

Mise en œuvre des véhicules automatisés

Implications pour la planification des transports

Source : Todd Litman, Victoria Transport Policy Institute, 9 août 2022

Le Victoria Transport Policy Institute est un groupe de réflexion canadien qui cherche à améliorer la planification des transports et la politique des transports. L'institut est un organisme de recherche indépendant dédié au développement de solutions innovantes et pratiques aux problèmes de transport.

Ce rapport a été traduit de l'anglais. Les termes « autonomous vehicles » ont été traduits par « véhicules automatisés » dans la plupart des cas et « véhicules autonomes » dans une projection long terme.

Résumé

Ce rapport explore les impacts de l'automatisation (également appelée conduite automatisée ou sans conducteur) des véhicules et ses implications pour la planification des transports. Il étudie la rapidité avec laquelle ces véhicules sont susceptibles de se développer et d'être déployés sur la base de l'expérience acquise avec les technologies automobiles précédentes ; leurs avantages et coûts probables ; comment ils affecteront les activités de la conduite ; et leurs impacts sur la l'infrastructure routière, sur le stationnement et la planification du transport en commun. Cette analyse indique que les véhicules totalement automatisés (dit de niveau 5), capables de fonctionner sans conducteur, pourraient être disponibles dans le commerce et autorisés à être utilisés dans certaines juridictions d'ici la fin des années 2020, mais auront initialement des coûts élevés et des performances limitées.

Certains cas d'usage, tels que la mobilité particulière pour les usagers aisés, pourraient apparaître dans les années 2030 mais la plupart des impacts, y compris la réduction du trafic et de la congestion des zones de stationnement, la mobilité particulière des personnes à faible revenu (et donc la réduction du besoin de transport en commun), l'amélioration de la sécurité, la réduction de la consommation d'énergie et la réduction de la pollution, ne seront significatifs que lorsque les véhicules automatisés deviendront courants et abordables, probablement dans les années 2040 à 2060, et certains avantages peuvent nécessiter des voies dédiées aux véhicules automatisés, ce qui soulève des problèmes d'équité sociale.

Table des matières

Table des matières

Résumé exécutif.....	3
Introduction	7
Modèles opérationnels de véhicules automatisés	8
Coûts et bénéfices.....	9
Réduction du stress du conducteur, amélioration de la productivité et de la mobilité	9
Coûts de propriété et d'exploitation	9
Sécurité routière et santé publique.....	12
Coûts externes.....	14
Impacts sur l'équité sociale	15
Équité horizontale en matière de subventions	15
Coûts du trafic externe	16
Équité horizontale par rapport à l'espace routier.....	16
Équité verticale par rapport aux capacités et aux besoins	16
Équité verticale en matière de revenus – abordabilité	16
Résumé des bénéfices et coûts	18
Impacts sur les déplacements	20
Prédictions de développement et de déploiement	25
Expérience à partir du déploiement des technologies passées	27
Prédictions de déploiement.....	29
Impacts sur la planification	32
Conception de la chaussée.....	32
Tarification du transport	32
Gestion des trottoirs.....	32
Planification du stationnement	32
Besoins en transport en commun.....	33
Autres tendances affectant les demandes de déplacements.....	33
Conflits potentiels et solutions	38
Conclusions.....	40
Références.....	43

Résumé exécutif

De nombreux décideurs et professionnels se demandent comment les véhicules automatisés affecteront les déplacements futurs, et donc le besoin d'infrastructures routières, de parkings et de services de transport en commun, et quelles politiques publiques peuvent minimiser les problèmes et maximiser les avantages de ces nouvelles technologies. Ce rapport explore ces questions.

Les optimistes prédisent que d'ici 2030, les véhicules automatisés seront suffisamment fiables, abordables et communs pour remplacer la plupart des conducteurs humains, offrant d'énormes économies et avantages. Cependant, il y a de bonnes raisons d'être sceptique. La plupart des prédictions optimistes sont faites par des professionnels de l'industrie automobile, ayant des intérêts financiers, sur la base de technologies telles que les appareils photo numériques, les smartphones et les ordinateurs personnels. Ils ont tendance à ignorer les obstacles importants au développement de véhicules automatisés et à exagérer les avantages futurs.

Il existe une incertitude considérable concernant le développement des véhicules automatisés, les avantages et les coûts, les impacts sur les déplacements et la demande des consommateurs. Des progrès considérables sont nécessaires avant que les véhicules automatisés puissent fonctionner de manière fiable en trafic urbain mixte, en cas de fortes pluies et neiges, sur des routes non goudronnées et non cartographiées, et là où l'accès sans fil n'est pas fiable. Des années de tests et d'approbations réglementaires seront nécessaires avant qu'ils ne soient disponibles sur le marché dans la plupart des juridictions. Les premiers véhicules automatisés disponibles dans le commerce seront probablement coûteux et limités en performances. Ils introduiront de nouveaux coûts et risques qui limiteront les ventes. De nombreux automobilistes hésiteront à payer des milliers de dollars supplémentaires pour des véhicules qui seront parfois incapables d'atteindre une destination en raison du mauvais temps ou de routes non cartographiées.

La figure 1 illustre les coûts d'utilisation pour le consommateur, des véhicules automatisés. Ils sont susceptibles d'être plus chers que les véhicules particuliers conventionnels et que les transports en commun, mais moins chers que les services de covoiturage¹ et les taxis conventionnels. Les véhicules automatisés partagés seront moins chers mais moins pratiques et confortables que les véhicules automatisés particuliers, de sorte que de nombreux ménages, en particulier dans les banlieues et les zones rurales, posséderont des véhicules automatisés.

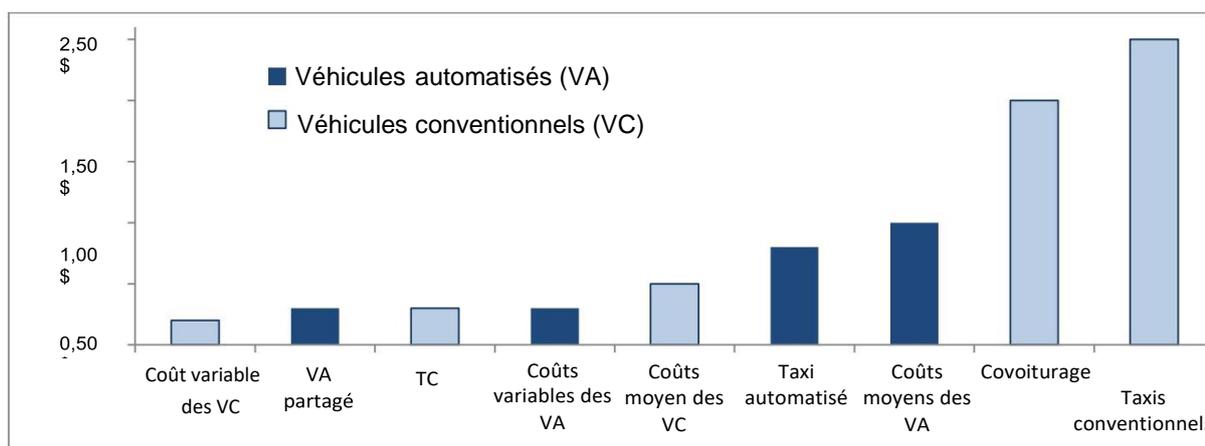


Figure 1 : Comparaison des coûts – Les véhicules automatisés sont susceptibles de coûter moins chers que les véhicules conventionnels individuels et que les transports en commun, mais plus que les taxis conventionnels et les services de covoiturage.

¹ Contrairement aux services de véhicules partagés, les coûts de propriété de véhicule du covoiturage ne sont pas nuls, bien que réduits par rapport à la mobilité individuelle.

Les véhicules automatisés auront divers avantages et coûts, y compris de nombreux coûts externes (coûts imposés à d'autres personnes). Tous ces impacts doivent être pris en compte lors de leur planification.

	Avantages	Coûts/inconvénients
Internes (impacts usagers)	<p>Réduction du stress du conducteur et augmentation de la productivité : les automobilistes peuvent se reposer, travailler pendant le trajet.</p> <p>Mobilité permise pour les non-conducteurs : une mobilité plus indépendante pour les non-conducteurs peut réduire la charge des automobilistes en termes de transport et les subventions des transports en commun.</p> <p>Réduire les frais des chauffeurs pour les compagnies (compagnies de taxis et services de transports).</p>	<p>Augmentation des coûts d'un véhicule : nécessite un équipement, des services et des frais supplémentaires pour le véhicule.</p> <p>Risques supplémentaires pour l'utilisateur : accidents supplémentaires causés par des défaillances du système, des pelotons, des vitesses de circulation plus élevées, une prise de risque supplémentaire et une augmentation du nombre total de déplacements en véhicule.</p> <p>Sécurité de données personnelles réduite : vulnérable aux attaques (cyber) et à des données sensibles telles que la localisation et le partage de données.</p>
Externes (impacts sur les autres usagers de la route)	<p>Sécurité renforcée : réduction du risque d'accidents et des coûts liés aux assurances, réduction de la conduite à haut risque.</p> <p>Augmentation de la capacité et réduction des coûts : gain en efficacité du trafic, réduction de la congestion et les coûts des infrastructures.</p> <p>Réduction des coûts de stationnement : réduction de la demande de stationnement.</p> <p>Réduction de la consommation d'énergie : augmentation de l'efficacité énergétique et réduction des émissions.</p> <p>Soutien la mobilité partagée : pourrait faciliter l'autopartage et le covoiturage, en réduisant la possession totale de véhicules et les déplacements (ainsi que les coûts associés).</p>	<p>Augmentation des coûts des infrastructures : peut nécessiter des niveaux de service plus élevés de l'infrastructure.</p> <p>Risques additionnels : augmentation du risque pour les autres usagers et utilisation malveillante possible.</p> <p>Augmentation de la congestion : augmentation des trajets effectués, de la pollution associée et contribue à l'étalement urbain, ce qui entraîne de nouveaux coûts.</p> <p>Problèmes d'équité sociale : réduction des options de mobilité abordables, y compris les mobilités douces et les services de transport en commun.</p> <p>Perte d'emplois : notamment des chauffeurs.</p> <p>Prise en charge limitée des autres solutions : les prédictions optimistes de la conduite automatisée peuvent décourager d'autres améliorations et stratégies de transports.</p>

Tableau 1 : Avantages et coûts potentiels des véhicules automatisés – Les véhicules automatisés peuvent offrir divers avantages et coûts, y compris des impacts externes sur les autres usagers (et non utilisateurs).

Les véhicules durent plus longtemps, coûtent plus cher, imposent des coûts externes plus importants et sont plus fortement réglementés que la plupart des autres biens de consommation. Par conséquent, les technologies automobiles mettent plus de temps à pénétrer les marchés que la plupart des autres

secteurs. Il faudra probablement des décennies pour que les véhicules automatisés dominent les achats et les flottes de véhicules neufs, et certains automobilistes pourraient résister à leur utilisation.

De manière optimiste, les véhicules automatisés seront sûrs et fiables d'ici 2025, et pourraient être commercialisés dans de nombreux domaines d'ici 2030. S'ils suivent le modèle des technologies des véhicules conventionnels, au cours des années 2030 et probablement des années 2040, ils seront coûteux et leurs performances limitées, parfois incapables d'atteindre une destination souhaitée ou nécessitant une intervention humaine lorsqu'ils rencontrent des situations inattendues. Les clients seront des automobilistes et des entreprises fortunés au kilométrage annuel élevé. Dans un avenir prévisible, la plupart des ménages à revenu modeste et faible continueront d'utiliser des véhicules conventionnels.

Les véhicules automatisés partagés (taxis automatisés) et le covoiturage (services de micro-transit) pourraient être largement disponibles d'ici les années 2030. Les véhicules partagés ont des coûts d'exploitation modérés et offrent une commodité et un confort modérés. Ils devraient être moins chers que les services actuels de taxis et de VTC, mais offrir un service de moindre qualité puisqu'aucun chauffeur ne sera disponible pour assister les passagers, assurer la sécurité ou nettoyer les véhicules. La répartition des véhicules sera parfois lente et imprévisible, en particulier dans les zones suburbaines et rurales. Les trajets partagés auront les coûts les plus bas, mais le moins de commodité et de confort. En raison de leurs coûts de main-d'œuvre élevés et de leurs itinéraires prévisibles, les cars et les camions de fret sont particulièrement adaptés à un fonctionnement automatisé, et pourraient devenir communs dans les années 2030 et 2040.

La figure ci-dessous illustre ces projections de pénétration du marché et d'avantages. Cela indique qu'il faudra probablement attendre 2045 avant que la moitié des nouveaux véhicules ne soient automatisés, 2060 avant que la moitié de la flotte de véhicules ne soit automatisés, et peut-être plus longtemps en raison de défis techniques ou des préférences des consommateurs. L'automatisation de niveau 4 (capable de fonctionner de manière automatisée dans un domaine d'emploi précis, comme sur des chaussées à voies séparées) peut réduire le stress du conducteur et augmenter la productivité, mais la plupart des avantages nécessitent une automatisation de niveau 5 (capable de fonctionner de manière autonome dans toutes les conditions sans intervention d'un conducteur) afin que les véhicules puissent transporter les non-conducteurs et voyager à vide pour prendre ou déposer des passagers.

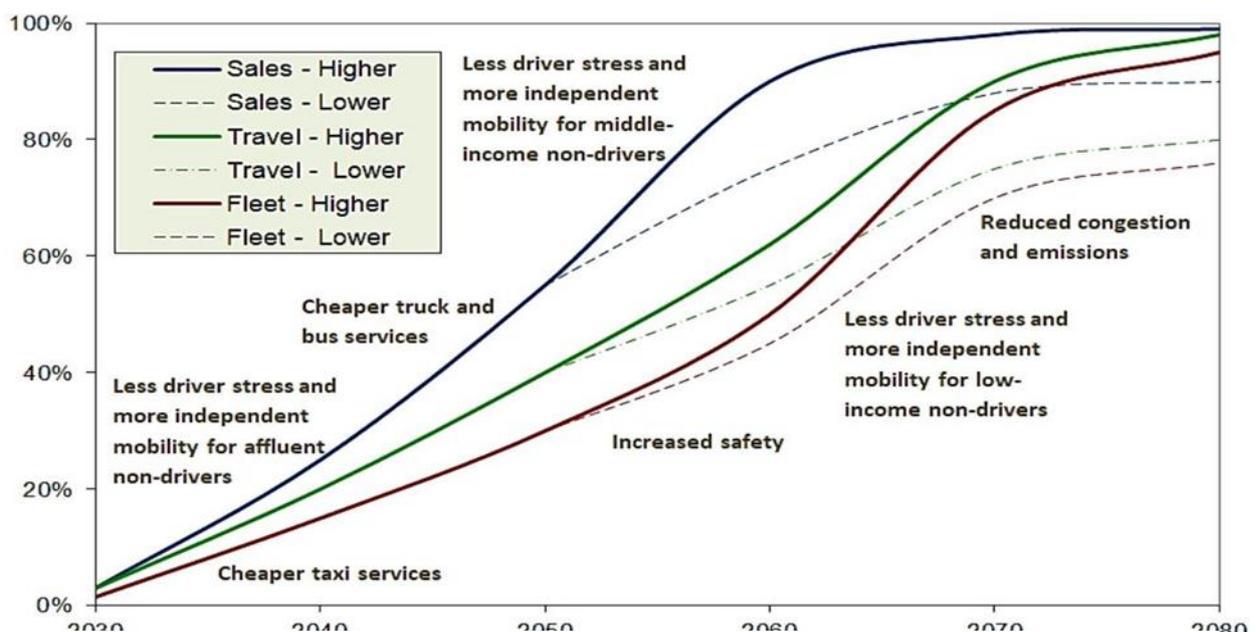


Figure 2 : Projection des ventes, de la flotte, des déplacements et des avantages des véhicules automatisés

Cette analyse suggère qu'il faudra au moins attendre 2045 avant que la moitié des nouveaux véhicules soient automatisés, et 2060 avant que la moitié de la flotte de véhicules ne soit automatisée. Un déploiement beaucoup plus rapide nécessitera la mise au rebut de nombreux véhicules autrement fonctionnels mais non automatisés. Certains avantages, tels que la réduction du stress du conducteur et la mobilité particulière des personnes aisées par ailleurs non conductrices, peuvent se produire lorsque les véhicules automatisés sont relativement coûteux et rares. Cependant, la plupart des cas d'usage, tels que la mobilité particulière pour les populations à revenu modéré et les services de taxis et de covoiturage abordables, ne peuvent être significatifs que s'ils deviennent courants et abordables. Certains avantages, tels que la réduction de la congestion, nécessiteront des voies réservées pour permettre la circulation en pelotons.

