhicules [1], le volume de circulation dans la ville du futur, correspondrait à une fraction du parc automobile actuel à laquelle s'ajouteraient les véhicules autonomes utilisés principalement aux heures de pointe. Le nombre de véhicules possédés risquerait donc de diminuer. Par ailleurs, l'étude estime que la demande en véhicules autonomes privés serait vraisemblablement limitée. Cela serait attribuable au nombre croissant de conducteurs occasionnels souhaitant délaissier leur véhicule privé. Les véhicules autonomes devraient libérer de l'espace, non seulement en réduisant le nombre de cases de stationnement, mais aussi l'espace attribué à chacun des véhicules notamment dans un site de dépôt commun ou un centre de services. En raison de l'anonymat des véhicules autonomes à usage non privé, le stationnement devrait correspondre au quart de l'espace actuellement requis. L'espace ainsi libéré pourrait être utilisé afin d'améliorer l'environnement urbain par une requalification des espaces publics aux bénéfices des piétons, des cyclistes ou des voies réservées aux autobus à haute performance. [1]

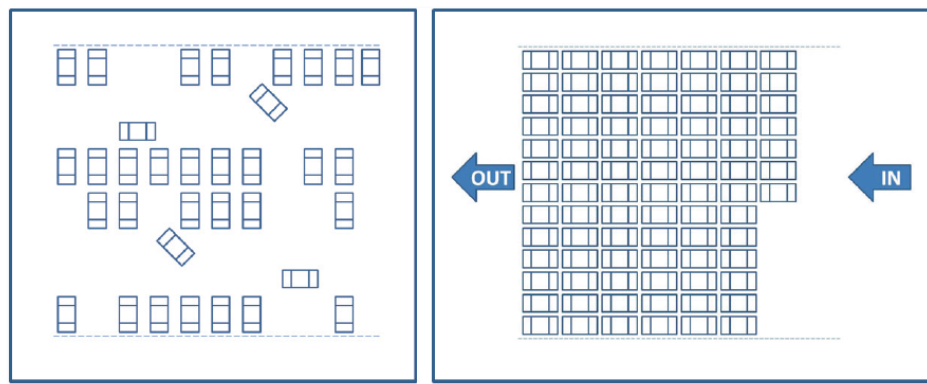


Figure 4 : Optimisation d'un stationnement par l'anonymat des VAE

Source : Alessandrini A., Campagna A., Delle Site P., Filippi F. and Persia L. (2015) "Automated Vehicles and the Rethinking of Mobility and Cities". Transportation Research Procedia 5, p. 155

La réduction des besoins en espace de stationnement est certainement l'aspect sur lequel la plupart des études s'entendent [3, 25]. Actuellement, les parcs de stationnement occupent une vaste surface dans les centres-villes. Aux États-Unis et dans plusieurs villes canadiennes, on dénombre 8 cases de stationnement par véhicule. Avec le déploiement des véhicules autonomes, la demande en espace de stationnement diminuerait substantiellement pour plusieurs raisons. En premier lieu, les véhicules autonomes seraient en mesure de se garer par eux-mêmes en cherchant un parc de stationnement plus éloigné du centre et vraisemblablement gratuit. En second lieu, un véhicule autonome partagé pourrait aussi être appelé à rejoindre un nouveau client. Enfin, un navetteur pourrait aussi décider de renvoyer le véhicule autonome à son domicile afin qu'il soit utilisé par un autre membre de la famille. Tous ces cas de figure auraient des

retombées majeures sur les besoins en stationnement et sur la circulation dans les centres-villes [3]. À Boston [14], un modèle de simulation a estimé que près de la moitié (48 %) de la surface dédiée au stationnement pourrait être ainsi libérée. Cette étude repose sur les préférences des citoyens en matière de mode de transport et les habitudes de déplacements quotidiens. Cette réduction serait vraisemblablement attribuable à une réduction des trajets réalisés à l'aide du véhicule personnel.

Certains travaux [5, 15, 20] suggèrent une reconfiguration plus efficace des stationnements étagés. Ainsi, il est proposé de remplacer les rampes d'accès et les allées par des monte-charges, de diminuer la hauteur des étages et d'accroître la densité du stationnement. On estime que cela permettrait d'accueillir 60 % plus de véhicules. Ce genre de stationnement existe déjà aux États-Unis, en Malaisie et dans d'autres pays.



Figure 5 : Reconfiguration d'un stationnement étagé, Autostrade, Wolfsburg, Germany

Source : <http://www.arch2o.com/autostadt-volkswagen-theme-park/>

Ce genre de réaménagement serait vraisemblablement priorisé dans les secteurs à forte attraction où les coûts de construction des espaces de stationnement sont particulièrement élevés et les solutions d'économie d'espace très recherchées. Les centres de service à forte densité, les zones commerciales et les centres d'affaires attirant de nombreux travailleurs seraient parmi les secteurs à prioriser. Les zones aéroportuaires et les stations ferroviaires de même que les centres de mobilité (ex. : gare intermodale) représenteraient des secteurs à privilégier à plus long terme. En revanche, d'autres études [15] suggèrent plutôt des normes de conception permettant aux stationnements étagés d'être convertis à d'autres fins (bureaux, commerces, etc.). Pour cette raison, ils devraient être en mesure de supporter de lourdes charges. Et, le dégagement vertical devrait être suffisamment élevé pour permettre l'ajout de conduites et d'installations mécaniques dans l'éventualité où le stationnement étagé devrait être réaffecté.

À ce jour, l'impact des véhicules autonomes sur les revenus de stationnement ne sont pas estimés [5]. Il va sans dire que la mobilité des véhicules autonomes, leur capacité à se déplacer seuls et pouvoir se stationner quel que soit l'endroit soulèvent des enjeux sur les revenus générés par les parcs de stationnement. À ce propos, une étude [12] déconseille la gratuité des parcs de stationnement. En effet, l'accès à des parcs de stationnement gratuits aurait pour effet de reporter les dépenses d'opération sur l'ensemble de la

population. Or, les frais de stationnement devraient plutôt encourager la population à utiliser des modes de transport collectif dont les véhicules partagés. Dans les quartiers centraux, la disponibilité des parcs de stationnement devrait être limitée d'autant que les véhicules autonomes seront souvent en mouvement pour répondre aux besoins des usagers et en mesure de retourner au lieu de domicile ou de rejoindre des parcs de stationnement périphériques moins dispendieux. Si le covoiturage devait gagner en popularité, cela pourrait entraîner une réduction des besoins en stationnement ou à tout le moins mener à une réduction des espaces au sein des quartiers centraux ou dans les centres-villes [12, 51]. Selon toute vraisemblance, les répercussions des véhicules autonomes seraient plus marquées dans les secteurs centraux. Cela permettrait de réaffecter l'espace et les stationnements étagés à d'autres usages et ainsi redynamiser les secteurs centraux. La réduction des besoins aurait d'autres effets dont l'élimination des espaces de stationnement sur rue, la diminution du nombre de voies requis et la densification du cadre bâti. [12]

Une recherche menée sur Atlanta [16, 50] est parvenue à évaluer l'impact des véhicules autonomes communautaires sur la demande globale en stationnement. Reposant sur un modèle de simulation et un scénario de pénétration de 5 % des véhicules autonomes communautaires et partagés, chacun de ces véhicules serait en mesure de libérer 20 cases de stationnement. Le modèle a simulé diverses conditions dont la taille de la flotte de véhicules (500 à 800), la volonté de faire du covoiturage (25 à 100 %), le temps d'attente (2 à 10 mn), les coûts du service (tarif horaire) et la durée des véhicules à vide (20 à 30 mn). Les résultats révèlent que la demande en stationnement décroît avec l'augmentation de la flotte de véhicules autonomes et la volonté de faire du covoiturage. Cependant, l'impact de cette réduction serait variable sur le territoire. Elle serait plus élevée en banlieue périphérique et moindre dans les secteurs centraux. Cela serait attribuable à l'attraction exercée par les quartiers centraux en termes de déplacements et donc de véhicules nécessitant un espace de stationnement. Le temps d'attente serait davantage déterminé par la taille de la flotte de véhicules. Cependant, au-delà d'un certain seuil, la taille de la flotte de véhicules n'aurait plus d'influence significative sur le temps d'attente. Par ailleurs, si les véhicules circulaient à vide plus longtemps avant d'aller se stationner, la demande en stationnement serait d'autant réduite. Et cette réduction serait perceptible à la fois dans les quartiers centraux et la banlieue. Le modèle estime que la demande en stationnement pourrait diminuer de 88 à 97 % selon les scénarios. La meilleure combinaison repose sur une flotte de taille optimale (650), 50 % des trajets en covoiturage et une durée limitée de voyage à vide (10 mn). Cependant, la réduction de la demande globale en stationnement serait moindre dans les secteurs centraux. [16, 50]

Dans la foulée de la recherche sur Atlanta [50, 52], d'autres travaux ont été menés afin d'estimer l'effet des véhicules autonomes sur la distribution spatiale des stationnements selon trois scénarios associés aux frais de stationnement. Le premier scénario prévoit une gratuité complète. Le second scénario présume un prix d'entrée fixe aux parcs de stationnement. Le dernier scénario prend appui sur des frais variant avec la durée du stationnement. Les résultats révèlent que la gratuité entraîne une augmentation de la demande en stationnement à proximité des zones d'attraction majeures, dont : le centre-ville (*Central Business District*) et les quartiers centraux. Le scénario basé sur un prix d'entrée engendre un déplacement de la demande vers des zones dont la valeur foncière est plus faible. Quant au dernier scénario, il génère une demande plus forte en faveur des stationnements plus excentriques où la valeur foncière est plus basse. Cependant, quel que soit le scénario retenu, le modèle montre que les stationnements des banlieues éloignées ne seraient pas touchés par la demande. Comme le choix de l'emplacement est déterminé par un juste

équilibre entre les frais de stationnement et les coûts associés au trajet aller-retour, les stationnements adjacents aux quartiers centraux seraient les plus sollicités. Dans les deux scénarios où le stationnement s'avère payant, la demande au centre-ville décroît de façon substantielle. Et cette réduction engendre un effet de débordement vers les quartiers mixtes et résidentiels à faibles revenus avoisinant le centre-ville [50]. Ces scénarios s'accompagnent d'effets négatifs dont un kilométrage plus élevé, une hausse de la congestion par des véhicules circulant à vide et un temps d'attente plus élevé. [52]

Une recherche menée sur Seattle [57] a étudié l'effet des coûts de stationnement sur la localisation privilégiée par les véhicules autonomes privés. Basés sur un modèle de simulation, les résultats révèlent que les véhicules seraient enclins à rejoindre un stationnement plus éloigné afin de réduire les coûts. De fait, cela engendrerait une hausse du kilométrage parcouru et un accroissement de la congestion automobile [57]. En revanche, à Zurich, une étude [58] a estimé qu'une hausse des coûts de stationnement aurait pour effet d'encourager le transfert modal vers les véhicules communautaires, permettant de réduire la pression sur la demande globale en stationnement.

Un rapport publié au Royaume-Uni [7] estime que le recours aux véhicules autonomes serait en mesure de libérer de 15 à 20 % plus d'espace au sol dans les quartiers centraux. Ce gain serait attribuable, en grande partie, à la suppression des parcs de stationnement, puisque les lieux de dépôt des véhicules autonomes ou les centres de service ne requièrent pas d'emplacements de premier choix. De plus, la configuration simplifiée du réseau routier permettrait de libérer de l'espace additionnel. Selon l'échelle, cela pourrait se traduire par des milliers de logements additionnels de même que l'ajout d'espaces publics. En raison d'un usage plus efficace de l'espace au sol, cela entraînerait une réduction des coûts de développement et une hausse de la valeur foncière. Ce changement de configuration urbaine serait susceptible de favoriser la densification des quartiers centraux et le déploiement d'espaces publics et d'espaces verts, en éliminant par la même occasion l'encombrement des voies publiques.



Figure 6 : Reconfiguration d'une rue sans stationnement au centre-ville

Source : WSP | Parsons Brinckerhoff (2016) Making better places: Autonomous vehicles and future opportunities. UK, p. 12

Dans les quartiers résidentiels de banlieue, le stationnement sur rue serait éliminé. Les véhicules autonomes y seraient disponibles à la demande et leur présence se réduirait à récupérer ou déposer des passagers ou à livrer des marchandises non-périssables. Le trajet accompli, ils retourneraient aux lieux de dépôts communs ou aux centres de service. Ce scénario présume que les véhicules sont utilisés à des fins de covoiturage. [7]



Figure 7 : Reconfiguration d'une rue sans stationnement en banlieue

Source : WSP | Parsons Brinckerhoff (2016) Making better places: Autonomous vehicles and future opportunities. UK, p. 16

En zone rurale, plusieurs bénéfices sont attribués aux véhicules autonomes. Bien que le taux de possession des véhicules y soit plus élevé qu'en milieu urbain, le déploiement des véhicules autonomes partagés ou communautaires représente une occasion de réhabiliter les espaces centraux de ces localités à des fins commerciales ou de loisir. De plus, les véhicules autonomes peuvent constituer un moyen de réduire l'isolement, d'améliorer la mobilité et d'accroître l'accessibilité aux commerces, aux services (cf. soins de santé, établissements scolaires), aux activités sociales et aux centres d'emplois grâce à de meilleures connexions aux centres urbains [7].