De nombreuses prévisions supposent que la plupart des véhicules automatisés seront électriques, qui auront de faibles coûts de carburant mais nécessitent des batteries coûteuses, qui n'ont actuellement aucune taxe sur le carburant. L'intégration des coûts de remplacement des batteries et des frais d'utilisation de l'infrastructure augmentent les coûts d'exploitation des véhicules électriques pour qu'ils soient similaires à ceux des véhicules à carburant fossile.

Une question de planification importante est de savoir si les véhicules automatisés augmenteront ou réduiront les déplacements totaux des véhicules et les problèmes de circulation associés. Cela pourrait aller dans les deux sens. En augmentant les déplacements des personnes non motorisées, en augmentant la commodité et le confort des déplacements, en réduisant les coûts d'exploitation des véhicules, en générant des déplacements à vide et en encourageant les trajets sur de plus longues distances et un développement plus étendu, ils peuvent augmenter les déplacements totaux. Ces déplacements supplémentaires offrent des avantages marginaux au consommateur, et comme les déplacements imposent des coûts externes importants, une grande partie de cette augmentation de déplacements est susceptible d'être économiquement inefficace : ses avantages pour l'utilisateur seront inférieurs aux coûts supplémentaires totaux. Alternativement, le fonctionnement automatisé peut faciliter le partage de véhicules, permettant aux ménages de réduire la possession de véhicules et les déplacements. Cela suggère que les véhicules automatisés augmenteront les déplacements dans les zones suburbaines et rurales et les réduiront dans les zones urbaines. Leurs impacts nets dépendront des politiques de transport et d'aménagement du territoire. Avec les politiques actuelles, les déplacements et l'étalement des véhicules devraient augmenter de 10 à 30 %. Une tarification plus efficace et une gestion de la voirie qui favorise les véhicules partagés peuvent réduire les déplacements des véhicules et les problèmes associés.

Un autre problème crucial est la mesure dans laquelle les avantages potentiels peuvent être obtenus lorsqu'une partie seulement des déplacements est automatisée. Certains avantages, tels qu'une mobilité améliorée pour les personnes aisées non motorisées, peuvent se produire lorsque les véhicules automatisés sont rares et coûteux, mais de nombreux avantages potentiels, tels que la réduction de la congestion et des émissions, exigent que les véhicules fonctionnent de manière automatisée dans des voies dédiées.

La mise en œuvre de véhicules automatisés n'est qu'une des nombreuses tendances susceptibles d'affecter les demandes et les impacts futurs en matière de transport, et pas nécessairement la plus importante. Leurs impacts ultimes dépendent de la manière dont les véhicules automatisés interagissent avec d'autres tendances, telles que le passage des véhicules individuels aux véhicules partagés. Les véhicules automatisés ne provoqueront un « changement de paradigme » que si cette technologie entraîne des changements importants des véhicules particuliers vers des véhicules partagés et crée davantage de report modal.

Les professionnels du transport ont un rôle important à jouer dans le développement et le déploiement de véhicules automatisés.

Introduction

La planification nécessite de prévoir les conditions de déploiement et les besoins imminents. De nombreux décideurs et professionnels (planificateurs, ingénieurs et analystes) se demandent comment les véhicules automatisés affecteront les futures demandes de déplacement, et donc le besoin d'infrastructures routières, de stationnements et de services de transport en commun, et quelles politiques publiques peuvent minimiser leurs risques et maximiser leurs bénéfices (APA 2016 ; Berrada et Leurent 2017 ; Grush et Niles 2018 ; Guerra 2015 ; Kockelman et Boyles 2018 ; Larco 2022 ; Milakis, van Arem et van Wee 2017 ; Shaheen, Totte et Stocker 2018 ; Sperling 2017).

Il existe une incertitude considérable sur ces questions. Les optimistes prédisent, sur la base de l'expérience des innovations technologiques précédentes telles que les appareils photo numériques, les téléphones intelligents et les ordinateurs personnels, que les véhicules autonomes seront bientôt suffisamment fiables et abordables pour remplacer l'humain, offrant d'énormes économies et avantages (Johnston et Walker 2017 ; Keeney 2017 ; Kok et al. 2017). Cependant, il y a de bonnes raisons d'être sceptique face à de telles affirmations.

Les prévisions optimistes négligent souvent des obstacles et des coûts importants. De nombreux problèmes techniques doivent être résolus avant que les véhicules totalement automatisés puissent fonctionner de manière fiable dans toutes les conditions (Knight 2020 ; Leonard, Mindell et Stayton 2020 ; Norton 2021). Ils nécessiteront des années de tests et d'approbations réglementaires pour progresser sur ce que les technologues appellent l'échelle du niveau de maturité technologique (TRL), d'une idée à une disponibilité commerciale complète (McLeod 2021), et au fil du temps devenir abordables et attrayants pour les consommateurs. Les véhicules à moteur sont coûteux, durables et hautement réglementés, de sorte que les nouvelles technologies automobiles mettent généralement des décennies à pénétrer les flottes.

La conduite automatisée peut créer de nouveaux problèmes : une panne d'appareil photo, de téléphone ou d'ordinateur peut être frustrante mais rarement mortelle ; les défaillances des systèmes des véhicules à moteur peuvent être frustrantes et mortelles pour les occupants et les autres usagers de la route. En conséquence, les véhicules automatisés prendront probablement plus de temps à se développer et offriront des avantages nets moindres que ne le prédisent les optimistes.

Cela a des implications politiques importantes (Papa et Ferreira 2018 ; Speck 2017). Les véhicules dépendent des infrastructures publiques et peuvent imposer des coûts externes importants, et nécessitent donc plus de planification et de réglementation que la plupart des autres technologies. Par exemple, de nombreux avantages prédits des véhicules automatisés, y compris la réduction de la congestion et de la pollution, nécessitent des voies réservées pour permettre la conduite en peloton. De plus, les véhicules automatisés peuvent être programmés pour prioriser les besoins de usagers comme par exemple maximiser la vitesse de trajet et le confort des passagers, ou les bénéfices collectifs comme la minimisation du temps d'attente et des risques pour l'ensemble des usagers de la route. Les décideurs politiques doivent décider s'il faut construire des voies spéciales pour véhicules automatisés, quelle tarification leur associer et comment réglementer leur fonctionnement afin de maximiser les avantages totaux (Zipper 2021).

Ce rapport explore ces questions. Il étudie, sur la base de l'expérience des technologies de véhicules précédentes, la rapidité avec laquelle les véhicules automatisés sont susceptibles d'être développés et déployés, évalue de manière critique leurs avantages et leurs coûts, et discute leurs impacts probables sur les déplacements et leurs implications dans le cadre de la planification des transports.

Modèles opérationnels de véhicules automatisés

La figure 3 décrit les 6 niveaux d'automatisation. Nombreux des avantages prédits nécessitent le niveau 5, qui permet aux véhicules de transporter des personnes (non détentrices du permis de conduire) et des biens dans tous les environnements de conduite.

Figure 3 : Niveaux d'automatisation (SAE J3016) – La société des ingénieurs de l'automobile (SAE) définit 6 niveaux d'automatisation.



Tableau 2 : Comparaison des modèles de conduite

	Véhicule conventionnel particulier	Véhicule automatisé particulier	Véhicule automatisé partagé	Véhicule automatisé pour le covoiturage
	<i>Le conducteur possède ou loue un véhicule qu'il conduit.</i>	<i>Le foyer possède ou loue un véhicule automatisé.</i>	<i>Un taxi automatisé offre un service privé.</i>	<i>Un véhicule automatisé est utilisé pour plusieurs passagers.</i>
Avantages	Bas coûts. Toujours disponible. Laisser des affaires dans le véhicule. Fierté de la propriété.	Très pratique. Toujours disponible. Laisser des affaires dans le véhicule. Fierté de la propriété.	Les usagers peuvent choisir les véhicules qui correspondent à leur besoin. Service porte à porte.	Coûts totaux les plus faibles. Minimise la congestion, les risques, la pollution et les émissions
Inconvénients	Requiert un permis de conduire et la gestion du stress.	Coûts élevés. Les usagers ne peuvent pas choisir des véhicules différents pour différents usages. Augmentation potentielle du nombre de déplacements et des coûts associés.	Les usagers doivent attendre les véhicules. Services limités (pas de conducteurs pour aider les passagers et assurer la sécurité).	Commodité et confort à moindre vitesse, en particulier dans les zones d'étalement urbain.
Usagers cibles	Résidents modestes et à revenus modérés des zones rurales et suburbaines.	Résidents aisés des zones rurales et suburbaines.	Utilisateurs à faible kilométrage annuel.	Résidents urbains à faible revenus.

Coûts et bénéfices

Cette section décrit les avantages et les coûts des véhicules automatisés.

Réduction du stress du conducteur, amélioration de la productivité et de la mobilité

Les véhicules automatisés peuvent réduire le stress et l'ennui des conducteurs et augmenter leur productivité. Il peut s'agir de bureaux mobiles et de chambres, comme illustré ci-dessous, permettant aux passagers de se reposer ou travailler en voyage (WSJ 2017). Cela réduit les coûts unitaires de temps de trajet (coût par heure). Cependant, pour des raisons de sécurité, les occupants doivent porter leur ceinture de sécurité, restreindre l'utilisation des lits dans les véhicules et, comme tout espace confiné, l'intérieur des véhicules est susceptible de devenir encombré et sale (Broussard 2018).

Les véhicules automatisés peuvent introduire de nouveaux stress et inconforts. Les voyageurs peuvent ressentir de « l'anxiété » si les véhicules sont parfois incapables d'atteindre les destinations souhaitées, par exemple, en raison de fortes pluies ou de neige, ou si une zone ne dispose pas d'une cartographie détaillée pour un fonctionnement autonome (Grush 2016). Les taxis autonomes et les services de micro-transit seront moins chers que les taxis conventionnels avec conducteur humain, mais offriront une qualité de service inférieure car il n'y aura pas de chauffeurs pour aider à transporter les colis ou assurer la sécurité des passagers. Pour minimiser les coûts de nettoyage et de vandalisme, la plupart des surfaces seront en acier inoxydable et en plastique, et des caméras de sécurité surveilleront les passagers, mais ils peuvent toujours rencontrer les déchets, les taches et les odeurs des occupants précédents (Broussard 2018). Les trajets autonomes partagés (micro-transit) obligent les passagers à partager l'espace avec des étrangers, et chaque prise en charge ou dépose supplémentaire peut imposer des retards, réduisant la vitesse et la fiabilité.

Les véhicules automatisés peuvent offrir une mobilité indépendante aux personnes qui, pour une raison quelconque, ne peuvent ou ne doivent pas conduire. Cela profite directement à ces voyageurs et, en améliorant leur accès à l'éducation et aux opportunités d'emploi, peut augmenter leur productivité et réduire le fardeau du chauffeur pour les membres de leur famille et leurs amis. D'autre part, des prévisions optimistes sur les avantages des véhicules autonomes pourraient amener certaines collectivités à réduire leur soutien aux services de transport en commun, ce qui pourrait réduire les options de mobilité pour les non-conducteurs (Creger, Espino et Sanchez 2019). Le fait de réserver des voies d'autoroute aux pelotons de véhicules automatisés peut réduire la capacité des voies, ce qui nuit aux occupants des véhicules.

Coûts de propriété et d'exploitation

Les véhicules automatisés nécessitent divers équipements et services résumés dans l'encadré ci-dessous.

Les défaillances (dysfonctionnements) pouvant être mortels, les véhicules automatisés ont besoin de composants robustes et redondants, installés et entretenus par des spécialistes, ce qui augmente les coûts de maintenance. Actuellement, un ensemble d'accessoires de véhicules en option, tels que le démarrage à distance, l'aide au maintien dans la voie et les caméras de sécurité, coûtent généralement plusieurs milliers de dollars et les abonnements aux services de navigation et de sécurité, tels que OnStar et TomTom, coûtent entre 150 et 750 dollars par an. La mise à niveau du pilote automatique de base de Tesla vers le Full Self-Drive (FSD), qui offre un fonctionnement automatisé dans certaines conditions, coûte jusqu'à 12 000 \$. Les propriétaires de véhicules devront probablement s'abonner à des mises à jour logicielles fréquentes et à des services de cartographie de navigation. Les capteurs avancés du système d'aide à la conduite (caméras, radar et lidar) doublent environ les coûts des dommages mineurs liés aux collisions, ajoutant généralement 3000 \$ à la facture de réparation (AAA 2018), ce qui suggère que les véhicules automatisés, par leurs capteurs multiples, augmenteront les coûts de réparation des véhicules.

Tableau 3 : Equipements des véhicules automatisés et exigences du service – Les véhicules automatisés, en particulier ceux qui sont partagés, vont entraîner des coûts supplémentaires

Tout véhicule automatisé	Véhicule automatisé partagé
<ul style="list-style-type: none"> • Capteurs (optique, radar, laser, infrarouge, ...) • Contrôle automatisé (freinage, signaux, direction, ...) • Logiciels, serveurs et alimentation • Réseau de communication V2V courte portée, accès Internet pour la cartographie, les logiciels et leurs mises à jour et rapports de circulation • Souscription aux mises à jour des logiciels et cartes de navigation • Entretien des composants critiques, réparation et tests 	<ul style="list-style-type: none"> • Répartition et gestion de flotte • Administratif et assurances • Bénéfices commerciaux • Sécurité • Fréquence de nettoyage et de réparation • Délais d'attente et circulation à vide des véhicules

Certains optimistes prédisent que le véhicule électrique automatisé coûtera moins de 5 \$ par km pour fonctionner, mais c'est probablement une sous-estimation. Les batteries des véhicules doivent être remplacées environ tous les 100 000 km, ce qui coûte actuellement entre 3 000 et 15 000 \$, soit 3 à 10 \$ par véhicule-km. Cela peut diminuer avec les innovations de production, mais probablement pas beaucoup puisque la plupart des automobilistes choisissent des batteries plus grandes et plus sophistiquées pour maximiser les performances. Les véhicules électriques ne paient actuellement aucune taxe sur le carburant ; les frais d'utilisation de la route avec recouvrement des coûts ajouteraient 5 à 10 \$ par véhicule-km. L'intégration de ces facteurs augmente les coûts d'exploitation des véhicules électriques à 10-25 \$ par km, comme pour les véhicules à carburant fossile.

Que sont les frais d'utilisation d'une route efficiente ?

Des redevances d'utilisation de la route permettent de récupérer les coûts imputés à l'infrastructure, avec des frais supplémentaires pour la congestion, les accidents et les dommages causés par la pollution, imposés aux autres usagers. Les dépenses publiques pour les infrastructures routières totalisent environ 250 milliards de dollars par an, ce qui couvre environ 3200 milliards de véhicules-km, soit une moyenne d'environ 8 c\$ par mile (FHWA 2016) ; les tarifs optimaux sont des tarifs un peu moins élevés pour les véhicules légers et plus élevés pour les véhicules lourds qui imposent des coûts routiers plus élevés. En heure de pointe, des frais de décongestion de 5 à 25 c\$ par km sont généralement nécessaires pour réduire les volumes de trafic à la capacité de la chaussée. De plus, tous les frais d'émission des véhicules électriques devraient être basés sur la distance afin que les conducteurs paient en fonction de la quantité qu'ils conduisent et des coûts qu'ils imposent.

L'expérience des innovations précédentes, telles que les transmissions automatiques et les airbags, suggère que la capacité de la conduite automatisée ne sera initialement disponible que sur les modèles plus chers et qu'il faudra probablement des décennies pour devenir la norme sur les modèles moins coûteux.

Certains partisans soutiennent que les assurances et les économies de carburant compenseront ces coûts (Intellias 2018), mais cela semble peu probable. Par exemple, si la conduite automatisée réduit les frais d'assurance collision de moitié, les économies annuelles de 300 à 500 \$ ne représenteraient que 10 à 20 % des coûts supplémentaires estimés. Les économies de carburant sont également susceptibles d'être faibles ou négatives en raison de l'équipement supplémentaire, des véhicules plus grands servant de bureaux mobiles, induisent des déplacements supplémentaires pour les véhicules.

En conséquence, la conduite automatisée ajoutera probablement plusieurs milliers de dollars au prix d'achat des véhicules neufs, ainsi que des centaines de dollars en coûts annuels supplémentaires d'entretien, de réparation, de mises à jour logicielles et d'abonnement à la cartographie. Cela ajoutera quelques milliers de dollars de dépenses annualisées, au moins pendant les premières décennies de leur disponibilité commerciale, jusqu'à ce que la concurrence et la dépréciation rendent ces technologies disponibles sur des modèles moins coûteux et des véhicules d'occasion. Cela suggère que,

dans un avenir prévisible, les coûts des véhicules automatisés particuliers seront probablement en moyenne 0,80 \$ à 1,20 \$ par véhicule-km, ce qui pourrait éventuellement baisser à 0,60 \$ - 1,00 \$ par km à mesure que la technologie devient disponible dans des modèles moins onéreux. Les véhicules automatisés partagés (taxis autonomes) coûteront probablement 0,50 \$ à 1,00 \$ par véhicule-km, et les trajets autonomes partagés coûteront probablement 0,20 - 0,40 \$ par passager-km (Nunes et Hernandez 2020). C'est moins coûteux que les taxis conventionnels (1,50 \$ à 3,00 \$ par km), mais plus cher que les coûts d'exploitation d'un véhicule personnel ou les tarifs de transport en commun (20 à 40 c\$ par passager-km).

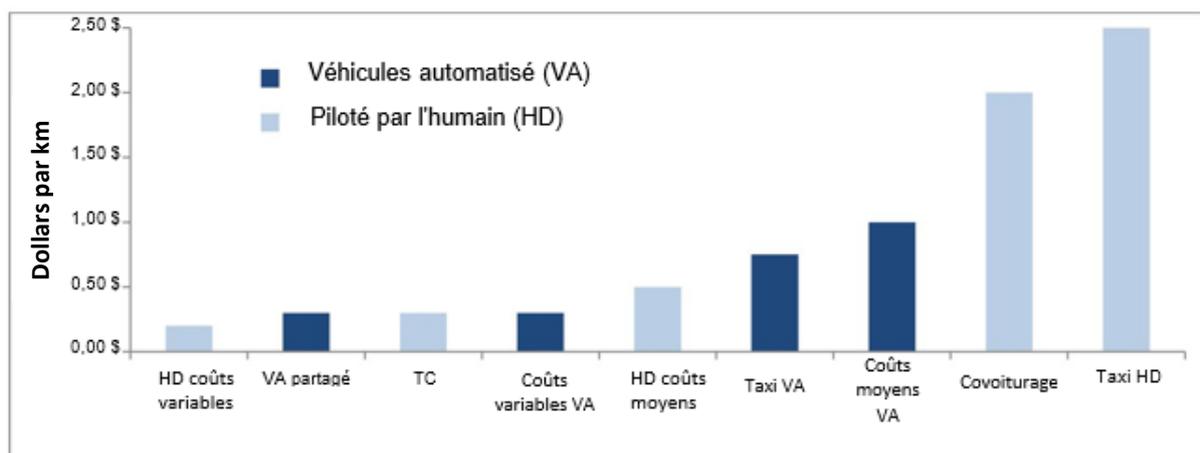
Certaines études estiment des coûts inférieurs. Par exemple, Kok et al. (2017) prédisent que les véhicules autonomes électriques partagés coûteront moins de 10 c\$ par km, suffisamment bon marché pour que de nombreux trajets puissent être financés par la publicité, mais ces estimations ignorent les coûts tels que le nettoyage et les réparations de vandalisme, les déplacements à vide, les assurances (beaucoup supposent des primes d'assurance inférieures de 90 %), et les frais d'utilisation des infrastructures, et sont donc probablement sous-estimées.

Nettoyage et réparations – des coûts souvent négligés

Bien que la plupart des passagers de taxis autonomes soient susceptibles d'être courtois et responsables, certains seront probablement désordonnés et quelques-uns seront malveillants. Pour décourager les abus, les intérieurs des taxis autonomes seront des services en métal dur et en plastique, avec des caméras de surveillance, qui peuvent réduire mais ne peuvent pas éliminer ces problèmes, de sorte que les véhicules auront parfois des ordures, des odeurs désagréables ou des dommages. Les taxis autonomes devront probablement être nettoyés tous les 5 à 15 trajets, ainsi que subir des réparations occasionnelles. En supposant 5 à 10 \$ par nettoyage, cela ajoutera 0,33 à 2,00 \$ par voyage, en plus du temps de déplacement et des coûts vers les stations de nettoyage.

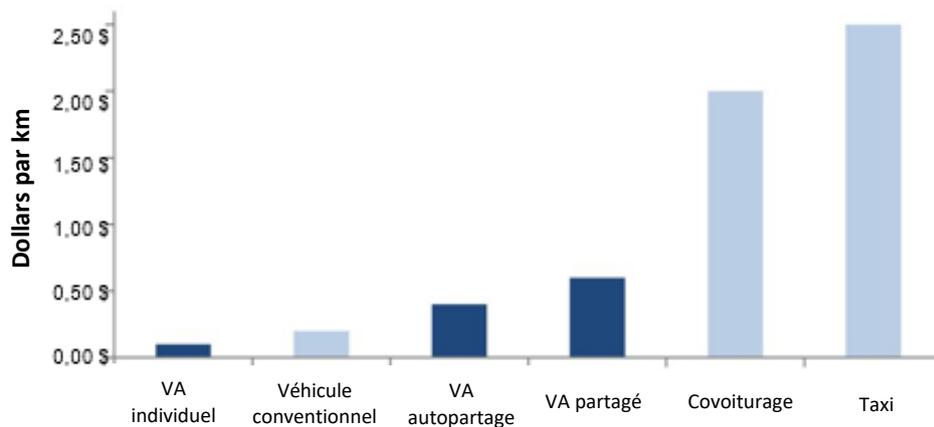
Les véhicules automatisés peuvent permettre des économies particulièrement importantes pour les véhicules utilitaires, tels que les camions de fret et les bus, en raison de leurs coûts de main-d'œuvre élevés. Cependant, cela n'éliminera pas nécessairement le besoin de travailleurs à bord, car de nombreux véhicules de livraison nécessitent un opérateur pour décharger les marchandises, et les bus peuvent encore avoir besoin de conducteurs pour assurer les services aux passagers et la sécurité.

Figure 4 : Comparaison des coûts (AAA 2017, Bösch et al. 2017, Johnson et Walker 2017, Keeney 2017, Litman 2021, Stephens et al. 2016 – Les véhicules automatisés sont susceptibles de coûter plus cher que les véhicules particuliers conventionnels et les transports en commun mais moins que les taxis conventionnels et les services de covoiturage.



Les figures 4 et 5 comparent les estimations des coûts d'utilisation. Les coûts moyens sont ce que les voyageurs prennent en compte lorsqu'ils décident d'acheter un véhicule ; les coûts d'exploitation (variables) sont ce que les propriétaires de véhicules prennent en compte lorsqu'ils décident comment effectuer un trajet particulier. Les véhicules électriques automatisés seront probablement moins chers à exploiter que la plupart des véhicules actuels. Les véhicules automatisés partagés seront moins chers que les services de taxi et de covoiturage, mais plus chers que les coûts d'usage du véhicule particulier. Ils sont susceptibles d'augmenter le nombre total de déplacements en véhicule et les coûts pour les propriétaires de véhicules automatisés, mais de réduire les déplacements et les coûts pour ceux qui passent de la propriété à l'autopartage et conduisent moins d'environ 6000 km par an.

Figure 5 : Coûts variables - Bien que les véhicules sont chers à l'achat, ils sont relativement peu coûteux à l'usage, avec des coûts d'exploitation moyennés à environ 20 c\$ au km. C'est plus qu'un véhicule électrique automatisé mais moins qu'un véhicule automatisé en autopartage, que le covoiturage et les services de taxi.



Les politiques publiques affecteront ces coûts. Les gouvernements pourraient imposer de nouvelles redevances aux usagers de la route pour récupérer les coûts d'infrastructure et réduire les problèmes de circulation, ce qui augmenterait les coûts d'exploitation des véhicules électriques et rendrait les déplacements en véhicule partagé plus attrayants.

Sécurité routière et santé publique

Les optimistes affirment que, comme environ 90 % des accidents impliquent une erreur humaine, les véhicules automatisés réduiront les taux d'accident et les coûts de 90 % (Kok et al. 2017; McKinsey 2016), mais cela néglige les risques supplémentaires que ces technologies peuvent introduire (Hsu 2017 ; ITF 2018 ; Kockelman et al. 2016 ; Koopman et Wagner 2017 ; Ohnsman 2014).

- *Défaillances matérielles et logicielles.* Les systèmes électroniques complexes échouent souvent en raison de faux capteurs, de signaux déformés et d'erreurs logicielles. Les véhicules automatisés auront certainement des défaillances (dysfonctionnements) qui contribuent aux accidents, bien que leur fréquence soit difficile à prévoir (Dawn Project 2022).
- *Piratage malveillant.* Les technologies de conduite automatisée peuvent être manipulées pour l'amusement ou le crime.
- *Augmentation de la prise de risque.* Lorsque les voyageurs se sentent plus en sécurité, ils ont tendance à prendre des risques supplémentaires, appelés comportement compensatoire ou compensation des risques. Par exemple, les passagers de véhicules automatisés pourraient réduire l'utilisation de la ceinture de sécurité et les autres usagers de la route pourraient être moins prudents (Millard-Ball 2016), ce qui est décrit comme une sur-confiance envers la technologie (Ackerman 2017).
- *Risques des pelotons.* De nombreux avantages potentiels, tels que la réduction de la congestion et des émissions de polluants, nécessitent la formation de pelotons (véhicules circulant à proximité

les uns des autres à grande vitesse sur des voies réservées), ce qui peut introduire de nouveaux risques, tels que des conducteurs humains rejoignant les pelotons et une gravité accrue des accidents.

- *Augmentation de la demande.* En améliorant la commodité et le confort, les véhicules automatisés pourraient augmenter la demande et donc l'exposition aux accidents (Trommer et al. 2016 ; WSJ 2017).
- *Risques supplémentaires pour les autres usagers.* Les véhicules automatisés peuvent avoir des difficultés à détecter et à interagir avec les piétons, les cyclistes et les 2RM (PBIC 2017).
- *Réduction des investissements dans les stratégies de sécurité conventionnelles.* La perspective des véhicules automatisés pourrait réduire les efforts futurs pour améliorer la sécurité des conducteurs (Lawson 2018).
- *Coûts de réparation des véhicules plus élevés en raison d'équipements supplémentaires.* Des capteurs et des systèmes de contrôle supplémentaires, ainsi qu'un contrôle de qualité accru, sont susceptibles d'augmenter considérablement les coûts de réparation après collision (AAA 2018).

Ces nouveaux risques entraîneront probablement des accidents supplémentaires, de sorte que les véhicules automatisés n'atteindront pas vraiment les réductions d'accidents de 90 % que prédisent certains. Après avoir analysé les facteurs de risque d'accident de la circulation, Mueller, Cicchino et Zubay (2020) ont conclu que les véhicules automatisés pourraient prévenir jusqu'à 34 % des accidents, et plus si la technologie élimine toutes les infractions au code de la route, mais moins de 90 %. Sivak et Schoettle (2015a) conclut que les véhicules automatisés auront des taux d'accidents similaires à ceux d'un conducteur moyen, et que le nombre total d'accidents pourrait augmenter à l'arrivée du trafic mixte. Le pilote automatique et le logiciel « *Full Self-Driving* » de Tesla ont été accusés d'avoir causé de nombreux accidents et décès (Siddiqui, Lerman et Merrill 2022). Groves et Kalra (2017) soutiennent que le déploiement de véhicules automatisés est justifié même s'ils ne réduisent les taux d'accident que de 10 %, mais que le nombre total d'accidents pourrait augmenter si le déploiement augmente la demande. Par exemple, s'il réduit les taux d'accidents par kilomètre de 10 % mais que la demande augmente de 12 %, le nombre total d'accidents, y compris les risques pour les autres usagers de la route, augmentera.

Les véhicules automatisés sont vulnérables aux actes malveillants. Des chercheurs ont démontré que l'ajout de marques semblables à des graffitis à un panneau d'arrêt en bordure de route amenait le logiciel à lire un message inexact.

« Limite de vitesse 45 km/h » (Eykholt, et al. 2018). Il y aura une course entre les pirates et les concepteurs de logiciels pour le contrôle des véhicules automatisés, ce qui augmentera les coûts et les risques.

Les véhicules automatisés ont actuellement des taux de défaillances opérationnelles élevés. Une étude a révélé que le logiciel de conduite automatisé de Tesla échouerait à un test de conduite normal car il enregistre en moyenne une erreur de manœuvre toutes les trois minutes et une erreur critique toutes les dix minutes (Dawn Project 2022). En 2019, les meilleurs tests de véhicules automatisés ont enregistré des reprises en main tous les 16666 km, mais la plupart étaient plus fréquents (Hyatt 2020). Ces exemples indiquent que les technologies des véhicules automatisés ne sont pas prêtes pour un large déploiement.

Les véhicules automatisés partagés peuvent réduire les accidents en offrant des alternatives plus abordables aux conducteurs à haut risque. Les efforts visant à réduire la conduite à haut risque, tels que les permis de conduire progressifs, les tests spéciaux pour les conducteurs âgés et les campagnes contre les conducteurs aux facultés affaiblies, peuvent être plus efficaces et publiquement acceptables si les groupes concernés disposent d'options de mobilité pratiques et abordables. Par exemple, les parents pourraient acheter des véhicules automatisés pour leurs adolescents et les usagers pourraient utiliser des véhicules automatisés après avoir bu de l'alcool ou pris de la drogue.

De nombreux facteurs affecteront ces impacts, y compris la façon dont les véhicules sont programmés et comment ils affectent la demande de transport. Par exemple, pour augmenter la vitesse de déplacement, les véhicules automatisés pourraient être programmés pour prendre plus de risques et de raccourcis dans les quartiers ; pour minimiser la congestion, ils pourraient être programmés pour rouler plus lentement et éviter les routes congestionnées. Par exemple, le logiciel de conduite automatisée de Tesla permet aux conducteurs de choisir un mode de fonctionnement plus rapide et « affirmé » qui enfreint fréquemment le code de la route (Wilson 2022).

Le dilemme du trolley

« Le dilemme du trolley » fait référence à divers scénarios que les éthiciens utilisent pour déterminer qui devrait être protégé d'un véhicule incontrôlable, par exemple, s'il doit être dirigé pour tuer moins plutôt que plus, plus âgé plutôt que jeune, ou plus plutôt que les personnes moins socialement responsables. Bien que tous les conducteurs de véhicules puissent être confrontés à ces compromis, les décisions des conducteurs humains sont généralement spontanées, tandis que celles prises par les véhicules automatisés sont explicitement programmées. Cela soulève une question éthique de politique publique : qui devrait décider de la manière dont les véhicules sont programmés lorsqu'il s'agit de faire des compromis sur les risques.