Figure 8 : Reconfiguration d'une rue sans stationnement en zone rurale

Source : WSP | Parsons Brinckerhoff (2016) Making better places: Autonomous vehicles and future opportunities. UK, p. 24

Une étude menée en Autriche [11] a recensé et analysé près d'une quarantaine de modèles de simulation visant à mesurer l'impact des véhicules autonomes sur l'utilisation du sol au moyen de diverses hypothèses. L'impact sur le stationnement s'avère le plus important en raison d'un ratio d'espace par véhicule moindre et d'un nombre réduit de véhicules en circulation. La plupart de ces modèles sont basés sur le remplacement des véhicules privés, en tout ou en partie, par des véhicules communautaires. Globalement, cela pourrait se traduire par une réduction substantielle du nombre de véhicules en circulation (jusqu'à 90 %) et davantage s'il s'agit de covoiturage. Cette réduction aurait des effets conséquents sur les besoins en matière de stationnement. En revanche, si les véhicules privés demeuraient prépondérants, le nombre de véhicules en circulation resterait important, entraînant une réduction moindre des espaces de stationnement libérés. La réduction du nombre de véhicules en circulation serait alors estimée à moins de 10 %. [11]

La demande réduite en stationnement aurait des répercussions sur l'ensemble des bâtiments quel qu'en soit l'usage [23]. L'impact sur les édifices à bureaux serait variable selon leur localisation. Au centre-ville (*Central Business District*), les bâtiments possédant des espaces de stationnement adjacents ou intégrés seraient les plus touchés, puisque ces espaces deviendraient inoccupés. De plus, les édifices à bureaux devraient aménager des débarcadères afin d'accommoder les allées et venues des personnes circulant en véhicule autonome. Les édifices pourraient avoir leur propre débarcadère ou profiter de stations centralisées. Il serait aussi possible de réaffecter les stationnements en débarcadère. En banlieue, l'impact sur les édifices à bureaux serait plus modéré. Les espaces de stationnement disponibles suffiraient largement à y aménager des débarcadères. Et, l'espace libéré pourrait servir à d'autres fins en favorisant la densification ou la mixité des usages. Les nouveaux édifices pourraient être construits à proximité des bâtiments existants et plus près de la rue. [23]

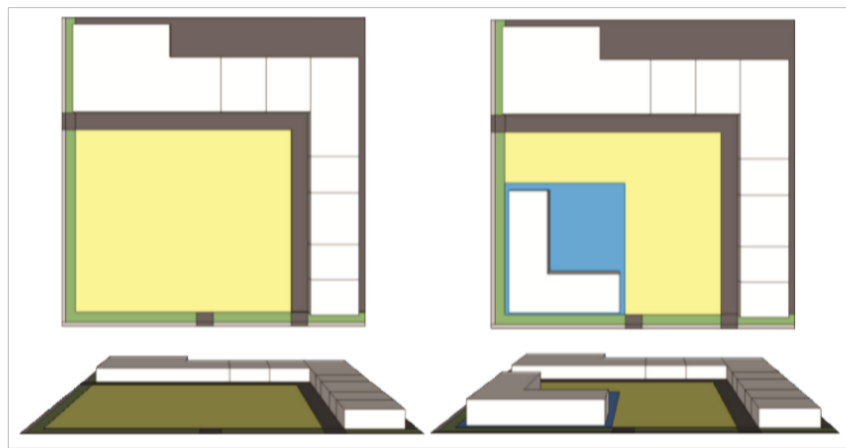


Figure 9 : Réaffectation d'une surface de stationnement

Source : Henderson J. and Spencer J. (2016) "Autonomous Vehicles and Commercial Real Estate". Cornell Real Estate Review, 14 : 1, p.52

Dans le cas des immeubles à appartements dotés de stationnements adjacents [23], l'espace libéré permettrait de construire de nouvelles unités de logement ou pourrait être vendu à des fins d'usage commercial. Dans le cas des immeubles à appartements de plus forte densité, la réaffectation du stationnement en sous-sol s'avère plus difficile. L'espace libéré pourrait être réaffecté aux débarcadères, à l'entreposage ou à d'autres installations. La réduction de la demande en stationnement aurait des effets similaires sur les complexes hôteliers. Ceux localisés au centre-ville n'auraient plus besoin d'espace pour accueillir les clients qui arrivent par taxi ou transport public. En revanche, les effets seraient plus marqués sur les hôtels disposant de vastes stationnements. La plupart de ces hôtels sont adjacents à des échangeurs qui les relient au réseau routier supérieur. Ces hôtels pourraient toutefois rentabiliser l'espace libéré par l'ajout de chambres ou la vente à des fins d'usages connexes. [23]

Tableau 2 : Répercussion de la baisse de la demande en stationnement sur le parc immobilier

Type de bâtiment	Zone / Regroupement	Intensité de l'effet	Réaffectation
Édifices à bureaux	Quartiers centraux	Élevé	Débarcadère en surface / Autres usages en sous-sol
	Banlieue	Modéré	Débarcadère en surface / Densification ou mixité des usages en surface
Immeubles à appartements	Quartiers centraux et banlieue	Élevé	Ajout de logements en surface / Débarcadère, entreposage et autres installations en sous-sol
Complexes hôteliers	Quartiers centraux	Modéré	Débarcadère en surface/ Autres usages en sous-sol
	Banlieue	Élevé	Ajout de chambres ou vente à des fins d'usages connexes en surface
Bâtiments industriels	Quartiers centraux et banlieue	Faible	Aires de chargement plus compactes à terme
Installations multimodales de marchandises	Quartiers centraux et banlieue	Nul	
Commerces	Rue commerçante	Faible à nul	
	Centre régional	Modéré	Débarcadère en surface / Localisation plus près de la rue / Conversion en centre de distribution
	Centre régional et suprarégional	Élevé	Diversification des activités / Débarcadère et autres usages en surface

Inspiré de Henderson J. and Spencer J. (2016) "Autonomous Vehicles and Commercial Real Estate". Cornell Real Estate Review, 14: 1, pp. 44-55.

Les installations industrielles seraient fortes peu touchées par le déploiement des véhicules autonomes [23]. L'essentiel de leurs activités se concentre sur la production de marchandises, le triage, le chargement et le déchargement des camions. À terme, les cours et les aires de chargement pourraient être plus compactes. Quant aux installations multimodales de marchandises, elles seraient fort peu touchées en

raison des frais réduits associés aux transports ferroviaire et maritime. Enfin, l'impact sur les commerces serait variable selon leur usage et le type de regroupement. Les commerces d'alimentation verraient leur besoin en stationnement réduit. Les centres commerciaux pourraient être construits plus près de la rue. Par ailleurs, certains commerces pourraient tirer avantage des véhicules autonomes en devenant des centres de distribution à domicile et en réaffectant leur surface plancher aux opérations logistiques. Les centres régionaux et suprarégionaux devraient diversifier davantage leurs activités (divertissements et loisirs). Cette tendance observée au cours de la dernière décennie devrait s'accélérer grâce aux véhicules autonomes. Les nouveaux centres commerciaux d'envergure devraient occuper moins de surface. Et, les centres actuels devraient être en mesure de réaffecter leurs espaces de stationnement à d'autres fins. [23]

La présence des véhicules autonomes devrait s'accompagner d'une demande croissante en zone de débarcadère, particulièrement aux endroits suscitant une forte attraction [5]. Certains principes de base devraient guider le design de ces zones [15]. Ainsi, les zones de débarcadère devraient être localisées à proximité de l'entrée des édifices afin de permettre un accès rapide et facile, en évitant que la distance de marche jusqu'à l'édifice ne soit perçue comme une barrière par l'utilisateur. À l'image des aéroports, des voies séparées devraient être aménagées pour accéder aux débarcadères de façon à limiter les encombrements sur la voie publique. Afin d'assurer un écoulement de la circulation, les zones d'embarquement et de débarquement devraient être séparées. Un accès véhiculaire devrait aussi être aménagé entre ces zones afin de permettre aux véhicules autonomes récemment libérés de pouvoir récupérer de nouveaux passagers. Les zones d'embarquement devraient être pourvues d'une aire d'attente avec du mobilier urbain (ex. : bancs, éclairage). Enfin, la zone d'embarquement devrait être suffisamment spacieuse afin d'éviter que les véhicules en attente obstruent la zone de transit [15]. Il existe d'autres configurations plus simples qui s'avèrent tout aussi efficaces. En définitive, la configuration dépend vraisemblablement du volume d'achalandage.



Figure 10 : Configuration d'une zone de débarcadère achalandée (a) et peu fréquentée (b)

Sources : (a) Kittleson & Associates (2018) Effects of Emerging Technologies on Land Use and Development. Boston, Kittleson & Associates, p.7 (b) Chapin T., Stevens L., Crute J., Crandall J., Rokyta A. and Washington A. (2016) Envisioning Florida's Future: Transportation and Land Use in an Automated Vehicle Automated Vehicle World. Final Report, April 2016 FDOT Contract #: BDV30 934-10, p.9

Résumé

L'impact des véhicules autonomes sur le stationnement devrait mener à une baisse de la demande globale pour deux raisons majeures, soit : une diminution plus ou moins marquée du parc automobile à usage privé et une réduction de la surface des stationnements.

La diminution du parc automobile serait liée au transfert modal vers une mobilité servicielle, reposant sur des véhicules en libre-service, communautaires ou partagés. Dans l'éventualité où le nombre de véhicules privés chuterait, cela aurait pour effet de diminuer les besoins en stationnement. Pour sa part, la réduction de la surface de stationnement serait plutôt liée à la réduction de la taille des cases et à la reconfiguration des parcs de stationnement en raison de l'absence d'intervention humaine et de l'anonymat des véhicules autonomes à usage non privé. Selon les études, la reconfiguration des stationnements étagés ou de surface actuelle permettrait d'accueillir 60 % plus de véhicules.

La baisse de la demande globale serait variable par zone. En banlieue, les espaces alloués aux véhicules privés et au stationnement sur rue pourraient être entièrement éliminés. La présence des véhicules autonomes serait limitée aux déplacements à la demande et à la livraison de marchandises. Pour cette

raison, la surface au sol attribuée aux véhicules et au stationnement pourrait être entièrement libérée. Au centre-ville, la surface au sol libérée est estimée entre 15 et 20 % en raison de l'attraction qu'il exerce comme lieu de destination et d'une hausse anticipée de la mobilité.

Au sein de la région métropolitaine, la distribution spatiale des stationnements serait aussi influencée par la tarification pratiquée. La gratuité du stationnement entraînerait une hausse de la demande à proximité des zones d'attraction majeure dont le centre-ville. Une tarification à l'entrée aurait pour effet de déplacer la demande vers les zones à valeur foncière plus faible avec un effet de débordement sur les quartiers adjacents au centre-ville. Enfin, une tarification horaire mènerait à un déplacement de la demande vers les zones à valeur foncière basse ou les quartiers éloignés. Aucun effet sur la banlieue éloignée n'est envisagé puisque le choix de l'emplacement serait déterminé par un juste équilibre entre les frais de stationnement et les coûts associés au trajet aller-retour.

La réduction de la demande globale en stationnement aurait des effets variables sur le parc immobilier selon la fonction dominante du bâtiment et sa localisation. Ainsi, les édifices à bureaux et les immeubles à appartements situés au centre-ville de même que les centres commerciaux régionaux ou suprarégionaux localisés en périphérie seraient les plus touchés. Dans tous les cas, la surface libérée pourrait être réaffectée à d'autres usages ou allouée aux zones de débarcadère.

5. IMPACTS SUR L'ESPACE RUE

La plupart des études s'entendent à dire que le déploiement des véhicules autonomes permettrait d'accroître la capacité des rues en raison de leur prédisposition à circuler en peloton dans un espace plus restreint [23, 24, 27]. Cette hausse de la capacité des rues devrait permettre non seulement de diminuer le nombre de voies mais aussi leur largeur. Ainsi, le rétrécissement de l'emprise de rue serait possible [23, 27, 55]. Dans l'éventualité où une part importante de la population partagerait les véhicules autonomes, il serait possible de réduire davantage le nombre de voies. De même, le stationnement sur rue pourrait diminuer en supposant une réduction de la taille des véhicules et un accroissement du covoiturage. [27, 55]



Figure 11 : Reconfiguration de la rue avant et après le déploiement des véhicules autonomes

Source : Henderson J. and Spencer J. (2016) "Autonomous Vehicles and Commercial Real Estate". Cornell Real Estate Review, 14: 1, p. 49

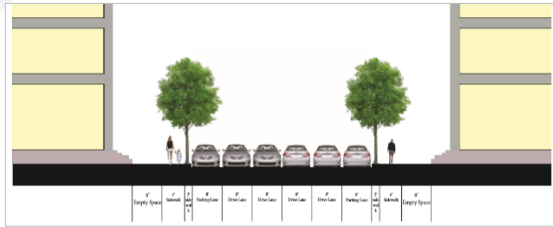
Selon une étude américaine [27], le déploiement des véhicules autonomes représente une occasion inespérée de reconquérir cet espace et de la réaffecter à d'autres usages. Elle propose d'ailleurs aux municipalités de saisir l'occasion de renverser le paradigme en faveur des piétons et des cyclistes [27]. En ordre décroissant, il est suggéré de prioriser les trottoirs et les sentiers, les pistes cyclables protégées, les voies dédiées au transport public, les zones de débarcadère à proximité des intersections de même que les voies de circulation. Cette priorisation permettrait non seulement d'accueillir les véhicules autonomes mais aussi le transport durable.