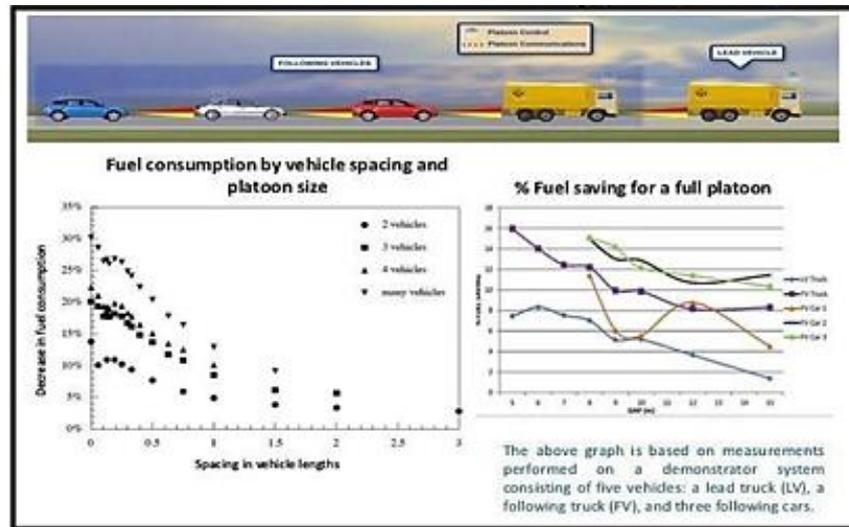
Par exemple, les véhicules automatisés doivent-ils fonctionner dans les limites de vitesse légales ou pour correspondre aux vitesses moyennes de circulation sur une chaussée ? Comment doivent-ils hiérarchiser les risques pour les occupants des véhicules par rapport aux risques pour les autres usagers de la route ? Comment un véhicule automatisé doit-il réagir face à des conditions inattendues ? Pour protéger les autres usagers de la route et minimiser les autres coûts externes, les organisations professionnelles devraient fournir des conseils sur la manière dont les véhicules automatisés devraient être programmés pour compenser les coûts et les risques, et les gouvernements devraient établir des réglementations pour garantir que les véhicules automatisés sont programmés.

Sohrabi, Khreis et Lord (2020) ont identifié 32 voies par lesquelles les véhicules automatisés peuvent affecter la santé publique, dont 17 sont négatives et 8 sont positives. Afin de maximiser les avantages pour la santé, ils recommandent des politiques de gestion de la demande de transport pour favoriser les véhicules automatisés électriques partagés et empêcher l'augmentation du nombre total de déplacements en véhicule.

Coûts externes

Les optimistes prônent que la conduite automatisée va réduire considérablement les coûts externes, incluant la congestion, les coûts de stationnement, les risques d'accidents et les émissions de polluants, mais ces impacts sont incertains (Eddy et Falconer 2017 ; Rodier 2018 ; TRB 2019). Dans de nombreuses circonstances, ils peuvent augmenter certains coûts externes. Par exemple, s'ils sont programmés pour maximiser la sécurité et le confort des passagers afin qu'ils puissent se reposer ou travailler tout en voyageant, ils réduiront la vitesse de la circulation. À moins d'être mis en œuvre avec des incitations efficaces de gestion de la demande, ils sont susceptibles d'augmenter le nombre total de déplacements, les problèmes de circulation et l'étalement urbain, ce qui pourrait augmenter la congestion totale, les accidents, la pollution et d'autres coûts (Nadafianshamabadi, Tayarani et Rowangould 2021). Certains avantages nécessitent des voies réservées aux pelotons (Guhathakurta et Kumar 2019 ; Heaslip et al. 2020), qui sont coûteuses et réalisables uniquement sur certaines autoroutes, et peuvent nécessiter des panneaux spéciaux, des marquages routiers, des signaux et des transpondeurs qui ajoutent des coûts (Lawson 2018). Les véhicules automatisés et partagés auront besoin de stations d'accueil et de zones d'embarquement des passagers (Marsden, Docherty et Dowling 2020 ; Zhang et Wang 2020).

Figure 6 : Platooning sans conducteur - De nombreux avantages proposés pour les véhicules automatisés, notamment la réduction de la congestion, de la consommation de carburant et des émissions, nécessitent un développement de la conduite en pelotons : plusieurs véhicules connectés circulant à proximité les uns des autres à des vitesses relativement élevées, de préférence avec un poids lourd en tête. Cela nécessite des voies d'autoroute dédiées.



Les optimistes supposent souvent que la plupart des véhicules automatisés seront électriques, ce qui réduit mais n'élimine pas les émissions polluantes, car une grande partie de l'électricité est générée par des combustibles fossiles émetteurs de pollution (Larco, et al. 2018 ; Reighmuth 2020), et les véhicules électriques produisent des émissions de particules provenant de l'usure des freins, des pneus et de la route, qui constituent un risque majeur pour la santé, en particulier dans les zones urbaines denses (Air Quality Expert Group 2020).

Les impacts globaux dépendront de la manière dont les véhicules automatisés sont conçus et réglementés. S'ils sont programmés pour un maximum de prudence et de confort des passagers, ils conduiront lentement et s'arrêteront fréquemment lorsqu'ils seront confrontés à des conditions inattendues, ce qui réduira la vitesse de la circulation et entraînera des retards (Le Vine, Zolfaghari et Polak 2015). S'ils sont programmés pour maximiser les vitesses de déplacement, ils peuvent augmenter les risques pour les autres usagers de la route et emprunter des raccourcis dans les quartiers.

Impacts sur l'équité sociale

Les véhicules automatisés sont susceptibles d'avoir divers impacts sur l'équité sociale, comme résumé ci-dessous.

Équité horizontale en matière de subventions

Un principe économique de base est que les marchés (un système de transport peut être considéré comme un marché de la mobilité) sont plus efficaces et équitables si les prix (ce que les consommateurs paient pour utiliser un bien) reflètent les coûts de production de ce bien, ou décrit différemment, les consommateurs généralement « obtiennent ce pour quoi ils paient et paient pour ce qu'ils obtiennent », à moins que les subventions ne soient spécifiquement justifiées.

Pour réduire la congestion, les risques d'accident, la consommation d'énergie et les émissions de polluants, les véhicules automatisés nécessitent des voies de circulation dédiées, et les véhicules électriques reçoivent actuellement d'importantes subventions à l'achat et sont exonérés des frais d'utilisation de l'infrastructure que les utilisateurs de véhicules à combustibles fossiles paient par le biais des taxes sur les carburants. Par conséquent, sans nouveaux systèmes de tarification de recouvrement des coûts, les véhicules électriques automatisés pourraient recevoir des subventions inéquitables.

Coûts du trafic externe

Les coûts externes de la circulation (congestion, retard des piétons, coûts des routes et des installations de stationnement, risque d'accident et émissions polluantes que les déplacements imposent aux autres) sont inévitables.

Les optimistes prédisent que les véhicules électriques automatisés réduiront ces coûts, mais leurs impacts réels sont incertains et dépendront s'ils induisent une augmentation de la demande et des politiques publiques. S'ils disposent de voies réservées, les véhicules automatisés pourraient augmenter le débit de véhicules, mais dans la plupart des cas, leurs impacts sur la congestion seront probablement mitigés. Ils sont susceptibles de réduire les accidents causés par une erreur humaine, mais introduiront de nouveaux risques, notamment des défaillances matérielles et logicielles, le piratage malveillant, une prise de risques accrue si les autres usagers de la route se sentent plus en sécurité et une exposition supplémentaire causée par l'augmentation de la demande. Les véhicules électriques automatisés devraient réduire mais pas éliminer les émissions de polluants par rapport aux véhicules à carburant fossile. Ces avantages peuvent être partiellement compensés si la conduite automatisée augmente le nombre total de déplacements.

Équité horizontale par rapport à l'espace routier

L'espace routier est une ressource rare et précieuse. L'équité horizontale exige de donner la priorité aux véhicules économes en espace, tels que les vanpools et les autobus, afin que leurs passagers ne soient pas retardés par les embouteillages causés par les utilisateurs de modes à fort encombrement, tels que les véhicules particuliers à faible taux d'occupation.

Les véhicules automatisés privés sont susceptibles d'avoir de faibles taux d'occupation. Comme décrit précédemment, sans tarification routière efficace, il sera souvent moins cher pour les automobilistes de programmer leurs voitures automatisées pour faire le tour du pâté de maisons ou rentrer chez eux, afin d'éviter de payer pour le stationnement hors voirie, ce qui contribuera encore plus à la congestion du trafic.

Pour maximiser l'équité, les routes publiques devraient être gérées et tarifées de manière à favoriser les modes économes en espace, y compris les taxis automatisés partagés et l'autopartage, et à limiter les volumes de trafic à la capacité des routes. Cela sera de plus en plus important à mesure que les véhicules automatisés deviendront plus courants, ce qui augmentera la demande de déplacements potentielle.

Équité verticale par rapport aux capacités et aux besoins

Cela suppose que les politiques de transport devraient favoriser les personnes ayant des besoins spéciaux, telles que les personnes handicapées ou à mobilité réduite, les familles avec enfants, les voyageurs transportant des bagages ou les non-conducteurs situés dans des zones dépendantes de l'automobile.

Les véhicules automatisés pourraient offrir une mobilité plus indépendante aux personnes souffrant de certains handicaps, tels que pour les malvoyants, et en raison de leurs coûts inférieurs, les taxis automatisés pourraient constituer une option abordable pour les non-conducteurs pour certains trajets.

Équité verticale en matière de revenus – abordabilité

Cette perspective suppose que les politiques publiques devraient favoriser les plus pauvres par rapport aux plus riches et augmenter les options de transport abordables, en particulier pour accéder aux services et activités essentiels (soins de santé, services de base, éducation, emploi, ...).

Au cours des deux ou trois prochaines décennies, la capacité de conduite automatisée devrait augmenter les coûts annuels de quelques milliers de dollars, à environ 10000 dollars par véhicule et par an, pour payer les abonnements matériels et logiciels supplémentaires, la maintenance et la cartographie. Les taxis automatisés coûteront probablement entre 0,50 \$ et 1,00 \$ par km, ce qui est moins cher que les taxis conventionnels mais plus cher qu'une voiture personnelle conventionnelle.

Cela suggère que les véhicules automatisés personnels ne seront pas abordables pour les ménages à faible revenu, et les politiques qui favorisent leur utilisation, telles que les voies réservées, seront régressives. Les services de taxi automatisés peuvent augmenter l'abordabilité par rapport à la possession d'un véhicule personnel pour les personnes qui parcourent relativement peu de kilomètres annuels. Le transport abordable est généralement défini comme coûtant moins de 15 % du budget de dépenses total d'un ménage, de sorte qu'un ménage de dépenses annuelles de 40000 \$ (deuxième quintile de revenu) peut se permettre de dépenser jusqu'à 6000 \$ par an en transport, ce qui ne peut payer qu'environ 5000 déplacements en taxi automatisé (équivalent à un km parcouru par trajet) par an et pour chacun des deux adultes d'un ménage.

Cela implique que la plupart des ménages à revenu faible ou moyen ne pourrait bénéficier que de véhicules automatisés dans le cadre d'un mode de vie multimodal ; les véhicules automatisés ne les aideront pas à payer un nombre important de kilomètres parcourus par an généralement nécessaires pour vivre dans un environnement interurbain à rural.

En résumé, les véhicules automatisés sont susceptibles de soutenir certains objectifs d'équité mais en contredisent d'autres. Les véhicules automatisés peuvent offrir une mobilité indépendante à certains groupes défavorisés, tels que les personnes ayant une déficience visuelle, et peuvent réduire les coûts d'exploitation des taxis et des transports en commun, ce qui augmente l'abordabilité pour les personnes qui parcourent moins de 5000 km par an environ. La mobilité particulière automatisée sera coûteuse, de sorte que les subventions pour leur utilisation auront tendance à être injustes et régressives.

Les véhicules automatisés pourraient réduire l'abordabilité et l'équité, et nuire globalement aux non-conducteurs, s'ils induisaient des déplacements et un étalement supplémentaire des véhicules, ce qui augmenterait les coûts externes (congestion, coûts d'infrastructure, risque d'accident et émissions de polluants imposées à d'autres personnes), ou s'ils augmentaient la dépendance à l'automobile et l'étalement urbain, qui réduirait les options de transport abordables.

Résumé des bénéfices et coûts

Le tableau ci-dessous compare les coûts et les avantages de divers types de véhicules.

	Véhicule conventionnel particulier	Véhicule automatisé particulier	Véhicule automatisé partagé	Véhicule automatisé pour le covoiturage
Coûts monétaires	Coûts fixes faibles (en particulier les véhicules d'occasion), variabilité modérée	Coûts fixes élevés, faible variabilité des coûts	Coûts fixes minimaux, variabilité des coûts modérée	Coûts fixes minimaux, faible variabilité des coûts
Commodité	Forte : un véhicule individuel est toujours disponible	Forte : les usagers ont leur propre véhicule avec les équipements choisis	Modérée : les véhicules mettront souvent quelques minutes à arriver, permet un trajet porte-à-porte	Modérée : le ramassage des passagers prendra souvent quelques minutes, ne permet pas de trajet porte-à-porte
Confort	Faible à modérée, dépendant des conditions de circulation	Fort : les utilisateurs ont leur propre véhicule avec des équipements choisis	Modéré : les véhicules partagés peuvent être détériorés et salis	Faible (la plus) : les utilisateurs partagent le véhicule avec des étrangers
Coûts externes (congestion, équipements, accidents et environnement)	Modérés à élevés	Elevés : susceptible d'augmenter les kilomètres parcourus	Modérés : pourrait augmenter les kilomètres parcourus dans certaines circonstances et les réduire dans d'autres	Faibles : pourrait réduire les kilomètres parcourus et les coûts associés
Équité sociale et impacts (inéquité)	Modérée à élevée : inéquitable	Modérée à élevée : faible équité	Modérée à faible : impacts mixtes	Faible (la plus) : meilleure équité
Usages les plus appropriés	Résidents à revenus modérés et faibles et résidents ruraux.	Résidents aisés et résidents ruraux	Utilisateurs urbains et interurbain	Utilisateurs urbains

Tableau 4 : Comparaison des coûts - Les types de véhicules varient en termes de coûts, de commodité et de confort, et donc leurs impacts varient sur les kilomètres parcourus

Fulton, Compostella et Kothawala (2020) effectuent une analyse similaire des facteurs monétaires et non monétaires qui affectent les décisions de déplacement, notamment le temps de trajet, le stress, la commodité, la fiabilité et les préférences concernant la conduite et le partage de véhicules.

Bien sûr, ces impacts dépendront des caractéristiques spécifiques du véhicule. Les véhicules plus gros et plus rapides ont tendance à être plus coûteux que les véhicules plus petits et à vitesse réduite, et les véhicules électriques ont pour l'instant des coûts d'exploitation inférieurs à ceux des véhicules à carburant fossile. Les coûts financiers sont susceptibles d'être beaucoup plus élevés au cours de la première ou des deux premières décennies de commercialisation des véhicules automatisés, et devraient diminuer à mesure où la technologie devient disponible dans des modèles moins chers, et éventuellement dans des véhicules d'occasion.

Le tableau 5 résume les avantages et les coûts des véhicules automatisés, classés selon qu'ils sont internes (affectent les utilisateurs) ou externes (affectent les autres usagers). Les impacts totaux dépendront de la façon dont ils affectent les déplacements : s'ils stimulent davantage la conduite, les coûts externes sont susceptibles d'augmenter, mais s'ils contribuent à réduire les déplacements, les coûts totaux devraient diminuer.