L'étude suggère une réappropriation de la rue par étapes [27]. En milieu urbain, la plupart des artères urbaines comportent quatre voies de circulation (2x2) et du stationnement des deux côtés de la rue. En premier lieu, chacune des voies pourrait être réduite. La largeur envisagée serait facilement manœuvrable par les véhicules autonomes et les conducteurs circulant à vitesse modérée. De plus, la capacité des

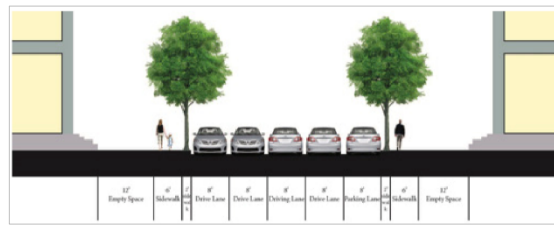
véhicules autonomes à circuler seuls afin de se stationner plus loin signifie que moins d'espace sur rue serait requis pour le stationnement. Ainsi, il serait possible de retirer le stationnement sur l'un des deux côtés de la rue. Par ailleurs, le stationnement sur rue pourrait être complètement éliminé en supposant que les véhicules autonomes puissent accéder à un parc de stationnement situé plus loin. De plus, une étape supplémentaire consisterait à retirer une voie dans chacune des directions. Quel que soit le scénario envisagé, cela permettrait de récupérer près de 10 mètres d'emprise de rue. L'étude présume aussi que les entrées charretières et les allées diminueraient en nombre et en largeur avec l'ajout de débarcadères permettant d'accommoder les allées et venues. La figure 12 permet d'illustrer la réduction progressive de l'emprise de rue et sa réaffectation à d'autres usages.

La première étape du réaménagement progressif des artères urbaines vise à réduire la largeur des voies à 2,45 mètres (8 pi), une largeur praticable par les véhicules autonomes et les conducteurs circulant à vitesse modérée. L'espace libéré servirait à élargir les trottoirs. La seconde étape consiste à retirer le stationnement sur l'un des deux côtés de la rue. Le design pourrait alterner les cases de stationnement d'un côté à l'autre de la rue. La troisième étape (3a) cherche à retirer le stationnement des deux côtés de la rue afin de réaffecter l'espace libéré aux piétons. Une solution alternative (3b) partage l'espace libéré entre les piétons et les cyclistes. Ceux-ci auraient accès à deux bandes cyclables unidirectionnelles. La quatrième étape consiste à retirer une voie de circulation additionnelle, en supposant que les véhicules autonomes dans les deux directions puissent partager la voie du centre lorsqu'elle est libre. La cinquième étape représente un réaménagement radical de l'emprise de rue. Sous certaines conditions et à certains endroits, il n'est pas exclu que les rues puissent être réaménagées de manière complètement différente. Une voie partagée et des zones de débarcadère fourniraient un espace flexible aux véhicules autonomes et au transport public en permettant des espaces spacieux pour la marche, le vélo et les activités sociales. Enfin, la dernière étape propose un réaménagement radical destiné à favoriser le transport public dans les corridors à forte densité d'occupation. [27]

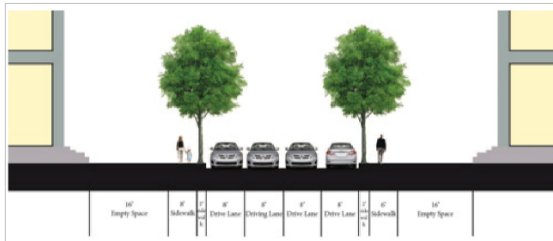
Étape 1. Réduction de la largeur des voies



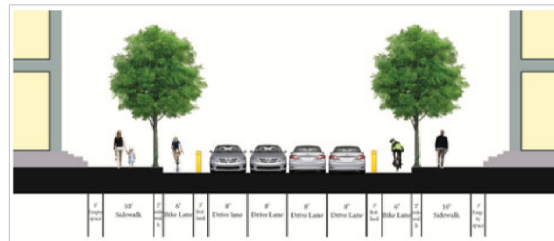
Étape 2. Retrait du stationnement – 1^{er} côté



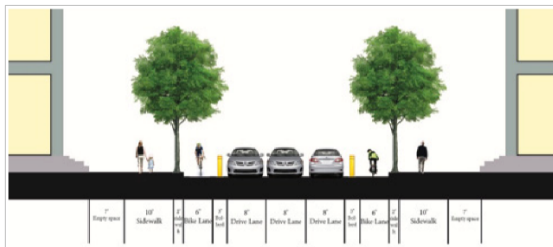
Étape 3a. Retrait du stationnement – 2^e côté



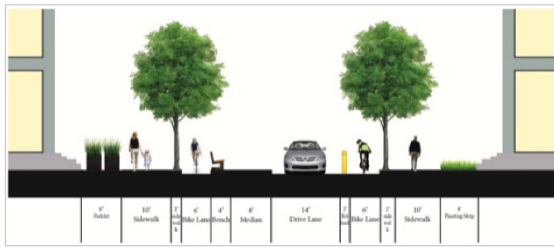
Étape 3b. Retrait du stationnement – 2^e côté



Étape 4. Retrait d'une voie additionnelle



Étape 5. Réaménagement radical # 1



Étape 6. Réaménagement radical # 2

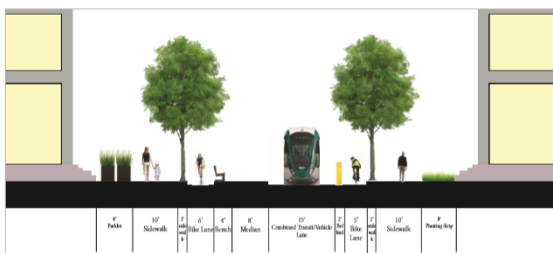


Figure 12 : Réaménagement progressif des artères urbaines

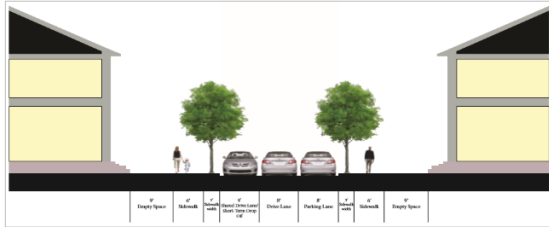
Source : Schlossberg M., Riggs W., Millard-Ball A. and Shay E. (2018) “Rethinking the Street in an Era of Driverless Cars”. Urbanism Next Research, pp. 5, 7-9

L'étude propose également un réaménagement des rues locales selon une progression par étapes [27]. Tout comme les artères urbaines, les rues résidentielles pourraient être entièrement reconfigurées afin de permettre d'autres usages plus conviviaux. Ces rues offrent de multiples possibilités de contribuer aux autres modes de transport. De même, les besoins en stationnement dans les quartiers résidentiels devraient diminuer et permettre une réappropriation des allées, des entrées charretières et des garages. La rue résidentielle traditionnelle comporte deux voies de circulation à contresens (2x1) et du stationnement des deux côtés de la rue. Dans la majorité des cas, sa largeur suffirait à accommoder trois voies de circulation. La plupart de ces rues sont généralement surdimensionnées. Or, le déploiement des véhicules autonomes offre l'occasion de procéder à plusieurs réaménagements. La figure 13 permet d'illustrer la réduction progressive de l'emprise de rue et sa réaffectation à d'autres usages.

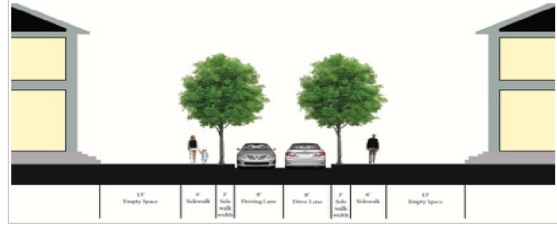
La première étape consiste à réduire la chaussée en diminuant la largeur des voies et en retirant une voie destinée au stationnement. Le design pourrait alterner le stationnement d'un côté ou l'autre de la rue. Cette modification pourrait d'ailleurs être effective à très court terme sans égard pour les véhicules autonomes. La seconde étape vise à retirer complètement le stationnement sur rue. Les voies de circulation seraient en mesure de servir de zones de débarcadère. La dimension de la chaussée serait praticable par les véhicules autonomes et les conducteurs circulant à vitesse modérée. [27]

De plus, le stationnement hors rue pourrait être utilisé, loué à court et long terme ou réaffecté à d'autres usages aux endroits où le transport public a remplacé le véhicule privé. Sur les rues résidentielles plus achalandées, une autre configuration serait sans doute plus appropriée. La troisième étape cherche à retirer une voie additionnelle en vue de modérer la circulation de la rue. Les rues apaisées sont courantes en Europe et dans plusieurs centres historiques américains. Comme chaque rue serait considérée comme un segment du réseau de desserte des véhicules autonomes, la nécessité d'une circulation à contresens serait réduite. L'espace libéré pourrait servir à d'autres usages et être partagé entre les cyclistes, les piétons, les commodités du quartier dont les parcs, les espaces verts et les terrains de jeux. Enfin, la dernière étape propose un changement radical et vise une réappropriation complète de la rue. L'espace libéré pourrait être réaffecté aux usages récréatifs, à de nouvelles habitations, aux commerces de détail, aux espaces publics ou aux activités sociales. [27]

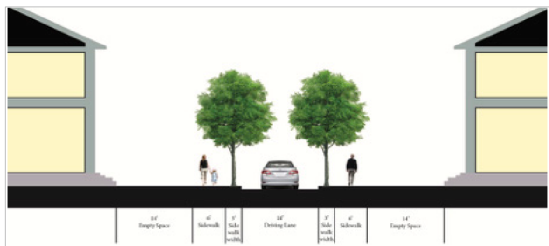
Étape 1. Réduction de la chaussée



Étape 2. Retrait complet du stationnement



Étape 3. Retrait additionnel d'une voie



Étape 4. Réaménagement radical # 1

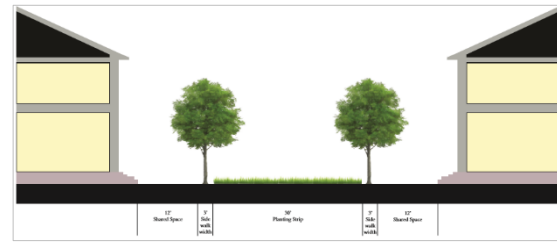


Figure 13 : Réaménagement progressif des rues résidentielles

Source : Schlossberg M., Riggs W., Millard-Ball A. and Shay E. (2018) "Rethinking the Street in an Era of Driverless Cars". Urbanism Next Research, pp. 11-13

Des chercheurs américains [54] proposent que la priorité d'usage soit établie selon le type de rue et la zone. Ainsi, les rues situées au centre-ville et dans les quartiers résidentiels devraient être partagées à la condition qu'elles soient peu fréquentées et à vitesse modérée (inférieure à 40 km/h). À l'inverse, la circulation des divers usagers de la rue devrait être ségrégée sur les artères et les collectrices achalandées où la vitesse varie de 50 à 80 km/h. De plus, les auteurs suggèrent une approche zonale destinée à affecter l'espace rue selon la vitesse de déplacement des usagers, plus particulièrement en affectant les voies centrales aux véhicules autonomes circulant à vitesse élevée. [54]

Tableau 3 : Priorisation de l'espace rue selon le type de rue et la zone

Street Type	Modal Priority	Shared Space (Y/N)
Urban Core (25 MPH)	Pedestrians > Bikes > Transit > Shared AVs > Single Occupancy AVs	Y
Collector (30-50 MPH)	Bikes > Transit > Pedestrians > Shared AVs > Single Occupancy AVs	N
Urban Arterial (50+ MPH)	Transit > Bikes > Pedestrians > Shared AVs > Single Occupancy AVs	N
Neighborhood (<25 MPH)	Pedestrians > Bikes > Shared AVs > Single Occupancy AVs > Transit	Y

Source : Riggs W., Appleyard B. and Johnson M. (2019) "A Design Framework for Livable Streets in the Era of Autonomous Vehicles". Conference Paper, Transportation Research Board, TRB Annual Meeting Online, p.11

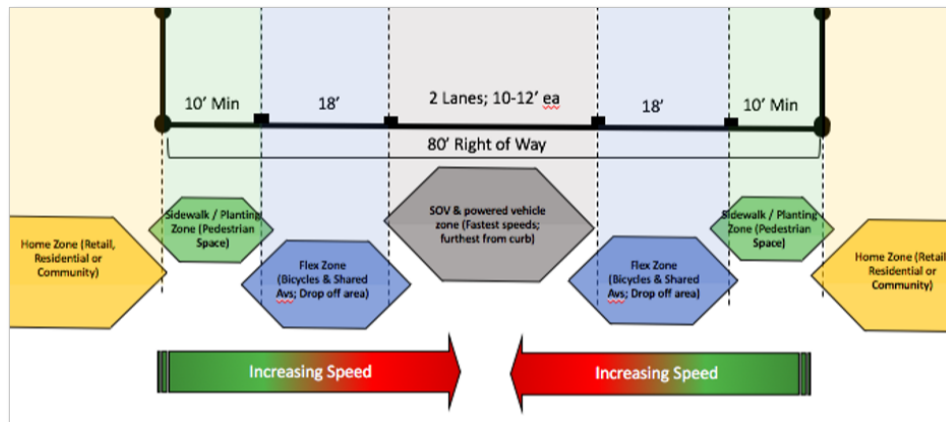


Figure 14. Approche zonale de l'espace rue

Source : Riggs W., Appleyard B. and Johnson M. (2019) "A Design Framework for Livable Streets in the Era of Autonomous Vehicles". Conference Paper, Transportation Research Board, TRB Annual Meeting Online, p.11

Une recherche menée en Floride [53] a mis à contribution un groupe de discussion constitué d'urbanistes, d'ingénieurs, de fonctionnaires municipaux et d'industriels en vue de discuter des adaptations requis par le déploiement des véhicules autonomes. Au-delà des incidences déjà évoquées sur l'emprise de rue, la connexion des véhicules autonomes aux infrastructures intelligentes (V2I) permettra vraisemblablement d'éliminer les panneaux de signalisation et les feux de circulation. En revanche, la signalisation destinée aux piétons et aux cyclistes devrait être conservée. Par ailleurs, la circulation ininterrompue des véhicules autonomes en milieu urbain dense pourrait occasionner des délais d'attente plus long pour les piétons et les cyclistes souhaitant franchir la chaussée. [53]

Résumé

Le déploiement des véhicules autonomes devrait accroître la capacité des rues en raison de leur disposition à circuler en peloton dans un espace plus restreint. Cela devrait entraîner une réduction du nombre et de la largeur de voies, libérant de l'espace au sol pour d'autres usages. Dans l'éventualité où davantage de véhicules seraient partagés ou plus compacts, la surface libérée pourrait être encore plus importante.

Ainsi, l'espace rue pourrait être radicalement transformé. À terme, le stationnement sur rue devrait complètement disparaître puisque les véhicules autonomes auront la capacité de rejoindre les centres de dépôt situés en marge des noyaux urbains ou des quartiers résidentiels. Sur les artères urbaines, le nombre et la largeur des voies seraient progressivement réduits jusqu'à atteindre une emprise d'au plus 4,6 mètres (15'), permettant la circulation des véhicules autonomes et du transport en commun dans les deux sens. Sur les rues résidentielles, l'emprise de rue serait d'au plus 4,3 mètres (14'), permettant la circulation véhiculaire dans les deux sens et les zones de débarcadère.

Selon une étude, une priorité d'usage devrait être accordée selon le type de rue et la zone. Au centre-ville et dans les quartiers résidentiels, les rues devraient permettre la cohabitation des usagers. À l'inverse, une stricte ségrégation des usagers devrait être observée sur les artères et les collectrices. En d'autres termes, la rue devrait prévoir des espaces distincts destinés aux piétons, aux cyclistes et aux véhicules. Dans ce cas particulier, il s'agit d'une approche zonale de la rue où la ségrégation des espaces repose sur la vitesse de déplacement des usagers.

L'élimination du stationnement sur rue devrait engendrer une demande croissante en zones de débarcadère, particulièrement dans les secteurs suscitant un fort achalandage comme les centres-villes. Les zones de débarcadère pourraient être centralisées afin de limiter leur nombre et/ou aménagées à proximité des édifices particulièrement fréquentés. Dans ce dernier cas, les débarcadères devraient être séparés des voies de circulation et conçus avec des zones distinctes pour l'embarquement et le débarquement afin d'assurer la fluidité.

6. IMPACTS SUR LES STATIONS DE RECHARGE

En Amérique du Nord [29], trois niveaux de borne de recharge existent actuellement. Le premier niveau (L1) est généralement associé à une borne domestique de 120 volts sur courant alternatif. Le second niveau (L2) correspond à une borne intermédiaire dotée d'une tension de plus de 120 volts sur courant alternatif. Le dernier niveau (L3) qualifie une borne de recharge rapide dont la tension varie de 200 à 450 volts sur courant continu. Or, le temps de recharge d'un véhicule électrique dépend à la fois de la distance parcourue et de la puissance de la borne. À titre indicatif, le temps de recharge requis pour une distance de 100 km peut varier de 32 minutes à 15 heures selon le type d'installation. Actuellement, les bornes de recharge sont des appareils fixes raccordés à un réseau de distribution électrique et munis d'un pistolet dont le branchement manuel au socle du véhicule permet de recharger la batterie. Les bornes publiques actuelles sont localisées à proximité d'aires de stationnement desservant des édifices à bureaux, des immeubles à appartements, des centres commerciaux ou des endroits suscitant un fort achalandage (ex. restaurants, établissements hôteliers). [29]

Le livre blanc de l'Alliance internationale pour les véhicules à zéro émission (ZEV Alliance) fournit des indications sur les meilleures pratiques en matière d'infrastructures de recharge [31]. L'étude dresse un portrait des infrastructures actuelles dans plusieurs pays selon le type d'installation et la part de marché des véhicules électriques.

La disponibilité et la nature des infrastructures de recharge varie grandement selon les pays [31]. En matière d'accessibilité, on distingue trois cas de figure. Le premier cas comprend les pays où le nombre d'installations excède 1500 stations par million d'habitants dont la Norvège et les Pays-Bas. Ces pays précurseurs ont misé davantage sur les bornes régulières. Le second cas regroupe les pays où la disponibilité des stations de recharge varie de 400 à 500 stations par million d'habitants et où les stations de recharge rapide représentent 15 % de l'offre globale. Il s'agit de la Suisse, de l'Autriche et du Danemark. Le dernier cas inclut les pays dont le nombre d'installations par habitant est plus limité, généralement inférieur à 300 stations par million d'habitants. Dans ces pays, le nombre de bornes rapides varie énormément. Parmi les pays où le déploiement d'installations rapides est proportionnellement plus élevé, on retrouve le Royaume-Uni, la Finlande, le Japon, la Chine et la Suède en ordre décroissant (voir figure 15). [31]

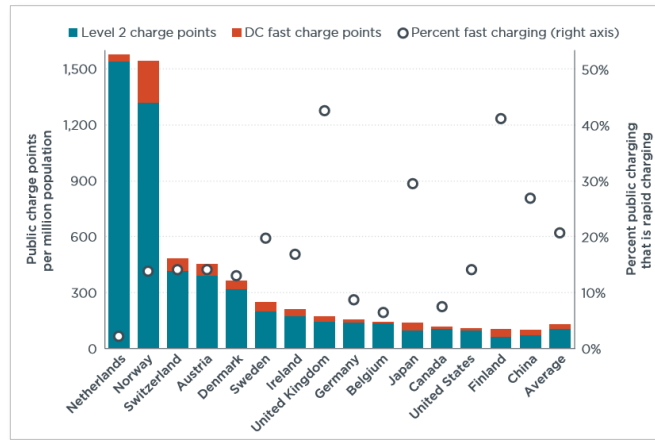


Figure 15 : Infrastructures de recharge par million d'habitants selon certains pays

Source : Hall D. and Lutsey N. (2017) Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure. International Council on Clean Transportation, p.16

À l'échelle métropolitaine, le livre blanc [31] fournit des indications sur le rapport entre le nombre d'installations publiques de recharge et les véhicules électriques en circulation. À ce propos, les auteurs ont sélectionné les agglomérations de plus de 200 000 habitants de quatorze pays, dont l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, la Chine, le Danemark, les États-Unis, la Finlande, le Japon, les Pays-Bas, la Norvège, le Royaume-Uni, la Suède et la Suisse. La figure 16 illustre les ratios obtenus par région métropolitaine. Les bulles représentent les ventes de véhicules électriques réalisées en 2016.

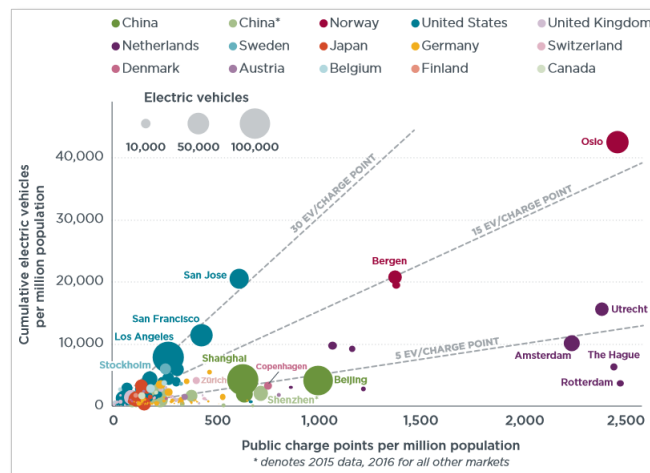


Figure 16 : Nombre de stations de recharge et de véhicules électriques par million d'habitants selon la région métropolitaine et certains pays

Source : Hall D. and Lutsey N. (2017) Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure. International Council on Clean Transportation, p.17

La figure 16 permet de dégager trois tendances. Globalement, les ratios observés s'élèvent à 5, 15 et 30 véhicules électriques par station publique de recharge. La moyenne équivaut à 7 véhicules par station. [31] Bien que le nombre de stations publiques de recharge devrait normalement augmenter avec le nombre de véhicules électriques, la tendance laisse plutôt entrevoir un déséquilibre. En effet, les villes américaines (Californie) et chinoises ont enregistré un nombre record de ventes de véhicules électriques. Cependant, leur nombre de stations publiques de recharge ne semble pas suivre le déploiement des ventes. Ce phénomène pourrait être attribuable à l'inadéquation de l'offre en cours ou aux programmes incitatifs gouvernementaux et locaux en faveur des bornes domestiques.

L'un des enjeux soulevés par les installations de recharge repose sur le fragile équilibre entre les stations régulières et rapides. À nouveau, le livre blanc [31] fournit des informations sur l'état de la situation par pays. La figure 17 montre la relation entre le nombre de stations publiques de recharge rapide et régulière par région métropolitaine. Les lignes en tiret illustrent le rapport entre les stations régulières et rapides à raison de 5, 15 et 40 %.

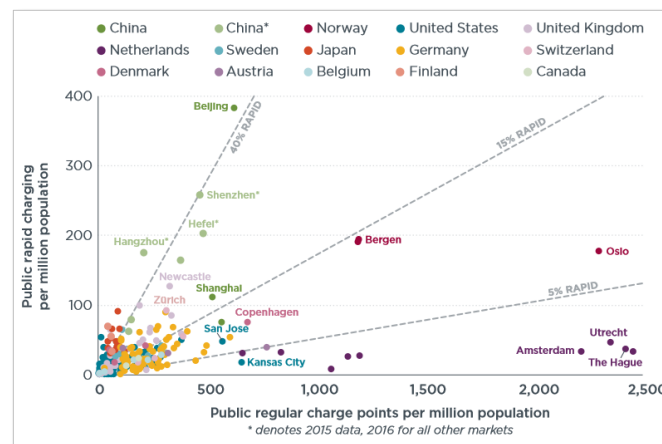


Figure 17 : Nombre relatif de stations de recharge régulière et rapide par million d'habitants selon la région métropolitaine et certains pays

Source : Hall D. and Lutsey N. (2017) Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure. International Council on Clean Transportation, p.18

En moyenne, 20 % des stations sont à recharge rapide. Les auteurs estiment que cette tendance n'est pas universelle. À titre d'exemple, le pourcentage de bornes rapides atteint à peine 2 % aux Pays-Bas. En Norvège, les taux fluctuent de 6 à 13 % selon les régions métropolitaines. Aux États-Unis, les stations de recharge rapide représentent 7 à 11 % de l'offre globale. La Chine représente le pays où le nombre de bornes rapides est le plus élevé, l'équivalent de 30 à 40 % des stations de recharge. [31] Il semblerait donc qu'il n'y ait pas de tendance claire en matière d'installations de recharge rapide. D'autre part, leur implantation serait nettement influencée par la présence de fortes densités résidentielles. Au demeurant,

les résultats ne permettent pas de préciser de façon certaine le nombre requis de stations de recharge rapide.

La taille du réseau d'infrastructures de recharge est souvent l'un des enjeux soulevés par les décideurs. Actuellement, il n'existe pas de normes reconnues à l'échelle internationale sur la taille optimale d'un réseau selon la part de marché des véhicules électriques. En revanche, plusieurs agences énergétiques proposent un ratio estimé selon l'évolution du marché des véhicules électriques [31]. Le tableau 4 montre ces ratios.

Tableau 4 : Ratio moyen du nombre de véhicules électriques par station de recharge

Organization	Region	Electric vehicle/public charge point ratio	Source
European Council	European Union	10	European Parliament (2014)
NDRC	China	8 (pilot cities), 15 (other cities)	NDRC (2015)
IEA Electric Vehicle Initiative	Worldwide	8 (2015), 15 (2016)	EVI (2016, 2017)
EPRI	United States	7-14	Cooper & Scheffter (2017); EPRI, 2014
NREL	United States	24	Wood et al. (2017)
CEC/NREL	California	27	CEC & NREL (2017)

NDRC : *National Development and Reform Commission* / IEA : *International Energy Agency* / EPRI : *Electric Power Research Institute* / NREL : *National Renewable Energy Laboratory* / CEC : *California Energy Commission*

Source : Hall D. and Lutsey N. (2017) Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure. International Council on Clean Transportation, p.21

À titre indicatif, les auteurs du livre blanc ont examiné la relation entre les ventes de véhicules électriques et le ratio de stations de recharge selon la région métropolitaine de plus de 200 000 habitants et le pays (voir figure 18). Selon eux, aucune tendance n'indique que le parc des véhicules électriques et les stations de recharge augmentent à un rythme plus rapide ou que les ratios évoluent dans une direction en particulier. [31]

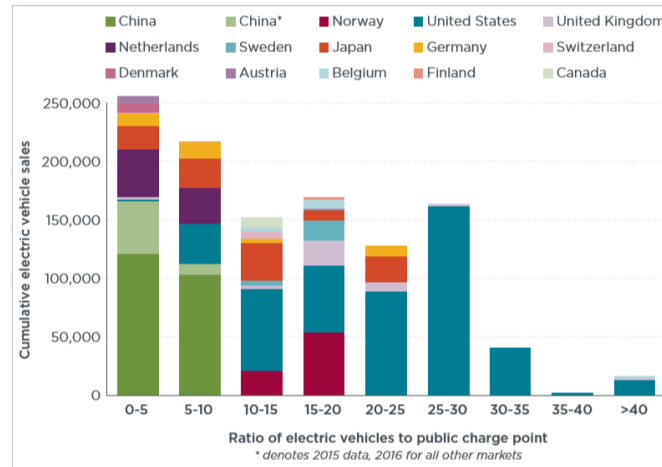


Figure 18 : Répartition des régions métropolitaines selon le nombre de véhicules électriques et leur ratio par station de recharge

Source : Hall D. and Lutsey N. (2017) Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure. International Council on Clean Transportation, p.22

Le livre blanc fait également état de plusieurs considérations liées aux infrastructures de recharge. Ainsi, la standardisation des équipements et la compatibilité des stations (paiement) est souhaitable afin de favoriser l'adhésion aux véhicules électriques. Par ailleurs, la surcharge éventuelle du réseau induite par le nombre croissant de véhicules électriques devrait être considérée afin de stabiliser l'approvisionnement. Aussi, l'emplacement des stations de recharge devrait permettre de maximiser leur utilisation et un retour sur l'investissement. À titre d'exemple, les parcs de stationnement ou les entrées d'immeubles représentent des emplacements privilégiés. En matière de localisation, les meilleures pratiques soutiennent non seulement l'installation de bornes à domicile, mais également à proximité des lieux de travail. À ce propos, il semblerait que l'accès à des stations de recharge sur les lieux d'emploi encourage vingt fois plus les consommateurs à acheter un véhicule électrique. [31] En définitive, il apparaît primordial de déployer les stations de recharge au rythme du marché.