Tableau 5 : Potentiels avantages et inconvénients en termes de coûts de la mobilité automatisée

	Avantages	Coûts/inconvénients
Internes (impacts usagers)	<p>Réduction du stress du conducteur et augmentation de la productivité: les automobilistes peuvent se reposer, travailler pendant le trajet.</p> <p>Mobilité permise pour les non-conducteurs : une mobilité plus indépendante pour les non-conducteurs peut réduire la charge des automobilistes en termes de transport et les subventions des transports en commun.</p> <p>Réduire les frais des chauffeurs pour les compagnies (compagnies de taxis et services de transports).</p>	<p>Augmentation des coûts d'un véhicule : nécessite un équipement, des services et des frais supplémentaires pour le véhicule.</p> <p>Risques supplémentaires pour l'utilisateur : accidents supplémentaires causés par des défaillances du système, des pelotons, des vitesses de circulation plus élevées, une prise de risque supplémentaire et une augmentation du nombre total de déplacements en véhicule.</p> <p>Sécurité de données personnelles réduite : vulnérable aux attaques (cyber) et à des données sensibles telles que la localisation et le partage de données.</p>
Externes (impacts sur les autres usagers de la route)	<p>Sécurité renforcée : réduction du risque d'accidents et des coûts liés aux assurances, réduction de la conduite à haut risque.</p> <p>Augmentation de la capacité et réduction des coûts : gain en efficacité du trafic, réduction de la congestion et les coûts des infrastructures.</p> <p>Réduction des coûts de stationnement : réduction de la demande de stationnement.</p> <p>Réduction de la consommation d'énergie : augmentation de l'efficacité énergétique et réduction des émissions.</p> <p>Soutien la mobilité partagée : pourrait faciliter l'autopartage et le covoiturage, en réduisant la possession totale de véhicules et les déplacements (ainsi que les coûts associés).</p>	<p>Augmentation des coûts des infrastructures : peut nécessiter des niveaux de service plus élevés de l'infrastructure.</p> <p>Risques additionnels : augmentation du risque pour les autres usagers et utilisation malveillante possible.</p> <p>Augmentation de la congestion : augmentation des trajets effectués, de la pollution associée et contribue à l'étalement urbain, ce qui entraîne de nouveaux coûts.</p> <p>Problèmes d'équité sociale : réduction des options de mobilité abordables, y compris les mobilités douces et les services de transport en commun.</p> <p>Perte d'emplois : notamment des chauffeurs.</p> <p>Prise en charge limitée des autres solutions : les prédictions optimistes de la conduite automatisée peuvent décourager d'autres améliorations et stratégies de transports.</p>

Certains avantages, tels que la réduction du stress du conducteur et l'augmentation de la productivité, pourraient arriver avec l'automatisation de niveau 4 (capable de fonctionner de manière autonome dans certaines conditions, telles que des routes à chaussées séparées par temps clair), mais la plupart des avantages nécessitent une automatisation de niveau 5 (capable de fonctionner de manière autonome dans toutes les conditions), ce qui permet aux véhicules de transporter des non-conducteurs et de rouler à vide.

Impacts sur les déplacements

Un facteur clé dans cette analyse est la façon dont le fonctionnement automatisé affectera les déplacements (Circella et Hardman 2022 ; Miller et Kang 2019 ; Nunes et al. 2021). Le tableau suivant résume les potentielles répercussions.

Tableau 6 : Impacts potentiels de l'automatisation sur les déplacements – les véhicules automatisés pourraient affecter les véhicules kilomètres parcourus de plusieurs manières.

Augmentation des déplacements	Diminution des déplacements
Augmentation des véhicules kilomètres parcourus par les non-conducteurs. Voyage à vide des véhicules pour récupérer les passagers, livrer des marchandises et se rendre aux entrepôts pour la maintenance. La réduction des coûts d'exploitation (grâce à l'électrification) augmente les véhicules kilomètres parcourus. A long terme, encourage un développement plus tentaculaire et une réduction des services de transport public	Des services de véhicules partagés plus pratiques permettent aux ménages de réduire la possession de véhicules, ce qui tire parti de la réduction des déplacements. Les bus automatisés, et les services de desserte du dernier kilomètre, améliorent l'offre de transport en commun. La réduction du risque d'accidents et des emplacements de stationnement font de la ville un espace plus attractif.

Les véhicules automatisés peuvent augmenter les déplacements (véhicules kilomètres parcourus) des non-conducteurs. En augmentant le confort des passagers et la productivité, le fonctionnement automatisé peut rendre les trajets longue distance, y compris les trajets domicile/travail, plus supportables, ce qui augmenterait les déplacements et l'étalement urbain. Les véhicules électriques coûtent environ la moitié du prix de fonctionnement des véhicules à combustible fossile comparables. Parce qu'ils coûtent plus cher à posséder mais moins à conduire que les véhicules actuels, ils incitent encore plus les propriétaires de véhicules à maximiser leurs déplacements annuels en véhicule afin de tirer le meilleur parti de ces importants investissements fixes.

Cela est susceptible d'augmenter le nombre de véhicules kilomètres parcourus, en particulier pour les propriétaires de véhicules automatisés en interurbain et environnement rural (Nunes et al. 2021). Jiang, He et Ma (2022) estiment que les véhicules automatisés sont susceptibles d'augmenter le nombre total de déplacements en véhicule d'environ 10 %. Une étude a révélé que les conducteurs qui utilisaient la technologie de pilote automatique semi-autonome de Tesla parcouraient près de 5000 km par an de plus que ceux qui ne le faisaient pas, car le confort accru et la réduction du stress les rendaient plus disposés à s'asseoir dans la circulation et à faire plus de trajets longue distance (Circella et Hardman 2022). Une autre étude a révélé que les familles bénéficiant de services de chauffeur gratuits augmentaient leurs déplacements en véhicule de 80 %, avec une grande augmentation des déplacements sur de plus longues distances et à faible taux d'occupation (Harb, et al. 2018).

D'autre part, en offrant des services de transport en commun et de taxi plus efficaces et abordables, en améliorant les conditions de marche et de vélo et réduisant les besoins de stationnement, les véhicules automatisés partagés pourraient encourager le partage de véhicules et l'urbanisation. Par conséquent, les impacts totaux sur les déplacements dépendent de la proportion de ménages qui choisissent des emplacements urbains plutôt qu'interurbains ou ruraux, et de la proportion qui partage plutôt que de posséder des véhicules automatisés.

Les optimistes prédisent que les taxis autonomes et partagés remplaceront bientôt la plupart des véhicules particuliers (ITF 2014 ; Keeney 2017). Par exemple, Kok et al (2017) ont prédit que « d'ici 2030, dans les 10 ans suivant l'approbation réglementaire des véhicules entièrement automatisés, 95 % des voyageurs kilomètres parcourus américains seront desservis en *transport as a service* (TaaS), par

des opérateurs qui détiendront et exploiteront des flottes de véhicules électriques automatisés, prodiguant aux passagers des hauts niveaux de service, plus rapides et extrêmement sûrs à un prix jusqu'à 10 fois moins cher que les véhicules particuliers aujourd'hui.

Cependant, de nombreux voyageurs ont de bonnes raisons de posséder plutôt que de partager des véhicules :

- *Commodité.* Les automobilistes gardent souvent des objets dans leur véhicule, notamment des sièges d'auto, des outils, du matériel de sport et fournitures d'urgence.
- *Rapidité et fiabilité.* Dans des conditions optimales, les taxis et les VTC arrivent quelques minutes après avoir été appelés, mais peuvent prendre beaucoup plus de temps, en particulier en heures de pointe, pour les types de véhicules spéciaux (pour transporter plusieurs passagers ou un fauteuil roulant) et dans les zones interurbaines et rurales.
- *Coûts.* Le partage de véhicules est généralement rentable pour les automobilistes qui conduisent moins de 6000 km par an. Les personnes qui vivent dans les zones interurbaines et rurales, qui se déplacent généralement en voiture ou qui, pour d'autres raisons, parcourent des kilomètres annuels élevés choisiront probablement de posséder un véhicule individuel.
- *Statut.* Beaucoup de gens sont fiers de leur véhicule et de leur capacité de conduite, et préfèrent donc être propriétaires véhicules individuel.

Les trajets partagés ont des coûts inférieurs mais moins de commodité et de confort, car les trajets prennent plus de temps pour récupérer les passagers, ne peuvent généralement pas offrir de service porte-à-porte et les passagers doivent voyager dans des espaces confinés avec des étrangers. La répartition des véhicules ajoute des retards et de l'incertitude, en particulier dans les zones interurbaines et rurales où une prise en charge en taxi automatisé peut prendre 10 à 20 minutes. Le partage de véhicules génère des voyages à vide (déplacement de véhicule sans passager) par exemple, lors du chargement des passagers. Plus de 40 % des déplacements actuels en covoiturage se font en tête-à-tête (Heno et Marshall 2018). Si les services de partage deviennent courants dans une zone, le déplacement seul ou à deux pourrait diminuer mais ne peut pas disparaître, en particulier dans les zones interurbaines et rurales où les destinations sont dispersées.

Le tableau 7 compare les voyageurs et les trajets les plus adaptés aux différents véhicules.

Conduite humaine	Automatisation individuelle	Automatisation partagée
<p>Conducteurs à revenu faible à moyen, qui ont acheté des véhicules anciens ou d'occasion.</p> <p>Les automobilistes qui préfèrent conduire leur propre véhicule pour leur plaisir ou pour une meilleure sécurité perçue.</p> <p>Les utilisateurs qui placent une forte valeur dans la propriété.</p>	<p>Les utilisateurs qui placent une valeur forte au confort de conduite.</p> <p>Les automobilistes qui conduisent moins de 6000 km par an.</p> <p>Les automobilistes qui laissent souvent des équipements, des outils ou des accessoires spéciaux dans leur véhicule.</p>	<p>Les trajets actuellement réalisés en taxi ou en véhicules partagés.</p> <p>Les trajets utilitaires généralement réalisés avec un véhicule qui parcourt moins de 6000 km par an.</p> <p>Les résidents urbains.</p> <p>Les personnes qui veulent gagner plus d'argent que de temps.</p>

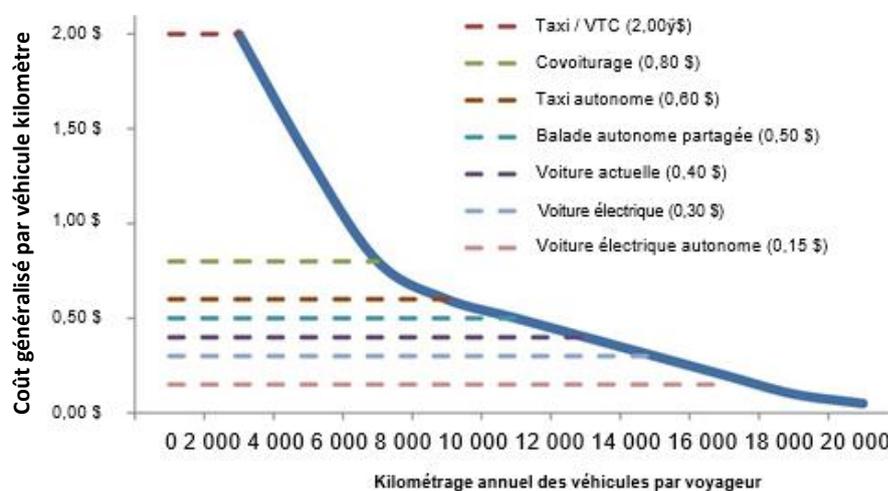
Tableau 7 : Trajets et utilisateurs les plus adaptés - Certains utilisateurs ont des profils qui correspondent plus à la mobilité individuelle et d'autres à la mobilité partagée.

Une façon de prédire les impacts des véhicules automatisés sur les déplacements consiste à examiner comment ils affectent les coûts généralisés, qui comprennent les dépenses d'exploitation des véhicules et les coûts de temps de trajet. À mesure que ces coûts diminuent, les gens ont tendance à voyager davantage. Le taxi et le covoiturage coûtent généralement environ 2,00 \$ par km, les voitures à essence actuelles environ 20 c\$ par km et les voitures électriques environ 5 c\$ par km, en ne tenant compte que des coûts d'exploitation à court terme du véhicule (carburant et usure des pneus). Les chauffeurs

évaluent généralement leur temps à 20 – 40 % proportionnellement à leur salaire, soit environ 20 c\$ par minute ; les véhicules automatisés réduiraient probablement les coûts de temps de déplacement d'environ la moitié, jusqu'à environ 10 c\$ par minute. Les véhicules partagés ajoutent des coûts de temps de trajet lorsque les passagers attendent les véhicules.

La figure 8 compare ces coûts sur une courbe de demande de déplacements, qui illustre comment les prix affectent les déplacements en véhicule. Les trajets en taxi et en covoiturage sont relativement coûteux, de sorte que les personnes qui dépendent de ces modes ont tendance à générer relativement peu de véhicules-kilomètres. L'autopartage, les taxis automatisés et les trajets automatisés sont moins chers que les taxis, mais plus chers et moins pratiques que les véhicules particuliers, ce qui entraîne des déplacements annuels modérés par les personnes qui en dépendent. Les propriétaires de voitures conventionnelles à combustible fossile parcourent généralement environ 10000 km par an, et les propriétaires de voitures électriques sont susceptibles de conduire un peu plus en raison de leurs faibles coûts de carburant. Les propriétaires de véhicules électriques automatisés sont susceptibles d'augmenter les déplacements en raison de leurs faibles coûts de carburant et de temps de déplacement.

Figure 7 : Courbe du coût généralisé (monétaire et temps) en fonction de la demande de déplacement



Alors que les coûts généralisés diminuent, les déplacements augmentent. Actuellement, les automobilistes conduisent en moyenne 10000 km par an. Les utilisateurs de taxis automatisés sont susceptibles de voyager moins en raison de coûts monétaires plus élevés et une commodité plus faible, les propriétaires de véhicules automatisés sont susceptibles de voyager plus en raison des coûts de circulation plus faibles et d'une commodité plus élevée.

Bien sûr, ces coûts et les réponses des consommateurs sont difficiles à prévoir et dépendront d'autres facteurs, notamment de la qualité des services de mobilité disponibles, des conditions d'aménagement du territoire et des préférences individuelles. Cependant, il est prudent de prédire que les personnes qui dépendent de véhicules automatisés partagés voyageront en moyenne moins, et ceux qui possèdent un véhicule automatisé électrique personnel voyageront plus qu'ils ne le feraient avec des véhicules conventionnels, à combustible fossile et non automatisés. Les politiques publiques peuvent influencer sur la quantité de déplacements générés par ces modes en affectant leurs coûts financiers et en temps de trajet, par exemple, par le biais de redevances sur le carburant et les usagers de la route, et de stratégies de gestion des routes qui rendent les véhicules partagés plus pratiques et plus rapides à utiliser.

Une enquête auprès de 1000 adultes américains a révélé que beaucoup ne s'attendent pas à ce que les véhicules automatisés affectent de manière significative leurs déplacements, mais ceux qui le déclarent sont beaucoup plus susceptibles de prédire une augmentation de leurs déplacements qu'une diminution (Fleming et Singer 2019). Sivak et Schoettle (2015b) estiment que répondre aux demandes de déplacement latentes des non-conducteurs pourrait augmenter le nombre total de déplacements en véhicule jusqu'à 11 %. Trommer et al. (2016) prédisent que les véhicules automatisés augmenteront le nombre total de déplacements de 3 à 9 %. Taiebat, Stolper et Xu (2019) prédisent que les véhicules automatisés augmenteront les déplacements moyens des ménages de 2 à 47 %, les augmentations les plus importantes étant enregistrées pour les groupes à revenu élevé.

Le tableau ci-dessous résume les impacts des déplacements.