Une étude menée à Rome [30] a simulé la localisation potentielle des stations de recharge en supposant que tous les véhicules privés de la région métropolitaine étaient électriques. L'approche a consisté à simuler les trajets quotidiens parcourus (navettage) par un échantillon de véhicules, représentant 6 % du parc automobile. À l'aide d'un modèle en transport, les trajets ont été agrégés en grappes ou zones de destination. Les résultats révèlent une prolifération des stations de recharge à l'intérieur du périmètre délimité par l'autoroute de contournement (A90) de Rome. Il s'agit d'une zone dont la taille est estimée à plus de 300 km². À proximité de la ceinture périphérique, les stations de recharge y seraient moins nombreuses, mais très achalandées. À mesure que l'on s'approcherait des secteurs centraux, le nombre de stations augmenterait mais avec un taux d'utilisation moindre. [30] En fait, il semblerait que le patron de distribution des stations de recharge soit largement influencé par le volume de circulation de même que par l'attraction exercée par les secteurs centraux en matière d'activités et d'emplois.

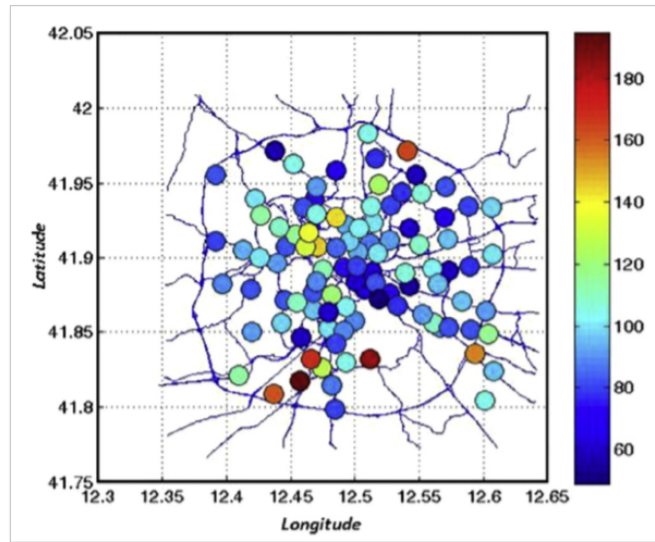


Figure 19 : Emplacement des stations de recharge selon le nombre moyen d'utilisateurs par jour, région métropolitaine de Rome, Italie

Source : Andrenacci N., Ragona R. and Valenti G. (2016) "A demand-side approach to the optimal deployment of electric vehicle charging stations in metropolitan areas". *Applied Energy*, 182, p. 46

Le réseau routier supérieur pourrait également jouer un rôle clé en favorisant l'accès aux stations de recharge à la fois pour les trajets de courte et de longue distance [32]. Basée sur une méthode d'analyse multicritères, une étude menée en Hongrie révèle que l'emplacement des stations de recharge le long du réseau supérieur est en mesure de répondre à la demande de trajets interurbains réalisés à l'intérieur d'une région métropolitaine. En ville, les sites les plus favorables seraient ceux associés aux stationnements de longue durée. Pour cette raison, les stations de recharge rapide y seraient moins nécessaires. [32]

En se basant sur l'enquête nationale sur la mobilité des ménages, des chercheurs américains ont étudié la localisation possible de stations de recharge [33]. Ils ont considéré les motifs et les heures de déplacement de même que la capacité de la batterie des véhicules électriques (cf. Volt, Leaf). En supposant que tous les véhicules privés étaient électriques, les résultats révèlent que les bornes installées à domicile seraient nettement plus sollicitées que les stations publiques. Dans ce cas, la recharge aurait lieu principalement en soirée. À l'extérieur du domicile, la recharge serait associée aux déplacements liés au travail (lieux d'emploi), au magasinage (centres commerciaux), au loisir (activités sociales) et au ramassage de personnes, en ordre décroissant. En raison des bornes domestiques, les besoins en stations publiques seraient donc nettement plus limités et les périodes de recharge coïncideraient avec les heures d'ouverture des bureaux et des commerces. La figure 20 montre clairement que les bornes domestiques suffiraient largement à répondre aux besoins des véhicules électriques. En conséquence, les besoins en stations publiques de recharge seraient plutôt limités, en particulier à proximité des lieux de travail et des centres commerciaux. [33]

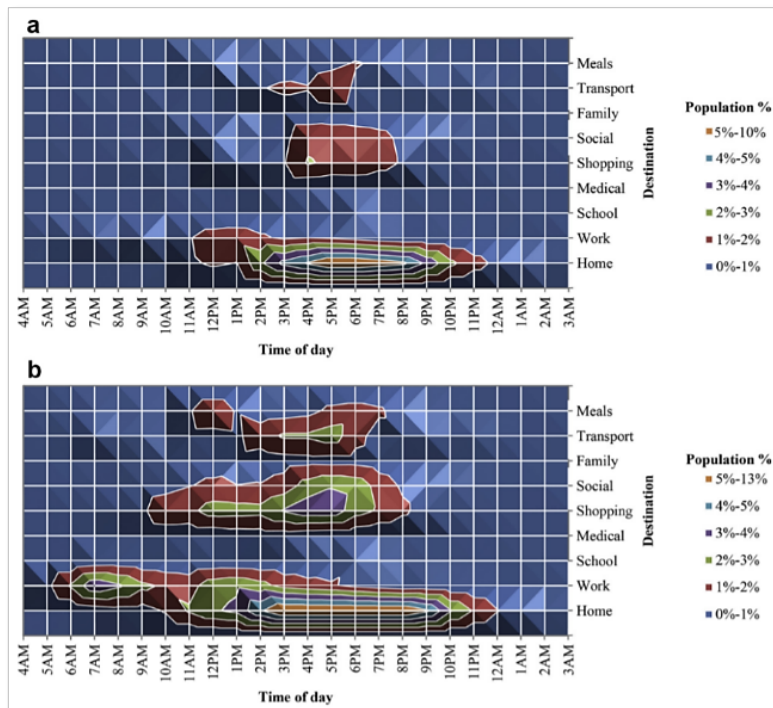


Figure 20 : Pourcentage de véhicules électriques ayant recours à une recharge par motif et période de la journée avec une autonomie de 130 km (a) et de 65 km (b)

Source : Brooker R. P. and Qin N. (2015) "Identification of potential locations of electric vehicle supply equipment". Journal of Power Sources, 299, p. 83

Une étude menée au Brésil [34] a évalué les besoins en stations de recharge et leur distribution selon le type d'installation au sein de la municipalité de Belo Horizonte comptant près de 2,5 millions d'habitants. En supposant un taux de pénétration de 1 % des véhicules électriques d'ici 2025, les chercheurs sont parvenus à estimer la demande en véhicules électriques à 12 000 unités. À raison de 10 véhicules par station de recharge, cela correspondait à 1200 installations. En s'inspirant d'autres études de cas, ils ont partagé le réseau par type d'installation. Ainsi, ils ont attribué 80 % du réseau aux stations de niveau 2 (intermédiaire) et 20 % à celles de niveau 3 (rapide). Les résultats révèlent que les quartiers riches de la municipalité abritent l'essentiel des bornes domestiques. Les stations publiques de recharge intermédiaire se localisent principalement aux endroits où l'on retrouve une forte concentration d'emplois, de commerces et de connexions au transport public. Les stations de recharge rapide se concentrent surtout le long des autoroutes, des voies rapides et des collectrices. Ces zones se caractérisent aussi par d'importants centres commerciaux, de nombreuses connexions au transport en commun et une forte densité démographique. [34] D'autres études [35, 36] supportent également l'idée que le réseau routier supérieur puisse servir d'armature pour l'installation de stations de recharge rapide.

Cependant, les récentes études sur les véhicules électriques négligent l'enjeu soulevé par l'autonomisation. En effet, la capacité des véhicules autonomes à se déplacer seuls, la compacité prévue des prochaines aires de stationnement et l'éloignement anticipé des centres de service soulèvent de nombreux questionnements quant aux installations de recharge sans intervention humaine. Or, des travaux sont actuellement en cours en vue de trouver des solutions novatrices. En France [37], une expérience pilote a consisté à concevoir une station de recharge robotisée dotée d'un système d'arrimage automatique permettant à un bras articulé d'atteindre le socle du véhicule en vue d'en recharger la batterie. Le véhicule lui-même est contrôlé par un système embarqué comportant des senseurs et des caméras qui lui permettent de se positionner en vue de l'arrimage. Le branchement du bras articulé active automatiquement l'approvisionnement et l'énergie consommée est enregistrée. Une interface de communication sans fil gère la procédure de facturation. Depuis 2013, ce prototype est à l'essai à plusieurs endroits dans la ville de Paris.



Figure 21 : Station de recharge électrique robotisée avec arrimage automatique

Source : <https://technologiemedi.net/2018/08/14/une-station-robotique-pour-recharger-les-vehicules-electriques/>

Une technologie en émergence s'avère encore plus prometteuse pour la recharge des véhicules autonomes. Il s'agit de la recharge par induction [38]. Le procédé permet de recharger automatiquement un véhicule sans aucun contact entre le système d'approvisionnement en énergie et la batterie. En bref, cette technologie repose sur un bouclier en aluminium (plaque) fixé au sol recouvrant une bobine magnétique et des plaquettes ferromagnétiques. Le bouclier transmet l'électricité au véhicule muni d'un adaptateur. Aucun contact physique n'est donc requis. Lorsque le véhicule est immobilisé, ce procédé porte le nom d'induction statique [38]. Plus simplement, le véhicule se place au-dessus de la plateforme de recharge et l'énergie est transmise à la batterie.

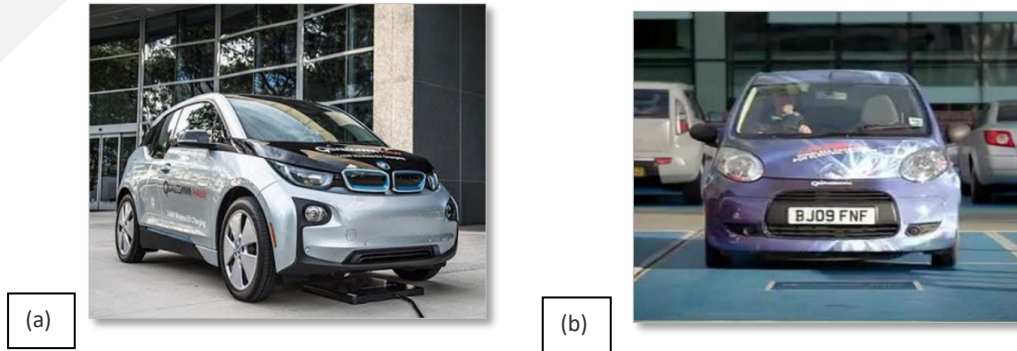


Figure 22 : Station de recharge domestique (a) et publique (b) par induction statique

Sources : (a) <https://www.hybridcars.com/wireless-charging-may-become-common-over-the-next-four-years/> (b) https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/transports/qualcomm-presente-un-systeme-pour-recharger-les-voitures-electriques-pendant-qu-elles-roulent_113081

Les plateformes de recharge par induction statique peuvent être installées dans les aires de stationnement, aux arrêts d'autobus, aux carrefours à feux ou sur certains tronçons le long des voies de circulation [38]. De cette manière, les véhicules peuvent se recharger lorsqu'ils sont momentanément immobilisés à un carrefour à feux ou à un arrêt d'autobus lors de l'embarquement ou du débarquement des passagers. Ce concept a déjà été expérimenté avec succès sur des voies réservées au transport public à Turin (Italie) et dans d'autres villes. Le même procédé peut s'appliquer aux endroits où les véhicules sont immobilisés sur de plus longues périodes notamment dans les aires de stationnement et les haltes routières le long d'autoroutes.