Type de trajet	Impacts des véhicules automatisés	Part des trajets
Camions de marchandises	Particulièrement adapté pour les trajets de longue distance de fret et logistique, en raison des coûts de mains d'œuvre élevés et des environnements restreints, la plupart du temps sur route à chaussées séparées.	10%
Petites livraisons et entreprises	Le corps de métier portant des équipements (plombiers, technicien informatique) dans leur véhicule, sont susceptibles de détenir leur propre véhicule automatisé. Les compagnies de livraison pourraient utiliser des véhicules automatisés pour réduire les coûts. Cela pourrait augmenter le nombre de déplacements en voiture.	5 %
Transports publics	Particulièrement adapté pour les transports en commun, en raison des coûts de personnels élevés. Facilite les petites dessertes par des services fréquents et à la demande.	Actuellement 2 % mais pourrait augmenter
Trajets personnels de longue distance (> 50 km)	Particulièrement adapté pour les trajets personnels de longue distance, en raison de l'ennui. Pourrait augmenter le nombre de trajets longue distance.	Actuellement 20 % mais pourrait augmenter
Trajets interurbains et ruraux	Les résidents aisés des zones interurbaines et rurales sont susceptibles d'acheter des véhicules particuliers automatisés et d'augmenter les trajets réalisés en voiture. Les résidents ayant des plus faibles revenus sont susceptibles de continuer à conduire leur véhicule conventionnel particulier ou d'utiliser la mobilité automatisée partagée, ce qui pourrait réduire le nombre de déplacements effectués.	50 %
Trajets urbains	De nombreux utilisateurs sont susceptibles de passer de la voiture individuelle aux services de mobilité automatisée, ce qui est susceptible de faire diminuer le nombre de déplacements en voiture.	20 %
Non-conducteur	Les non-conducteurs sont susceptibles d'augmenter leur trajets en véhicule.	2 à 4 % mais en augmentation

Tableau 8 : Impacts des véhicules automatisés sur la demande de transport

Les scénarios suivants illustrent l'impact des véhicules automatisés sur les déplacements des différents utilisateurs :

Jake est riche et malvoyant. Il achète un véhicule automatisé dès qu'il est disponible. *Impacts* : les véhicules automatisés permettent à Jake de conserver une mobilité indépendante, ce qui augmente ses déplacements en véhicule.

Bonnie vit et travaille en banlieue. Elle peut se rendre à la plupart de ses destinations à vélo, mais possède une voiture pour des déplacements occasionnels. Lorsque les services de taxi automatisés deviennent disponibles, elle renonce à son véhicule personnel. *Impacts* : les véhicules automatisés permettent à Bonnie d'éviter d'être propriétaire d'un véhicule et de réduire ses déplacements en véhicule.

Melisa et Johnny recherchent pour une nouvelle maison. Les véhicules automatisés leur permettent d'envisager des maisons plus éloignées car Melisa peut se reposer et travailler tout en se déplaçant. *Impacts* : les véhicules automatisés permettent à Melisa et Johnny de choisir une maison en milieu interurbain, ce qui a augmenté leurs déplacements en véhicule.

Garry est un conducteur responsable lorsqu'il est sobre mais dangereux lorsqu'il est ivre. Des véhicules automatisés abordables lui permettent d'éviter ce risque. *Impacts* : des véhicules automatisés d'occasion abordables permettent à Garry d'éviter la conduite sous l'emprise d'alcool, ce qui réduit les risques d'accident, mais augmente la propriété de son véhicule et ses déplacements.

Le tableau 9 résume les impacts de ces différents scénarios. Dans la plupart de ces scénarios, les véhicules automatisés augmentent les déplacements en véhicules.

	Bénéfices pour les usagers	Impacts sur les déplacements	Coûts externes
Jake (aisé et malvoyant)	Mobilité indépendante pour les non-conducteurs	Augmentation du nombre de trajets effectués en véhicules et les coûts externes	Augmentation des coûts de stationnement et d'infrastructure
Bonnie (voyageuse multimodal)	Gain du coût du véhicule	Réduction de la propriété individuelle et des déplacements	Réduction des coûts de stationnement et d'infrastructure
Melisa and Johnny (famille en milieu interurbain)	De meilleures options de localisation d'habitation	Augmentation de la propriété individuelle et des déplacements effectués en véhicule	Augmentation des coûts de stationnement et d'infrastructure
Garry (conducteur à haut risque)	Evite la conduite en état d'ivresse et les risques associés	Moins de risque pour la sécurité, plus de déplacements effectués	Augmentation des coûts de stationnement et d'infrastructure

Tableau 9 : Résumé des scénarios présentés - La disponibilité des véhicules automatisés peut avoir des effets directs et indirects.

Cela suggère qu'avec les politiques actuelles, les véhicules automatisés sont susceptibles d'augmenter le nombre total de déplacements en véhicule de 10 à 30 %, voire davantage, ce qui augmenterait la congestion et les coûts d'infrastructure routière, ainsi que les risques d'accident et les émissions de polluants, selon le type de déplacements qui augmenteraient. Les politiques publiques affecteront ces impacts (Miller et Kang 2019). Si les politiques rendaient les véhicules automatisés particuliers abordables et attrayants, par exemple, parce que les véhicules électriques payaient des redevances minimales d'utilisation de l'infrastructure et que les véhicules automatisés avaient des voies réservées, le nombre total de déplacements en véhicule serait susceptible d'augmenter. S'ils se voyaient facturer des redevances d'efficacité de l'utilisation de l'infrastructure et que les routes avaient des voies réservées aux véhicules à forte occupation, les trajets partagés deviendraient plus attrayants, réduisant le nombre de déplacements en véhicule.

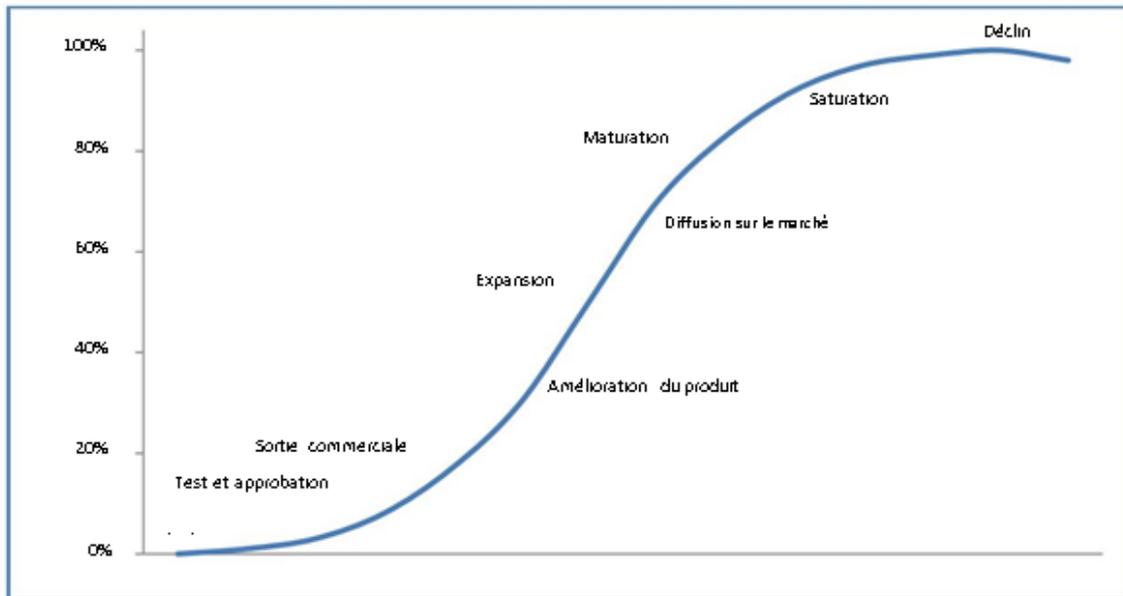
Ces déplacements supplémentaires en véhicule tendent à procurer de petits avantages marginaux, puisqu'il s'agit de déplacements auxquels les usagers renoncent le plus volontiers si leurs coûts augmentent. Pour évaluer ces avantages, les économistes utilisent la règle de la moitié, qui stipule que les avantages des déplacements supplémentaires valent la moitié de l'économie totale par trajet (Litman 2021, « Evaluating Transportation Benefits » ; Banque mondiale 2005). Par exemple, si une réduction de coût de 10 ¢\$ par km a amené un automobiliste à parcourir 1000 véhicules-km supplémentaires, l'avantage net peut être évalué à 50 \$, calculé à $(10 \times 1000) / 2 = 50$ \$. Étant donné que les déplacements en véhicule imposeraient des coûts externes importants, notamment augmenteraient la congestion, les coûts d'infrastructure et éventuellement les accidents et les émissions de polluants, une grande partie des déplacements supplémentaires serait susceptible d'être économiquement inefficace ; les avantages supplémentaires seraient inférieurs aux coûts supplémentaires.

Prédictions de développement et de déploiement

Les nouvelles technologies suivent généralement un modèle de développement en courbe en S, comme l'illustre la figure 8.

Un concept initial connaît généralement le développement, les tests, l'approbation, la commercialisation, l'amélioration du produit, l'expansion du marché, la différenciation, la maturation et finalement la saturation et le déclin. La technologie des véhicules automatisés suivra probablement ce modèle.

Figure 4 : Courbe en S des innovations - La plupart des innovations suivent un modèle de déploiement prévisible, souvent appelé la courbe en S des innovations.



En 2015, l'expert sur les véhicules automatisés Chris Urmson a prédit que son fils n'aurait jamais besoin d'un permis de conduire parce que la conduite automatisée serait omniprésente au moment où il atteindrait l'âge de conduire en 2019, mais lorsque cette année arrivera, il prédit un modèle plus modeste, « *hundreds or maybe thousands of self-driving vehicles on the road within five years* » (The Economist 2019).

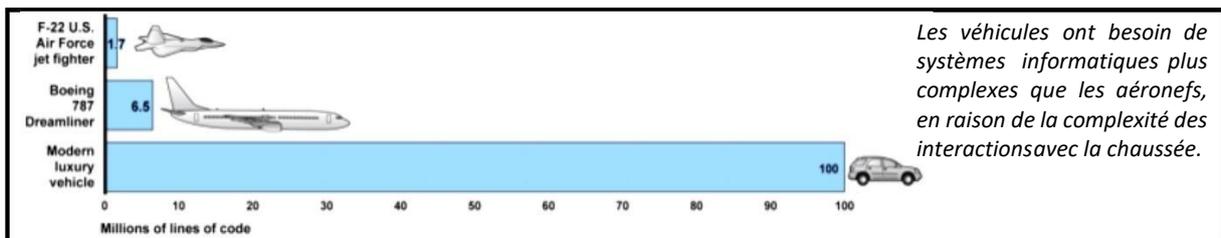
Les véhicules automatisés sont actuellement en phase de développement et de test ; ils se classent à 6 sur l'échelle à 10 niveaux de maturité technologique (*Technology Readiness Level*) (McLeod 2021). Ils auront besoin de beaucoup plus d'améliorations techniques, de tests en conditions réelles, d'approbations réglementaires et de développement commercial pour devenir fiables, largement disponibles et abordables, et donc courants dans le parc de véhicules. Étant donné que les véhicules peuvent imposer des coûts externes importants, notamment des risques de congestion et d'accident, ils sont soumis à des normes de test et de réglementation plus élevées que la plupart des autres technologies telles que les ordinateurs personnels et les téléphones portables.

De nombreux véhicules actuels sont équipés de technologies de niveaux 2 et 3 telles que le régulateur de vitesse, les avertissements de danger et le valet de parking automatisé. Plusieurs entreprises testent des véhicules de niveau 4 en conditions limitées (CPUC 2020). Bien que certains véhicules puissent désormais atteindre jusqu'à 95 % d'opérabilité (les véhicules peuvent atteindre 95 % de la destination souhaitée), il est de plus en plus difficile d'atteindre des taux plus élevés (Leonard, Mindell et Stayton 2020 ; Wharton 2017). Le pilote automatique de Tesla offre un fonctionnement automatisé dans des conditions limitées, mais son bilan de sécurité est critiqué par les experts (Dawn Project 2022) et son déploiement a été ralenti après avoir causé des accidents mortels (Hawkins 2017). Des progrès techniques importants seront nécessaires avant que les véhicules puissent fonctionner de manière autonome dans toutes les conditions de circulation, y compris les fortes pluies et la neige, et sur des

routes non cartographiées ou non goudronnées (Simonite 2016).

La conduite d'un véhicule sur la voie publique est complexe en raison de la fréquence des interactions avec des objets souvent imprévisibles, notamment les nids-de-poule, les véhicules, les piétons, les cyclistes et les animaux. En conséquence, les véhicules automatisés nécessitent des logiciels beaucoup plus complexes que les aéronefs (figure 9). La production d'un tel logiciel est difficile et coûteuse, et il est certain qu'il comporte des erreurs. Il y aura presque certainement des défaillances du système, certaines causant de graves accidents.

Figure 5 : Comparaison des codes des logiciels de véhicules automatisés et de l'aéronautique



On considère un défi. Pour des raisons de sécurité, il est conseillé aux automobilistes de conduire prudemment, ce qui signifie anticiper les risques potentiels, tels que les animaux sauvages et les enfants joueurs. Pour ce faire, les véhicules automatisés auront besoin d'une base de données qui catégorise, par exemple, les bouches d'incendie comme à faible risque, les animaux domestiques en laisse comme à risque moyen et les animaux sauvages, comme les kangourous, comme à haut risque. De plus, les enfants s'habillent parfois de costumes d'animaux et les adolescents de variantes de zombies. La plupart des conducteurs peuvent comprendre ces risques. Si on met en garde, « Méfiez-vous des adolescents vêtus de costumes de kangourou zombie », vous pourriez probablement comprendre la menace puisque vous aussi étiez autrefois un jeune joueur, mais un ordinateur serait déconcerté : une situation aussi inhabituelle a peu de chances d'être dans sa base de données, donc le véhicule aurait soit mal catégorisé le risque, peut-être traiter les amateurs de divertissement costumés comme des victimes blessées d'un accident ou une foule émeute, soit se serait arrêté et aurait attendu les instructions humaines. Ces systèmes peuvent apprendre par eux-mêmes, et pourraient donc comprendre ces comportements et costumes s'ils deviennent courants, mais ne peuvent pas anticiper de nouvelles conditions, et chaque nouvel ensemble d'instructions augmentera encore la complexité du système et donc les risques et retards potentiels.

Il est possible que ce développement, ces tests et cette approbation supplémentaires ne nécessitent que quelques années, mais si la technologie s'avère peu fiable et dangereuse, par exemple, si les véhicules automatisés continuent de provoquer des accidents très médiatisés, cela pourrait prendre plus de temps (Bhuiyan 2017). Il est probable que différentes juridictions imposeront des exigences différentes en matière d'essais, d'approbation et d'exploitation, ce qui entraînera des taux de déploiement variables.

Outre les progrès technologiques, le déploiement du marché dépend de la demande des consommateurs : la volonté de payer des utilisateurs pour une mobilité autonome. Les enquêtes indiquent des préoccupations importantes des consommateurs (Schoettle et Sivak 2014). Les usagers seront confrontés à l'anxiété d'accès si leur véhicule ne peut pas atteindre toutes les destinations souhaitées (Grush 2017).

Bien que les optimistes prédisent que la plupart des véhicules fonctionneront de manière autonome d'ici 2030 (Johnston et Walker 2017 ; Keeney 2017 ; Kok et al. 2017), la plupart d'entre eux ont des intérêts financiers dans les industries des véhicules automatisés et fondent leurs prévisions sur l'expérience des technologies électroniques telles que les appareils photo numériques, les smartphones et les ordinateurs personnels plutôt que les innovations en matière de véhicules à moteur. Par exemple, le rapport largement cité « Rethinking Transportation 2020-2030 » a été écrit

par ReThink, « un groupe de réflexion indépendant qui analyse et prévoit la vitesse et l'ampleur des perturbations technologiques et leurs implications dans la société ». *Mobility As-A-Service: Why Self-Driving Cars Could Change Everything*, a été publié par ARK Investment Management et rédigé par un analyste qui n'a apparemment que peu d'expérience en matière d'innovation dans les transports. *Automotive Revolution - Perspective Towards 2030: How the Convergence of Disruptive Technology-Driven Trends Could Transform the Auto Industry*, a été publié par la société de gestion d'entreprise McKinsey. Bien que leurs prédictions soient souvent nuancées – les véhicules automatisés pourraient (en anglais « *could* » et « *might* ») tout changer – leurs conclusions sont souvent présentées avec une certitude injustifiée.

Ces rapports sont principalement orientés vers les investisseurs et se concentrent donc sur les potentiels de vente des véhicules automatisés, mais la plupart des décisions politiques et de planification dépendent de la part de véhicules automatisés dans la flotte et du nombre total de déplacements. La plupart des nouvelles technologies de véhicules sont initialement disponibles en option sur des modèles plus chers et les automobilistes achètent rarement de nouveaux véhicules simplement pour obtenir une nouvelle technologie, de sorte que les innovations mettent généralement des décennies à pénétrer pleinement les flottes. Les optimistes affirment que les avantages seront suffisamment importants pour justifier la suppression prématurée de véhicules dépourvus de capacité de conduite autonome, mais cela semble peu probable dans des hypothèses réalistes de leurs avantages et de leurs coûts.

La plupart des experts objectifs prédisent que l'automatisation de niveau 5 nécessitera de nombreuses années supplémentaires pour le développement et les tests (Mervis 2017). Par exemple, le directeur du Michigan Mobility Transformation Center, Huei Peng, a déclaré que « *it may be decades before a vehicle can drive itself safely at any speed on any road in any weather* » (Truett 2016). De même, le PDG du Toyota Research Institute, Gill Pratt, a déclaré que la conduite autonome « *is a wonderful goal but none of us in the automobile or IT industries are close to achieving true Level 5 autonomy* » (Ackerman 2017). La directrice du laboratoire de véhicules autonomes d'Uber, Raquel Urtasun, a déclaré : « *Having self-driving cars at a smaller scale, on a small set of roads, we are fairly close... Nobody has a solution to self-driving cars that is reliable and safe enough to work everywhere* » (Marowits 2017). L'expert en intelligence artificielle Yoshua Bengio a déclaré : « *I think people underestimate how much basic science still needs to be done before these cars or such systems will be able to anticipate the kinds of unusual, dangerous situations that can happen on the road* » (Marowits 2017).

La section suivante utilise l'expérience des technologies de véhicules précédentes pour fournir des prévisions réalistes du développement et du déploiement des véhicules automatisés.

Expérience à partir du déploiement des technologies passées

Les technologies précédentes des véhicules peuvent aider à prévoir le déploiement des véhicules automatisés.

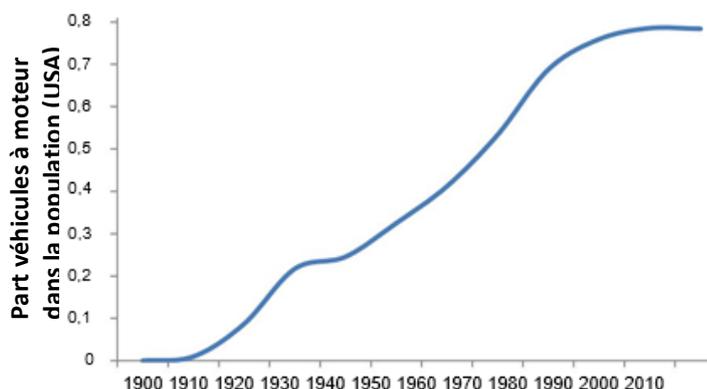


Figure 6 : Propriété automobile en fonction de la population aux États-Unis depuis 1900 (FHWA 2016) – Bien que la production de masse de l'automobile a commencé en 1908 avec la Ford Model T, cela a pris des décennies pour devenir le moyen de transport principal. Ce n'est qu'à partir de 1960 que les ménages ont commencé à posséder une voiture et ce n'est qu'après 1980 que le marché a commencé à arriver à saturation.

La production automobile de masse a commencé en 1908 avec la Ford Model T. Dans les années 1920, les villes connaissaient de la congestion et des parkings saturés, et dans les années 1930, les véhicules étaient plus nombreux dans les ménages, mais le système de transport est resté mixte, la plupart des gens dépendant de la marche, du vélo et des transports en commun en plus de leur voiture. Ce n'est qu'après les années 1960 que la plupart des adultes ont eu un véhicule particulier, et ce n'est qu'après les années 1980 que le marché n'a été saturé.

Ci-dessous d'autres exemples de développement et de déploiement de technologies de véhicules :

- *Transmissions automatiques* (Healey 2012). Développées pour la première fois dans les années 1930, il a fallu attendre les années 1980 pour qu'elles deviennent fiables et abordables. Lorsqu'elles sont facultatives, elles coûtent généralement entre 1000 \$ et 2000 \$ supplémentaires. Elles sont incluses dans 90 % des véhicules neufs en Amérique du Nord, et 50 % en Europe et en Asie.
- *Airbag* (Dirksen 1997). Introduit pour la première fois en 1973. Au départ, un produit coûteux et parfois option dangereuse (ils ont causé des blessures et des décès), mais sont devenus moins chers et plus sûrs, ont été standardisés sur certains modèles à partir de 1988, et mandaté par la réglementation fédérale américaine en 1998.
- *Véhicules hybrides* (Berman 2011). Ceux-ci sont devenus disponibles dans le commerce en 1997 mais étaient initialement peu fiables et coûteux. Leurs performances se sont améliorées, mais ils augmentent généralement le prix des véhicules d'environ 5000 \$. Entre 2010 et 2020, ils représentaient 2 à 3 % des ventes de véhicules.
- *Verrouillage e/ déverrouillage à distance, diagnostics, freinage d'urgence et services de navigation*. OnStar est devenu disponible en 1997, TomTom en 2002. Ces services coûtent généralement entre 150 et 750 dollars par an.
- *Systèmes de navigation des véhicules* (Lendino 2012). Les systèmes de navigation pour véhicules sont devenus disponibles en tant qu'accessoires coûteux au milieu des années 1980. Au milieu des années 1990, les systèmes installés en usine sont devenus disponibles sur certains modèles pour environ 2000 \$. Les performances et l'usage se sont améliorés depuis, et les prix ont baissé à environ 500 \$ pour les systèmes installés en usine et à moins de 200 \$ pour les systèmes portables. Ils sont standard dans de nombreux modèles plus chers. Les applications de navigation automobile, telles que Google Maps et Waze, sont disponibles gratuitement ou moyennant des frais modiques.
- *Véhicules électriques* (Wikipédia « Histoire des véhicules électriques »). Les voitures électriques à batterie se sont développées à la fin des années 1800, mais étaient rares pendant la majeure partie du XXe siècle. Dans les années 1990, les principaux fabricants ont produit des modèles améliorés, tels que l'EV1 de General Motors, et d'ici 2020, de nombreuses entreprises vendaient des voitures électriques de haute qualité. Malgré ces progrès, seulement 1 % environ des ventes totales de véhicules sont électriques et les modèles performants sont chers.

Tableau 10 : Résumé du déploiement des technologies de véhicules

Technologie	Cycle de déploiement	Coût d'obtention	Part de marché (saturé)
Transmissions automatiques	50 ans (1940-1990)	1500 \$	90 % aux USA, 50 % dans le monde
Airbag	25 ans (1973-1998)	Quelques centaines de dollars	100 % en raison du mandat fédéral
Véhicules hybrides	+25 ans (1990-2015)	5000 \$	Incertain. Actuellement autour de 4 %
Services et équipements	15 ans	400 \$ par an	5 à 10 %
Systèmes de navigation	+30 ans (1985-2015+)	500 \$ et décroît rapidement	Incertain, probablement plus de 8 %
Véhicules électriques	+100 ans	10000 \$ (haute qualité)	Probablement + 80 %

Étant donné que les technologies de véhicules automatisés sont plus complexes et coûteuses que ces technologies, leur acceptation et leur intégration sur le marché prendront probablement plus de temps (Lavasani et Jin 2016). Les nouveaux véhicules deviennent plus durables, ce qui réduit la rotation de la flotte. En conséquence, les nouvelles technologies automobiles nécessitent normalement trois à cinq décennies pour pénétrer 90 % des flottes de véhicules. Le déploiement peut être plus rapide dans les pays en développement où les flottes sont en expansion et dans les zones où les exigences d'inspection des véhicules sont strictes, comme le système du Japon. Le kilométrage annuel a tendance à diminuer avec l'âge du véhicule : les véhicules parcourent en moyenne environ 15000 km la première année, 10000 km la 10^{ème} année et 5000 km la 15^{ème} année, de sorte que les véhicules de plus de dix ans représentent environ 50 % des flottes de véhicules mais seulement 20 % du kilométrage (ORNL 2012, tableau 3.8).

Prédictions de déploiement

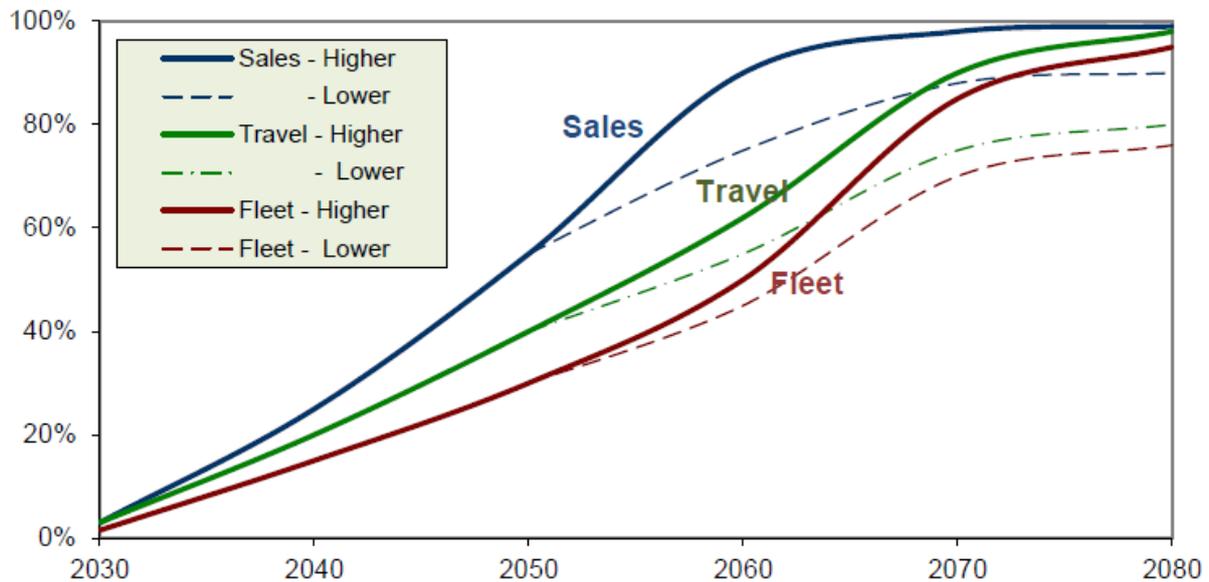
Le tableau 11 utilise l'analyse précédente pour prédire les ventes, la flotte et le taux de pénétration des véhicules automatisés, en supposant que les véhicules de niveau 5 deviennent disponibles dans le commerce à la fin 2020 mais sont initialement chers et ont des performances limitées. Au cours de leur première décennie, seule une minorité de nouveaux véhicules sont susceptibles d'être entièrement automatisés, les parts de marché augmentant à mesure que leurs performances s'améliorent, que les prix baissent et que les consommateurs gagnent en confiance. D'ici 2045, jusqu'à la moitié des ventes de véhicules neufs pourraient être automatisés, mais sans obligation, la saturation du marché prendra probablement plusieurs décennies, et certains automobilistes continueront peut-être à choisir des véhicules à conduite humaine en raison des coûts et des préférences. Ces résultats sont à peu près cohérents avec les estimations d'autres chercheurs (Grush 2016 ; Lavasani et Jin 2016 ; Simonite 2016), bien qu'ils soient plus lents que les prévisions optimistes de certains experts de l'industrie (Kok et al. 2017; McKinsey 2016).

Étape	Décennie	Nouvelle part	Flotte	Trajet
Développement et test	2020	0 %	0 %	0 %
Disponible à prix élevés	2030	2-5 %	1-2 %	1-4 %
Disponible à prix modéré	2040	20-40 %	10-20 %	10-30 %
Disponible à prix faible	2050	40-60 %	20-40 %	30-50 %
Équipements standards inclus dans la plupart des véhicules	2060	80-100 %	40-60 %	50-80 %
Saturation (tout le monde le voudra)	2070	?	?	?
Requis pour tous les véhicules nouveaux et en circulation	?	100 %	100 %	100 %

Tableau 11 : Projections de la pénétration des véhicules automatisés sur le marché

La figure 11 illustre ces taux de déploiement, y compris les estimations supérieures et inférieures.

Figure 7 : Prédiction de vente de véhicules automatisés, flotte et déplacements (à partir du tableau 9) – si les véhicules automatisés suivent le développement des technologies précédentes, cela prendra trois décennies pour qu'ils soient majoritaires sur le marché des ventes, et une ou deux décades de plus pour qu'ils dominent les déplacements effectués, et même lorsque le marché arrivera à saturation, une portion des déplacements continuera certainement à être réalisés à bord de véhicules conventionnels, ce qui est représenté en lignes pointillées



En raison de leurs coûts de main-d'œuvre élevés et de leurs conditions de déplacement prévisibles, les véhicules utilitaires (camions de fret et bus long-courriers et services de taxi locaux) sont susceptibles de s'automatiser en premier. Cependant, les chauffeurs commerciaux fournissent des services tels que l'assistance et la sécurité des passagers, le déchargement, la surveillance et l'entretien, de sorte que certains emplois d'opérateurs de véhicules changeront mais ne disparaîtront pas.

Une mise en œuvre beaucoup plus rapide nécessiterait un développement, un déploiement et une rotation de la flotte plus rapides que le modèle observé pour les technologies de véhicules précédentes. Par exemple, pour que la plupart des déplacements en véhicule soient automatisés d'ici 2045, presque tous les véhicules produits après 2035 devraient être automatisés, les taux d'achat de nouveaux véhicules et les dépenses devraient augmenter de manière significative afin que le roulement de la flotte qui prend normalement trois décennies puisse se produire en une seule, et de nombreux véhicules autrement fonctionnels seraient mis au rebut simplement parce qu'ils n'ont pas de capacité de conduite automatisée.

Les services de mobilité partagée, tels que l'autopartage et le covoiturage, réduisent déjà la possession de véhicules et la demande de stationnement dans certaines situations (DeLuca 2018). Les véhicules automatisés pourraient accélérer ces tendances, mais comme décrit précédemment, en dehors des zones urbaines denses, ils sont peu pratiques et inefficaces, et il est donc peu probable qu'ils remplacent la majorité des déplacements en véhicule privé dans les zones interurbaines et rurales où vivent actuellement la plupart des Américains.

Les facteurs suivants affectent la vitesse de déploiement des véhicules automatisés :

- **La rapidité du développement technologique.** Des technologies de niveau 4 (véhicules capables de fonctionner de manière automatisée dans des conditions limitées) sont actuellement disponibles, mais d'importants progrès technologiques sont nécessaires avant que les véhicules puissent fonctionner de manière autonome dans tous les environnements. Un fonctionnement fiable de niveau 5 pourrait être disponible dans cinq ans ou nécessiter encore 25 ans.
- **Essais et approbation réglementaire.** Les normes d'essai et d'approbation sont actuellement en

cours de développement, mais plusieurs années supplémentaires pourraient être nécessaires pour que ces normes soient adoptées dans la plupart des juridictions, et un délai supplémentaire sera nécessaire pour les tests à grande échelle.