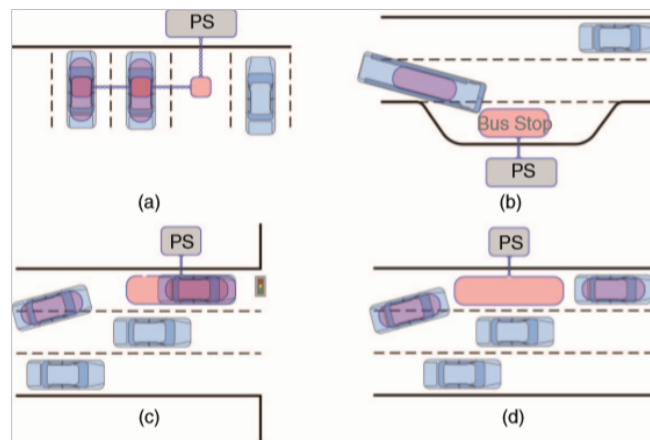


Figure 23 : Emplacements possibles des plateformes de recharge par induction statique

a) case de stationnement, b) arrêt d'autobus, c) carrefour à feux, d) tronçons de voie

PS : power station ou plateforme de recharge à induction statique

Source : Lukic S. and Pantic Z. (2013) "Cutting the Cord: Static and dynamic wireless charging of electric vehicles". IEEE Electrification Magazine, September, p. 58

La vision à long terme du procédé par induction est de rendre possible la recharge alors que le véhicule est en mouvement. Ce procédé porte alors le nom d'induction dynamique [38]. Ce système par induction est réalisé au moyen d'un réseau filaire placé sous la surface de la chaussée.



Figure 24 : Réseau filaire d'une ligne de recharge par induction dynamique

Source : <http://www.lefigaro.fr/societes/2017/05/20/20005-20170520ARTFIG00004-recharger-un-vehicule-electrique-en-roulant-une-premiere-experimentation-en-france.php>

Dès 2016, Israël et le Royaume-Uni ont équipé une partie de leur réseau routier avec ce système. Pour sa part, la Suède envisage l'installation imminente de lignes de recharge destinées au réseau de transport en commun. En France, Renault a conçu une piste de recharge pour en tester l'efficacité [38]. Les avantages d'une ligne de recharge sont nombreux, dont : une alimentation automatique sans intervention humaine, l'absence de contact physique avec la source d'approvisionnement électrique de même que la possibilité de recharger plusieurs véhicules simultanément. D'ailleurs, l'approvisionnement s'active uniquement en présence de véhicules munis d'un adaptateur.

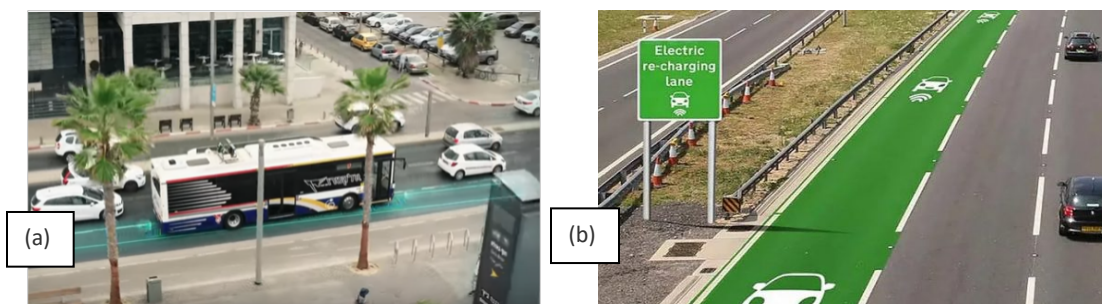


Figure 25 : Ligne de recharge par induction dynamique sur voie réservée - artère urbaine (a) et autoroute (b)

Sources : (a) <http://www.busetcar.com/la-suede-testera-la-recharge-de-bus-par-induction-en-2020/>
 (b) <https://www.automobile-propre.com/charge-par-induction-lalliance-renault-nissan-mitsubishi-sassocie-a-electreon/>

Selon une estimation [38], la plupart des véhicules électriques seraient en mesure d'atteindre plus de 400 km d'autonomie avec des batteries relativement petites si 1 % seulement du réseau routier urbain était doté de lignes de recharge. Des essais routiers sont actuellement en cours en Caroline du Nord avec différents types de véhicules afin de démontrer la robustesse de l'induction dynamique. [38]

Résumé

L'impact des véhicules autonomes sur les stations de recharge devrait entraîner une modification des installations et de leur répartition sur le territoire métropolitain.

Les bornes de recharge sont des appareils fixes raccordés à un réseau de distribution électrique et munis d'un pistolet dont le branchement manuel au socle du véhicule permet d'en recharger la batterie. Le temps de recharge varie selon le niveau de la borne. Il en existe 3 types. Les bornes domestiques (L1) à recharge lente sont généralement installées à domicile. Les bornes à recharge régulière ou intermédiaire (L2) se retrouvent à proximité de zones d'activités et d'emplois (ex. : centre-ville, centres commerciaux, etc.), aux endroits où les véhicules sont garés durant de longues périodes. Quant aux bornes de recharge rapide (L3), elles sont localisées non loin du réseau routier supérieur (ex. : collectrices, autoroutes) afin d'accommoder les trajets interurbains.

Actuellement, il n'existe pas de normes internationales reconnues en matière d'installations de recharge. Cependant, certaines tendances semblent se dégager. Ainsi, l'accessibilité aux installations correspond à 10 ou 15 véhicules environ par station de recharge. Et, le ratio entre les bornes de recharge rapide et régulière varie en moyenne de 15 à 20 %. Enfin, la standardisation et la compatibilité des stations (paiement) sont plus que souhaitables.

Le déploiement des véhicules autonomes suppose une intervention humaine réduite voire nulle dans les stationnements. Pour cette raison, les véhicules devraient pouvoir se recharger par eux-mêmes. Il existe 3 technologies éprouvées permettant d'atteindre cet objectif.

La première correspond à une station de recharge robotisée munie d'un système d'arrimage automatique et d'un bras articulé destiné à réapprovisionner le véhicule. Ce type de station comporte plusieurs inconvénients dont l'espace requis par l'appareillage. Or, la configuration des futurs centres de dépôt prévoit de comprimer la surface occupée par les espaces de stationnement. Aussi, cette solution apparaît peu appropriée.

La seconde technologie offre davantage de possibilités. Il s'agit du système de recharge par induction statique basé sur l'installation au sol d'une plaque magnétique capable de transmettre l'énergie au véhicule muni d'un adaptateur. Ce système comporte de nombreux avantages (ex. : aucun contact physique, alimentation automatique, etc.) et peut être installé à divers endroits, dont : des cases de stationnement, aux intersections à feux, aux arrêts d'autobus ou sur certains segments de rue. Toutefois, le système permet d'alimenter un véhicule à la fois au moment où il est immobilisé. Ce système serait tout à fait approprié pour desservir les parcs de stationnement.

La dernière technologie correspond à un système par induction dynamique reposant sur un réseau filaire électrique enfoui sous la surface du sol. La recharge se fait pendant que le véhicule est en mouvement. En fait, le système s'apparente à une ligne de recharge et comporte de nombreux avantages dont celui d'alimenter plusieurs véhicules simultanément. Il se déclenche uniquement lorsqu'il est sollicité par un véhicule électrique. Ce système serait tout à fait approprié pour desservir le réseau de transport en commun ou le réseau routier supérieur.

7. IMPACTS SUR L'INTERMODALITÉ

Les véhicules autonomes ont la capacité de redéfinir le concept de mobilité en modifiant le comportement des déplacements [44, 48, 49]. Selon la perspective adoptée, ils pourraient concurrencer ou compléter le transport en commun.

De nombreuses personnes estiment que l'arrivée des véhicules autonomes pourrait déboucher sur le développement de services de mobilité centrés sur l'utilisateur, favorisant le passage de la voiture privée à de nouveaux types de déplacements personnels [45]. Ces services visent à créer des itinéraires intermodaux et multimodaux mieux intégrés et plus harmonieux. Il s'agit de la mobilité « servicielle » (*Mobility as a Service – MaaS*). En général, ce modèle d'affaires est élaboré par un transporteur public à la suite de rencontres et de groupes de discussion avec l'ensemble des intervenants (usagers, organismes de transport privé, fournisseurs, entreprises technologiques, décideurs). [45]

En Suède, un organisme de transport public a mené une telle opération [43] en vue d'étudier la faisabilité d'une mobilité « servicielle » afin de trouver des moyens abordables d'accroître sa part de marché. Ce virage exige une réforme majeure du mode de fonctionnement traditionnel des organismes de transport public et un partenariat public-privé dans lequel les intervenants du secteur privé jouent un rôle clé comme opérateur et intégrateur de systèmes. L'organisme de transport public a donc invité l'ensemble des intervenants intéressés par une requête d'informations ¹, soit : près de 120 représentants de 65 organisations différentes. Peu après, une trentaine de soumissionnaires ont participé à des réunions individuelles afin de faire part de leur vision respective du projet. Enfin, des entrevues semi-structurées ont été menées auprès d'une vingtaine d'intervenants répartis entre les acteurs du secteur privé et les représentants du secteur public, membres du comité d'orientation. Ainsi, la plupart des interviewés estiment que ces services favoriseraient un transfert modal vers des modes de transport alternatif au détriment de la voiture privée. En revanche, certains craignent que cela ne contribue à cannibaliser la part de marché du transport en commun, en raison d'un accès facilité aux services de véhicules privés comme le covoiturage et le taxi. Les effets indésirables de ces services pourraient donc se traduire par une augmentation du nombre de véhicules en circulation et une réduction considérable de la part de marché du transport en commun. [43]

Une étude américaine [39] a examiné la viabilité d'un système intermodal combinant la mobilité à la demande au moyen des véhicules autonomes et du réseau de transport en commun de la ville de New York.

¹ Le RFI (Request for information) est une modalité de dialogue technique reposant sur une demande d'information écrite, sur un sujet donné, à destination des opérateurs économiques afin de déterminer la faisabilité technique, financière d'un projet. Les entreprises disposent d'un temps déterminé pour répondre à des questions techniques précises publiées. L'organisme public peut ainsi tester la capacité du marché à répondre à son besoin et les opérateurs économiques peuvent faire valoir les caractéristiques et avantages de la solution technique qu'ils proposent. Ces demandes d'informations peuvent être ou non suivies d'une consultation. Le RFI est une demande d'information. Il ne constitue ni une consultation, ni un appel d'offres, ni un quelconque engagement de l'acheteur à lancer ultérieurement une opération sur le même objet. Réciproquement, les réponses à une demande d'information ne constitueront pas des engagements contractuels ou précontractuels de la part des opérateurs économiques.

Selon les chercheurs, un système intermodal combiné pourrait avantageusement remplacer la flotte actuelle de taxis. En revanche, un tel système pourrait contribuer à accroître le nombre de véhicules en circulation, occasionné par le transfert modal du transport public vers les véhicules autonomes. Afin d'assurer une distribution optimale des véhicules visant à répondre à la demande, les chercheurs ont eu recours à un modèle d'optimisation des flux. Le modèle repose sur plusieurs postulats, dont : une régularité dans les demandes, un taux d'occupation faible (un passager par véhicule), une valeur du temps perçue uniforme, la prédominance du métro dans l'offre de transport public et un temps de transfert d'un mode à l'autre équivalent à une minute. Les résultats révèlent que les véhicules autonomes dominent le marché. Mais, à mesure que la congestion augmente, le métro prend le relais et absorbe une partie des flux de passagers. Si la congestion s'aggrave, la marche à pied se substitue au métro, d'autant qu'il ne permet pas aux personnes d'atteindre leur destination finale. En présumant un système intermodal non intégré, les déplacements sont assurés, en grande partie, par les véhicules autonomes jusqu'à un certain niveau de congestion, au-delà duquel la marche à pied prédomine. Les chercheurs estiment qu'un système basé sur l'intermodalité permettrait de réduire considérablement les temps de trajet. [39]

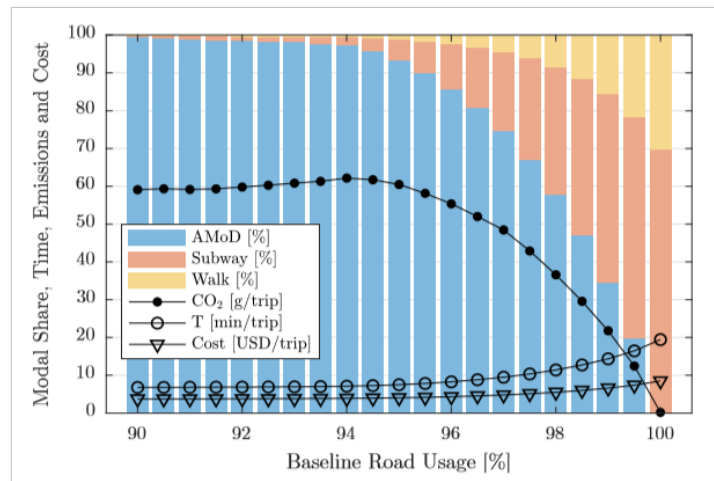


Figure 26 : Répartition modale selon la distance et la capacité de la route dans un système intermodal, New York

Source : Salazar M., Rossi F., Schiffer M., Onder C. H. and Pavone M. (2018) "On the Interaction between Autonomous Mobility-on-Demand and Public Transportation Systems". Conference, 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, Hawaii, USA, November 4-7, p. 2267

Ces études révèlent que l'attrait exercé par les véhicules autonomes en raison d'un service porte-à-porte pourrait conduire à une réduction considérable de la part de marché du transport en commun. De même, plusieurs estiment que les infrastructures lourdes de transport public (ex. : métro) deviendraient inutiles. En revanche, d'autres recherches jugent que les véhicules autonomes pourraient avantageusement compléter l'offre de service du transport en commun.

À ce propos, une étude a été réalisée dans l'un des quartiers résidentiels de l'est de Singapour [40]. Elle repose sur un modèle de simulation intégrant les véhicules autonomes au système de transport en commun en se basant sur la structure organisationnelle de Singapour et les caractéristiques de la demande. Dans le cas présent, l'étude s'est focalisée sur la desserte du premier kilomètre à l'heure de pointe du matin. Les véhicules autonomes partagés ont été affectés aux liaisons peu achalandées, représentant 10 % de la demande. Les liaisons d'autobus fortement achalandées sont, quant à elles, préservées. Le modèle a simulé 52 scénarios différents basés sur la taille de la flotte de véhicules et les préférences en matière de covoiturage. Dans ce modèle, les chercheurs ont établi un certain nombre de postulats. Ainsi, la flotte de véhicules autonomes partagés est supportée et gérée par les autorités publiques. La tarification de ce service fait partie intégrante de celle du réseau de transport public. Enfin, le système de transport présente une structure d'information et tarifaire unique afin d'éviter toute compétition. Le premier ou dernier kilomètre est défini comme une connexion aux stations du métro de Singapour. On présume également que les demandes sont traitées en temps réel et que les passagers préfèrent voyager seuls biens qu'ils puissent s'avérer ouverts à partager la course. Chacun des scénarios a fait l'objet d'une centaine d'itérations. [40]

Les résultats révèlent que la durée totale du trajet (attente, déplacement, transfert) diminue avec la taille de la flotte de véhicules autonomes, mais sature au-delà d'un certain nombre [40]. Par ailleurs, cette durée diminue lorsque les courses sont partagées avec une flotte d'au plus 30 véhicules. En reconfigurant certaines lignes actuellement desservies par autobus, il a été possible d'accroître le nombre de passagers-véhicule au kilomètre et de réduire le nombre de véhicules en circulation de près de la moitié. Enfin, les chercheurs sont parvenus à évaluer les coûts et les revenus générés au kilomètre selon la taille de la flotte. Il appert que les flottes de taille réduite génèrent davantage de profits. Et les courses partagées procurent une marge de profit supplémentaire. À mesure que la taille de la flotte augmente, l'écart de profit entre les véhicules partagés et non partagés rétrécit. En définitive, l'intégration des véhicules autonomes à l'offre de transport en commun s'avère viable, mais à condition que la taille de la flotte soit réduite. [40]

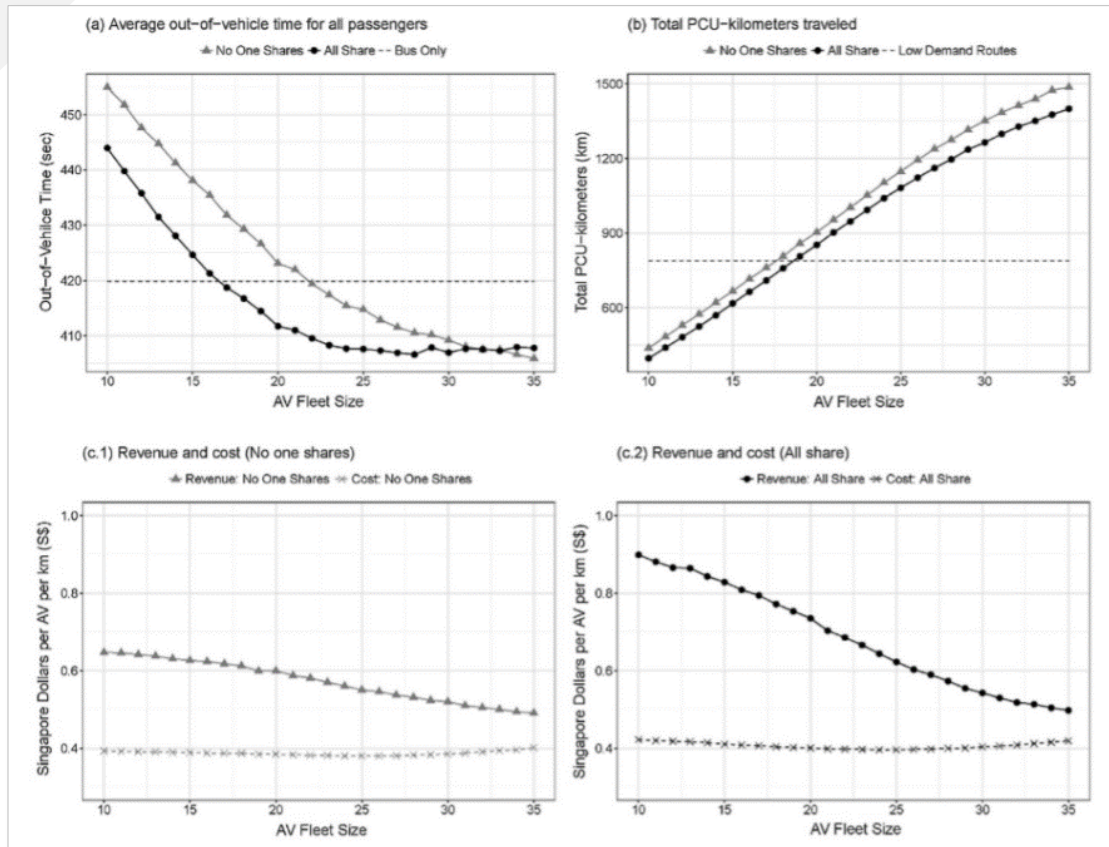


Figure 27 : Résultats de simulation d'un système de transport public intégrant les véhicules autonomes pour la desserte du premier kilomètre, Singapour

(a) durée totale du trajet, (b) passagers/véhicule/km, (c) revenus et coûts (véhicule non partagé), (d) revenus et coûts (véhicule partagé) / No One Shares : véhicule non partagé, All Shares : véhicule partagé, Bus Only : autobus seulement

Source : Shen y., Zhang H. and Zhao J. (2018) "Integrated shared autonomous vehicle in public transportation system: A supply-side simulation of the first-mile service in Singapore". Transportation Research Part A, 113, p. 133

Une étude récente [41] s'est également penchée sur un système intermodal intégrant les véhicules autonomes au transport en commun, comme solution de desserte du premier kilomètre. Les simulations ont reposé sur un modèle d'optimisation des flux de déplacement et les données d'enquête origine-destination d'une ville allemande de taille moyenne. Les résultats révèlent que la desserte du premier kilomètre en véhicules autonomes est viable car elle génère des revenus supérieurs aux coûts du système.

Une étude menée aux Pays-Bas [42] a évalué la possibilité de recourir aux véhicules autonomes électriques pour desservir le premier ou le dernier kilomètre à partir d'une gare de train. Elle a examiné la connexion entre la gare de Zuid Delft et le campus de la Polytechnique. La distance séparant la gare du campus varie de 1,5 à 2,4 km selon l'emplacement des pavillons. Aucun service de transport collectif ne dessert le secteur. Actuellement, les personnes qui fréquentent le campus parcourent la distance à pied ou à vélo. La plupart

des mouvements sont pendulaires. Le modèle de simulation a reposé sur une enquête origine-destination menée auprès de 1000 répondants. Environ 60 % d'entre eux étaient disposés à recourir aux véhicules autonomes afin de franchir cette distance. L'étude a considéré dix scénarios différents selon la vitesse du véhicule, le comportement de la demande (pré-réservation ou à la demande) et les liaisons du réseau de desserte (étendue) sur le campus. Le nombre de liaisons était destiné à accroître l'accessibilité aux différents pavillons. Lorsque les destinations sont fortement concentrées, les résultats révèlent que l'ajout de liaisons sur lesquelles les véhicules circulent à basse vitesse (30 km/h) ne conduit pas à une réduction du temps de trajet. Par ailleurs, en retirant certaines liaisons ou raccourcis vers le principal pôle générateur de déplacements du campus (faculté de génie aérospatial), le temps de trajet a augmenté de 25 %. Par conséquent, la capacité du réseau a décliné de 40 % en raison du temps d'occupation plus long à bord des véhicules. Les liaisons critiques semblent correspondre à celles faisant partie des itinéraires les plus courts vers les destinations les plus en demande. Par ailleurs, le système s'avère incapable de répondre adéquatement à la demande durant les heures de pointe, en raison des mouvements pendulaires (allers seulement). De fait, le temps d'attente s'en trouve allongé. D'autre part, la durée du trajet diminue lorsque les passagers ont la possibilité de prendre le volant. En revanche, cela consomme davantage d'électricité (146 %) et réduit la capacité du système (8 %) puisque les véhicules doivent être rechargés plus tôt que prévu. De plus, en augmentant le nombre de stations de recharge régulière ou intermédiaire sur le campus plutôt qu'en les limitant au lieu de dépôt, le nombre de véhicules nécessitant une recharge en soirée diminue. L'ajout de stations de recharge rapide augmente très peu la capacité du système (0,6 %). En définitive, la simulation a démontré que le système de véhicules autonomes électriques peut seulement concurrencer la marche à pied. Des mesures additionnelles sont nécessaires afin d'accroître la performance du système et de rivaliser avec les déplacements à vélo. Parmi ces mesures, il est question de redistribuer les véhicules libérés, d'autoriser la pré-réservation et la conduite du véhicule par l'un des occupants bien que cela se traduise par une diminution de la capacité du système et un accroissement de l'énergie consommée. [42]

Une étude réalisée sur Berlin [46] a cherché à évaluer la contribution des véhicules autonomes partagés à l'intermodalité. À l'aide d'un modèle dynamique, les chercheurs ont simulé plusieurs scénarios en faisant varier l'accès aux modes de transport collectif disponibles (autobus, tramway, train). Les résultats montrent que le remplacement du réseau de transport en commun actuel (1500 autobus, 600 trams) nécessiterait une flotte de plus de 50 000 véhicules autonomes partagés. Les scénarios révèlent aussi que les connexions intermodales les plus achalandées coïncident avec les zones densément peuplées et l'autoroute périphérique de Berlin fortement congestionnée. Il apparaît évident que la contribution du transport en commun demeure significative dans un scénario intermodal. De plus, les résultats suggèrent de maintenir les services de transport en commun le long des corridors majeurs et de laisser les véhicules autonomes s'occuper du dernier kilomètre dans les secteurs moins densément peuplés. [46]

Une seconde étude sur Berlin produite par les mêmes auteurs [47] a cherché à évaluer les avantages de remplacer les lignes d'autobus par une flotte de véhicules autonomes partagés. À l'aide d'un modèle de simulation, les résultats montrent que les véhicules autonomes partagés pourraient s'avérer plus avantageux pour les usagers (diminution de la distance de marche et du temps de trajet). En contrepartie, les lignes régulières desservies par autobus articulés s'avéreraient plus économiques à opérer que les véhicules autonomes partagés. Bien que les avantages semblent limités, les autorités de transport public

pourraient ne pas avoir le choix d'intégrer à long terme les véhicules autonomes partagés à leur offre de service en gérant les opérations seules ou en partenariat. [47]

Résumé

L'impact des véhicules autonomes sur l'intermodalité devrait concurrencer ou compléter le réseau de transport en commun. En effet, certaines études estiment que le service porte-à-porte offert par les véhicules autonomes aurait pour effet de cannibaliser la part modale du transport en commun. Cependant, ce scénario n'est pas souhaitable puisqu'il mènerait à une hausse sans précédent du nombre de véhicules en circulation. Pour cette raison, la plupart des études perçoivent les véhicules autonomes comme un moyen de compléter les services de transport en commun.

Les scénarios envisagés prévoient l'intégration d'une flotte de véhicules autonomes au réseau de transport en commun. Les véhicules autonomes seraient associés aux liaisons peu achalandées et agiraient comme axes de rabattement. Quant aux lignes de desserte du transport en commun, elles seraient plutôt allouées aux corridors à forte densité. De cette manière, leur rôle serait complémentaire. Selon certaines simulations, le premier/dernier kilomètre desservi par les véhicules autonomes serait viable à la condition que la taille de la flotte soit réduite. Cependant, la mise en opération soulève encore certains enjeux pouvant affecter la performance de la desserte, dont : le déséquilibre associé aux mouvements pendulaires, le taux d'occupation des véhicules et la demande en recharge d'énergie.

CONCLUSION

L'impact des véhicules autonomes électriques sur l'utilisation du sol et les activités urbaines dépendra vraisemblablement de l'usage prédominant de ces véhicules. Dans le cas où les véhicules privés domineraient le marché, il faudrait s'attendre à une deuxième vague d'étalement. Les désagréments associés à l'étalement urbain sont déjà fort connus. Dans le cas où les véhicules partagés seraient prépondérants, il faudrait s'attendre à une consolidation des noyaux urbains, à une hausse de la densité démographique et à un accroissement modeste de la superficie urbanisée.

Quel que soit le scénario, cela devrait permettre de libérer de l'espace au sol dans les centres urbains, attribuable à une baisse de la demande en stationnement. Cette réduction accompagnée d'une reconfiguration et d'une redistribution spatiale des parcs de stationnement devrait permettre de libérer de 15 à 20 % de la surface au sol, pouvant être réaffectée à d'autres usages.

L'espace rue pourrait être radicalement transformé. Le déploiement des véhicules autonomes devrait accroître la capacité des rues, entraînant une réduction de son emprise et l'éradication du stationnement sur rue. En revanche, l'élimination du stationnement devra être contrebalancée par l'aménagement de zones de débarcadère, particulièrement dans les secteurs attractifs comme les centres-villes.

Une adaptation des stations de recharge est à anticiper. En effet, le déploiement des véhicules autonomes suppose une intervention humaine réduite voire nulle dans les stationnements. Pour cette raison, les véhicules devraient pouvoir se recharger par eux-mêmes. Actuellement, il existe des technologies éprouvées permettant la recharge automatique. Les systèmes de recharge par induction statique seraient tout à fait opportuns pour desservir les parcs de stationnement. Et, les lignes de recharge par induction dynamique seraient conseillées pour alimenter la flotte de véhicules du transport en commun en desservant une fraction du réseau routier municipal supérieur.

À plus ou moins long terme, le transport en commun devrait être appelé à intégrer les véhicules autonomes électriques dans son offre, en collaboration ou non avec des partenaires. Les véhicules autonomes seraient affectés aux liaisons peu achalandées (premier/dernier kilomètre) et agiraient comme axes de rabattement. Les lignes de desserte du transport en commun devraient plutôt se concentrer dans les corridors à forte densité. Leur rôle apparaît complémentaire afin d'accroître la qualité des services et la couverture de la desserte.

Enfin, une implication précoce des autorités municipales et des organisations de transport en commun apparaît essentielle afin d'influencer le déploiement des véhicules autonomes et en assurer l'intégration de façon à bénéficier de cette nouvelle révolution.

RÉFÉRENCES

- [1] Alessandrini A., Campagna A., Delle Site P., Filippi F. and Persia L. (2015) “Automated Vehicles and the Rethinking of Mobility and Cities”. *Transportation Research Procedia* 5, 145-160.
- [2] Groupe de travail du Comité de soutien de la politique et de la planification sur les véhicules connectés et automatisés (2017) *L’avenir des véhicules automatisés au Canada*. Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière, 42p.
- [3] Vijay G., Kirk B., Godsmark P. and Flemming B. (2015) *Automated Vehicles: The Coming of the Next Disruptive Technology*. Ottawa: The Conference Board of Canada, 66p.
- [4] Rothnie A., Uffer S. and Ghoej M. (2016) (2016) *Urban Streets in the Age of Connected and Autonomous Vehicles*. Burohappold Engineering, Global Design Sprint, 27p.
- [5] Heinrichs D. (2015) “Autonomous Driving and Urban Land Use: Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects”. Maurer M., Gerdes C., Lenz B. and Winner H. (ed.), Springer Open, chap. 11, pp. 213-231.
- [6] Smolnickia P. M. and Soátys J. (2016) “Driverless Mobility: The Impact on Metropolitan Spatial Structures”, *Procedia Engineering*, vol. 161, pp. 2184-2190.
- [7] WSP I Parsons Brinckerhoff (2016) *Making better places: Autonomous vehicles and future opportunities*. United Kingdom, 31p.
- [8] Noyman A., Larson K. and Stibe A. (2017) “Roadmap for Autonomous Cities: Sustainable Transformation of Urban Spaces”. *Americas Conference on Information Systems*, Boston, 10p.
- [9] Heinrichs D. and Cyganski R. (2015) “Automated driving: How it could enter our cities and how this might affect our mobility decisions”. *Planning Review*, 8p.
- [10] Legacy C., Ashmore D., Scheurer J., Stone J. and Curtis C. (2019) “Planning the driverless city”. *Transport Reviews*, 39:1, 84-102.
- [11] Soteropoulos A., Berger M. and Ciari F. (2019) “Impacts of automated vehicles on travel behavior and land use: an international review of modelling studies”. *Transport Reviews*, 39:1, 29-49.
- [12] Duarte F. and Ratti C. (2018) “The Impact of Autonomous Vehicles on Cities: A Review”. *Journal of Urban Technology*, 25:4, 3-18.
- [13] Thakur P., Kinghorn R. and Grace R. (2016) “Urban form and function in the autonomous era”. *Australasian Transport Research Forum 2016, Proceedings*, 15p.
- [14] World Economic Forum (2018) *Reshaping Urban Mobility with Autonomous Vehicles, Lessons from the City of Boston*. System Initiative on Shaping the Future of Mobility, 35p.
- [15] Kittlerson & Associates (2018) *Effects of Emerging Technologies on Land Use and Development*. Boston, Kittlerson & Associates, 16p.

- [16] Zhang W., Guhathakurta S., Fang J. and Zhang G. (2015) "Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach". *Sustainable Cities and Society*, 19, 34-45.
- [17] Krueger R., Rashidi T. H. and Dixit V. (2019) "Autonomous Driving and Residential Location Preferences Evidence from a Stated Choice Survey". Australia, arXiv:1905.11486v1 [econ.GN].
- [18] Gelauff G., Ossokina I. and Teulings C. (2017) "Spatial effects of automated driving: dispersion, concentration or both?". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, 121, 277-294.
- [19] Zhang W. and Guhathakurta S. (2018) "Residential Location Choice in the Era of Shared Autonomous Vehicles". *Journal of Planning Education and Research*, 34p.
- [20] Yigitcanlar T., Wilson M. and Kamruzzaman Md. (2019) "Disruptive Impacts of Automated Driving Systems on the Built Environment and Land Use: An Urban Planner's Perspective". *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, April, 17p.
- [21] Carrese S., Nigro M., Maria Patella S. and Toniolo E. (sous presse) "A preliminary study of the potential impact of autonomous vehicles on residential location in Rome". *Research in Transportation Economics*, 7p.
- [22] Larson W. and Zhao W. (2017) "Self-Driving Cars and the City: Long-Run Effects on Land Use, Welfare, and the Environment". *SSRN Electronic Journal*, 10.2139/ssrn.3055976, 40p.
- [23] Henderson J. and Spencer J. (2016) "Autonomous Vehicles and Commercial Real Estate". *Cornell Real Estate Review*, 14:1, pp. 44-55.
- [24] Labi S. and Usman Saeed T. (2015) "An exploratory discussion of the impacts of driverless vehicle operations on the man-made environment", *Recent Advances in Mechanics and Mechanical Engineering*, Paper conference, April, 9-15.
- [25] Levinson D. (2015) "Climbing Mount Next: The Effects of Autonomous Vehicles on Society". *Minnesota Journal of Law, Science & Technology*, 16:2, pp. 787-809.
- [26] Zakharenko R. (2016) "Self-driving cars will change cities". *Regional Science and Urban Economics*, 61. Pp. 26-37.
- [27] Schlossberg M., Riggs W., Millard-Ball A. and Shay E. (2018) "Rethinking the Street in an Era of Driverless Cars". *Urbanism Next Research*, 18p.
- [28] Kim K.-H., Yook D.-H, Ko, Y.-S. and Kim D.-H. (2015) *An Analysis of Expected Effects of the Autonomous Vehicles on Transport and Land Use in Korea*. Working Paper, Korea Research Institute for Human Settlements, 29p.
- [29] Hydro-Québec (2015) *Bornes de recharge pour véhicules électriques – guide technique d'installation*. Hydro-Québec, Montréal, 56p.
- [30] Andrenacci N., Ragona R. and Valenti G. (2016) "A demand-side approach to the optimal deployment of electric vehicle charging stations in metropolitan areas". *Applied Energy*, 182, pp. 39-46.

- [31] Hall D. and Lutsey N. (2017) Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure. International Council on Clean Transportation, 48p.
- [32] Csonka B. and Csiszár (2017) "Determination of charging infrastructure location for electric vehicles". Transportation Research Procedia, 27, pp. 768-775.
- [33] Brooker R. P. and Qin N. (2015) "Identification of potential locations of electric vehicle supply equipment". Journal of Power Sources, 299, pp. 76-84.
- [34] Costa E., Paiva A., Seixas J., Costa G., Baptista P. and Gallachóir B. Ó. (2018) "Spatial Planning of Electric Vehicle Infrastructure for Belo Horizonte, Brazil". Journal of Advanced Transportation, 2018, 16p.
- [35] Xie F., Liu C., Li S., Lin Z. and Huang Y. (2018) "Long-term strategic planning of inter-city fast charging infrastructure for battery electric vehicles". Transportation Research Part E, 109:2018, pp. 261-276.
- [36] Micar S., Polimeni A., Napoli G., Andaloro L. and Antonucci V. (2017) "Electric vehicle charging infrastructure planning in a road network". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80:2017, pp. 98-108.
- [37] Pérez J., Nashashibi F., Lefaudeux B., Resende P. and Pollard E. (2013) "Autonomous Docking Based on Infrared System for Electric Vehicle Charging in Urban Areas". Sensors 2013:13, pp. 2645-2663.
- [38] Lukic S. and Pantic Z. (2013) "Cutting the Cord: Static and dynamic wireless charging of electric vehicles". IEEE Electrification Magazine, September, pp. 57-64.
- [39] Salazar M., Rossi F., Schiffer M., Onder C. H. and Pavone M. (2018) "On the Interaction between Autonomous Mobility-on-Demand and Public Transportation Systems". Conference, 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, Hawaii, USA, November 4-7.
- [40] Shen Y., Zhang H. and Zhao J. (2018) "Integrated shared autonomous vehicle in public transportation system: A supply-side simulation of the first-mile service in Singapore". Transportation Research Part A, 113, pp. 125-136.
- [41] Steiner K. and Irnich S. (2018) Strategic Planning for Integrated Mobility-on-Demand and Urban Public Bus Networks. Report paper, Gutenberg School of Management and Economics & Research Unit Interdisciplinary Public Policy, discussion paper number 1819, 34p.
- [42] Scheltes A., de Almeida Correia G. H. (2017) "Exploring the use of automated vehicles as last mile connection of train trips through an agent-based simulation model: An application to Delft, Netherlands". International Journal of Transportation Science and Technology, 6, pp. 28-41.
- [43] Smith G., Sochora J. and Karlssona M.-A. (2017) "Mobility as a Service: Implications for future mainstream public transport". Conference, 15th International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport (Thredbo), Stockholm, August 13-17.
- [44] Szmelter A. (2017) "The Concepts of Connected Car and Internet of Cars and their Impact on Future People Mobility". Information Systems in Management, 6:3, pp. 234-245.

- [45] Kamargianni M. and Matyas M. (2017) "The Business Ecosystem of Mobility-as-a-Service". Conference, 96th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting, Washington DC, 8-12 January.
- [46] Bischoff J., Kaddoura I., Maciejewski M. and Nagel K. (2017) "Re-defining the role of public transport in a world of shared autonomous vehicles". Conference, Symposium of the European Association for Research in Transportation (hEART), 3p.
- [47] Leich G. and Bischoff J. (2018) "Should autonomous shared taxis replace buses? A simulation study". International Scientific Conference on Mobility and Transport, conference proceedings published in Transportation Research Procedia, 10p.
- [48] Nikitas A., Kougias I., Alyavina E. and Njoya Tchouamou E. (2017) "How Can Autonomous and Connected Vehicles, Electromobility, BRT, Hyperloop, Shared Use Mobility and Mobility-As-A-Service Shape Transport Futures for the Context of Smart Cities?". Urban Science, 1:36, 21p.
- [49] Papa E. and Ferreira A. (2018) "Sustainable Accessibility and the Implementation of Automated Vehicles: Identifying Critical Decisions". Urban Science, 2:5, 14p.
- [50] Zhang W. (2017) The interaction between land use and transportation in the era of shared autonomous vehicles: a simulation model. Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, 147p.
- [51] Martinez L. M. and Viegas J. M. (2017) "Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal". International Journal of Transportation Science and Technology, 6, pp. 13-27.
- [52] Zhang W. and Guhathakurta S. (2017) "Parking spaces in the age of shared autonomous vehicles: How much parking will be need and where?". Conference Paper, Transportation Research Board, TRB Annual Meeting Online 18p.
- [53] Chapin T., Stevens L., Crute J., Crandall J., Rokyta A. and Washington A. (2016) Envisioning Florida's Future: Transportation and Land Use in an Automated Vehicle Automated Vehicle World. Final Report, April 2016 FDOT Contract #: BDV30 934-10, 35p.
- [54] Riggs W., Appleyard B. and Johnson M. (2019) "A Design Framework for Livable Streets in the Era of Autonomous Vehicles". Conference Paper, Transportation Research Board, TRB Annual Meeting Online, 18p.
- [55] ARUP, Perkins and Will (2017) New Mobility Street Design: A Case Study of Autonomous Vehicles in San Francisco. ARUP, Perkins and Will, Report, July, 18p.
- [56] Stead D. and Vaddadi B. (2019) "Automated vehicles and how they may affect urban form: A review of recent scenario studies". Cities, 92, pp 125-133.
- [57] Harper C. D., Hendrickson C. T. and Samaras C. (2018) "Exploring the Economic, Environmental, and Travel Implications of Changes in Parking Choices due to Driverless Vehicles: An Agent-Based Simulation Approach". Journal of Urban Planning Development, 144 (4): 04018043.
- [58] Balac M., Ciari F. and Axhausen K. W. (2017) "Modeling the impact of parking price policy on free-floating carsharing: Case study for Zurich, Switzerland". Transportation Research Part C, 77, pp. 207-225.

- [59] Clark B. Y., Larco N. and Mann R. F. (2017) "The impacts of autonomous vehicle and e-commerce on local government budgeting and finance". Urbanism Next, august, 25p.
- [60] Tillema T., Berveling J., Gelauff G., van der Waard J., Harms L. and Derriks H. (2015) Driver at the wheel? Self-driving vehicles and the traffic and transport system of the future. Netherlands Institute for Transport Policy Analysis, Ministry of Infrastructure and the Environment, 40p.



Consortium international de recherche
sur la gouvernance des grands projets
d'infrastructure

www.kheops.ca