- **Coûts différentiels.** Les véhicules automatisés nécessitent des équipements et des services supplémentaires qui augmentent les coûts. Dans un avenir prévisible (une à trois décennies), le fonctionnement automatisé ne sera disponible que dans de nouveaux véhicules relativement coûteux, ce qui ajoutera des milliers de dollars de dépenses annuelles par rapport aux véhicules conventionnels. Des coûts différentiels élevés réduiront la proportion de nouveaux véhicules dotés de cette technologie, ce qui réduira la vitesse de pénétration de la flotte.
- **Préférences des consommateurs en matière de voyage et de logement et pratiques de développement.** Actuellement, la plupart des ménages nord-américains vivent dans des communautés dépendantes de l'automobile et possèdent des véhicules privés. Le partage de véhicules automatisés est plus approprié pour les ménages qui vivent dans des communautés plus multimodales où ils parcourent moins de 6000 km annuels environ en automobile. Par conséquent, les déplacements en véhicules automatisés partagés deviendront plus courants si de nombreux ménages sont en mesure de se déplacer dans des communautés multimodales. L'acceptation par les consommateurs pourrait être réduite par des craintes pour la sécurité, des préoccupations en matière de confidentialité ou des préférences, ce qui fait qu'une partie importante des déplacements en véhicule reste effectuée en véhicules conventionnels même après la saturation du marché.
- **Qualité du service et prix abordables.** Si les taxis autonomes sont pratiques, confortables et abordables, de nombreuses personnes pourraient passer de la possession au partage de véhicules. Cependant, s'ils sont peu fiables, inconfortables ou coûteux, davantage de ménages continueront à posséder des véhicules.
- **Politiques publiques.** La mise en œuvre pourrait être accélérée si les politiques publiques encourageaient le développement et l'achat de véhicules, si la tarification des routes et du stationnement et la gestion des chaussées favorisaient les véhicules partagés, si les voies d'autoroute étaient dédiées à la conduite en peloton, si les politiques de développement permettaient un développement plus intercalaire, si un fonctionnement automatisé était requis pour les nouveaux véhicules ou si les gouvernements soutenaient la mise au rebut une grande partie des véhicules autrement fonctionnels car ils manquent de capacité de conduite automatisés.

Impacts sur la planification

Les véhicules automatisés posent divers problèmes de planification (Taeihagh et Lim 2018).

Conception de la chaussée

Les véhicules automatisés pourraient nécessiter de nouvelles caractéristiques de conception de la chaussée telles que des marquages de voie améliorés, des panneaux conçus pour être lus électroniquement et des répéteurs sans fil dans les tunnels pour fournir un accès Internet. La conduite automatisée pourrait permettre des voies de circulation plus étroites, mais pour accueillir les camions et les bus, des réductions importantes ne sont possibles que sur des voies spéciales limitées à la circulation automobile. À mesure que les véhicules automatisés se répandraient, les gouvernements seraient invités à dédier des voies d'autoroute à leur utilisation, pour permettre la conduite en pelotons. De même, les véhicules automatisés pourraient éliminer le besoin de feux de circulation, mais cela ne serait faisable que dans les zones où tout le trafic de véhicules ne serait automatisé. Pour encourager le passage des déplacements des véhicules à faible taux d'occupation aux véhicules à taux d'occupation élevé dans les corridors encombrés, les gouvernements pourraient devoir établir davantage de voies prioritaires pour les voies à haut taux d'occupation.

Tarifcation du transport

Comme décrit précédemment, avec les politiques actuelles, les véhicules électriques automatisés seraient susceptibles d'augmenter les déplacements et les problèmes de circulation, généralement de 10 à 30 %, en réduisant le temps de trajet et les coûts d'exploitation des véhicules, en stimulant l'étalement urbain et en augmentant les déplacements à vide. De plus, les véhicules électriques ne paient actuellement aucun droit d'utilisation de la route, ce qui est injuste. Pour résoudre ces problèmes, les gouvernements devront imposer de nouvelles redevances, qui pourraient inclure une combinaison de redevances d'utilisation de la route de 4 à 8 c\$ par véhicule-km, plus une tarification de décongestion de 5 à 30 c\$ par véhicule-km en cas de congestion (Simoni, et al. 2019).

Gestion des trottoirs

Pour faciliter le partage de véhicules, les villes devront gérer les bordures de trottoir afin de faciliter le chargement et le déchargement des passagers (Marsden, Docherty et Dowling 2020 ; OCDE/ITF 2018). Cela implique de dégager des zones d'embarquement des passagers, ou de gérer le stationnement sur rue pour augmenter le chiffre d'affaires afin qu'au moins une place inoccupée soit généralement disponible à proximité de chaque destination.

Planification du stationnement

Les véhicules automatisés pourraient affecter les futures demandes de stationnement de plusieurs façons (Chai, et al. 2020 ; González-González, Nogués et Stead 2020 ; Marsden, Docherty et Dowling 2020 ; Zhang et Kaidi Wang 2020). Les véhicules automatisés électriques nécessiteront des parkings spéciaux avec des bornes de recharge électriques et des services de nettoyage et d'entretien des véhicules. Les optimistes prédisent que les véhicules automatisés réduiront considérablement les demandes et les coûts de stationnement. Le passage des véhicules privés aux véhicules partagés pourrait réduire la possession totale de véhicules et les besoins de stationnement, et les propriétaires de véhicules individuels pourraient programmer leurs voitures pour qu'elles rentrent chez elles après avoir déposé des passagers, bien que cela augmenterait la congestion et ajouterait des retards et de l'incertitude quant au moment où les passagers pourraient être récupérés. La plupart des voyageurs voudront probablement que leurs véhicules soient disponibles en quelques minutes, ce qui nécessitera un stationnement à moins d'un km ou deux de leur destination. Cela pourrait permettre plus de stationnement hors site et des parkings partagés, réduisant mais pas éliminant les demandes de stationnement urbain.

Besoins en transport en commun

Les véhicules automatisés pourraient affecter les demandes de transport en commun de plusieurs façons.

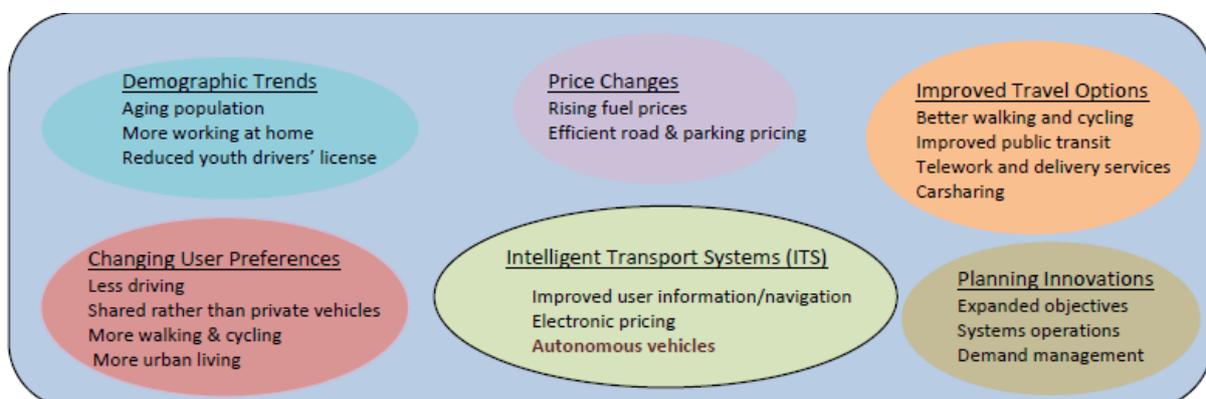
- Etant donné que la main-d'œuvre représente la majorité des coûts d'exploitation du transport en commun, les technologies automatisées pourraient réduire considérablement les coûts des services de transport en commun. Avec un budget donné, les agences de transport en commun pourraient offrir un service plus fréquent en utilisant des véhicules plus petits et, dans certaines situations, avoir des itinéraires flexibles qui amèneraient les passagers plus près de leurs destinations (transport adapté).
- Des services de taxi moins chers pourraient offrir une mobilité pratique aux non-conducteurs, que ce soit de porte à porte ou en tant que desserte des arrêts de bus et des gares. Cela devrait être particulièrement efficace dans les zones suburbaines et rurales où le transport en commun conventionnel est inefficace.
- Ils pourraient réduire la demande de transport en commun conventionnelle, ce qui réduirait les revenus, la rentabilité et le soutien politique, ce qui se traduirait par une qualité de service réduite. Étant donné que le transport adapté nécessiterait plus d'espace routier et d'énergie que le transport en commun, le passage du transport en commun aux véhicules automatisés serait susceptible d'augmenter la congestion routière, les accidents et les émissions de polluants.

Certains partisans affirment que les véhicules automatisés éliminent le besoin de services de transport en commun conventionnels, mais un transport en commun à grande capacité sera toujours nécessaire sur les principaux corridors de desserte, et les technologies automatisées peuvent soutenir le transport en commun en réduisant les coûts d'exploitation et en améliorant l'accès aux arrêts et aux gares (ITF 2014 ; TRB 2017). Pour éviter les problèmes potentiels, de nombreux experts recommandent aux gouvernements d'imposer une tarification routière efficace, de développer des voies réservées aux véhicules à occupation multiple et d'améliorer les services de transport en commun dans les couloirs de circulation congestionnés afin de limiter la circulation, la congestion et maintenir l'efficacité du système de transport en commun.

Autres tendances affectant les demandes de déplacements

Le développement de véhicules automatisés n'est qu'une des nombreuses tendances qui affecteront les futures demandes de transport et les besoins de planification, comme l'illustre la figure 21. Les changements démographiques, les préférences des consommateurs, les prix, les technologies de l'information, les options de mobilité et d'autres innovations en matière de planification peuvent avoir des impacts plus importants que véhicules dans un avenir prévisible.

Figure 8 : Facteurs affectant la demande de transport et les coûts - Les véhicules automatisés sont l'un des nombreux facteurs affectant la future demande de transport



Certains avantages, tels que la réduction du stress du conducteur, pourraient survenir avec l'automatisation de niveau 2 à 4, mais la plupart des avantages nécessiteraient une automatisation de niveau 5, et certains ne se produiraient que lorsqu'ils sont partagés ou s'ils ont des voies dédiées. La matrice suivante résume les avantages offerts par divers types de VA.

Tableau 12 : Avantages des véhicules automatisés

Types de véhicules automatisés	Mobilité pour les non-conducteurs	Réduction du stress du conducteur	Economies utilisateur	Sécurité des occupants	Avantages externes
Niveau 1 à 4 – usage individuel		X		?	
Niveau 5 – usage individuel	X	X		X	?
Véhicules automatisés partagés	X		X		X
Véhicules automatisés covoiturage	X		X		X
Voies réservées aux véhicules automatisés			X		?

Le tableau 13 présente une chronologie des problèmes de planification des véhicules autonomes.

Problème	Analyse requise	Politique requise	Période
Sécurité et fiabilité	Evaluer la fiabilité et la sécurité. Etablir un cadre réglementaire.	Définir les performances, les exigences de tests et en matière de données pour l'exploitation des véhicules automatisés sur les routes publiques.	2030-2030
Impacts sur les déplacements	Enquêter sur les changements de déplacements, les avantages possibles en termes de coûts.	Gestion de transports pour réduire la congestion, les accidents et les émissions.	2020-2040
Impacts locaux sur la circulation des véhicules	Enquêter sur les changements sur les véhicules à moteurs et les impacts.	Tarififier pour décongestionner, restreindre l'accès à certains véhicules, donner la priorité aux véhicules à fort taux d'occupation et mettre en place des politiques qui favorisent l'autopartage.	2020-2040
Sécurité	Enquêter sur les nouveaux risques, les impacts des accidents en particulier sur les autres usagers de la route.	Réguler les véhicules automatisés pour assurer la sécurité de tous les usagers de la route. Tarifier et gérer les routes pour la sécurité	2020-2060
Mobilité pour les non-conducteurs	Etudier la disponibilité et la fiabilité des véhicules automatisés pour les non-conducteurs.	Mettre en place des politiques qui assurent que les véhicules automatisés servent aux personnes à mobilité réduite et aux faibles revenus.	2020-2030
Impacts sur le partage de	Etudier la qualité des services de mobilité partagée et le	Réguler et encourager la mobilité automatisée partagée et en	2030-2040

véhicules	covoiturage.	covoiturage.	
Impacts sur les émissions et la consommation	Analyser les types de carburant et leur consommation. Analyser les impacts sur les déplacements.	Encourager l'efficacité énergétique et les véhicules électriques. Réfléchir la tarification et la gestion des routes pur minimiser les déplacements .	2030-2060
Stationnement et chargement des passagers	Etudier les impacts sur la propriété individuelle et l'usage, et sur le besoins de parking et de chargement.	Réduire des besoins en parking et aménager efficacement les parking et les trottoirs.	2040-2050
Conception de la route	Analyser les impacts sur le trafic routier et les besoins en conception.	Changer la conception de l'infrastructure. Considérer la création de voies dédiées pour les VA. Déterminer son prix et sa tarification.	2050-2070
Planifier le trafic mixte	Analyser les conflits entre les VA et les autres usagers.	Développer des politiques et des équipements pour minimiser les conflits et les risques.	2040-2060
Mandater les véhicules automatisés	Etudier les avantages potentiels de mandats.	Si les avantages sont conséquents, restreindre les véhicules conventionnels et rendre obligatoires les VA.	2060-2080

Tableau 8 : Problèmes de planification des VA – ce tableau identifie les divers besoins et exigences pour achever les objectifs de planification des VA

Étant donné que les piétons et les cyclistes sont difficiles à percevoir pour les capteurs et moins prévisibles que les véhicules conventionnels, les véhicules automatisés pourraient créer des risques particuliers aux usagers vulnérables. Le Centre d'information sur les piétons et les cyclistes (*Pedestrian and Bicycle Information Center*) identifie dix risques que les véhicules automatisés pourraient imposer aux piétons et aux cyclistes et comment ceux-ci pourraient être minimisés (PBIC 2017). Appleyard et Riggs (2018) identifient des principes de planification pour s'assurer que les véhicules automatisés respecteraient le principe de « bien vivre ensemble » de la communauté en améliorant le comportement de conduite (vitesses plus lentes et capacité accrue à céder et à s'arrêter), en améliorant les conditions de marche et de vélo et en réduisant les besoins de stationnement.

Les avantages du véhicule automatisé dépendront des politiques publiques. Le tableau suivant compare les résultats optimistes et pessimistes des politiques de véhicules automatisés.

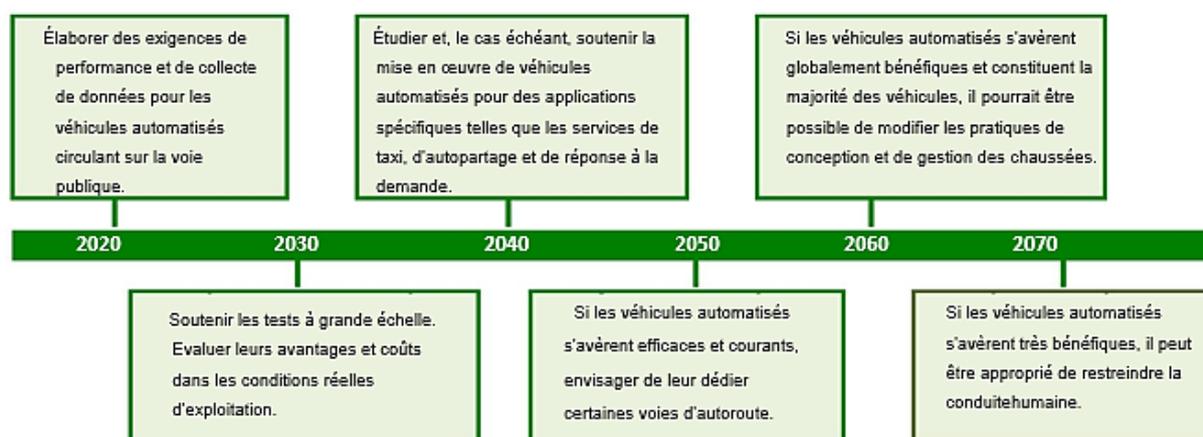
Problème	Résultat optimiste	Résultat pessimiste
Partage	Les politiques encouragent le partage de véhicules.	Les VA sont perçus comme des biens de luxe et individuels.
Inclusion sociale	Les politiques conçues pour maximiser la fiabilité et l'accessibilité des VA s'assurent qu'ils sont largement disponibles.	Les VA sont uniquement fiables et disponibles pour les utilisateurs privilégiés (aisés).
Développement durable	Les politiques de déploiement des VA supportent le développement durable.	Les politiques de VA donnent peu de considérations aux objectifs environnementaux.
Transport en	Les politiques publiques encouragent les	Les politiques publiques se focalisent

commun	transports en commun, en finançant et favorisant les véhicules partagés.	trop sur les VA et oublie de promouvoir les transports publics.
Gestion multimodale	Les VA sont programmés pour minimiser les risques et les retards pour les autres usagers.	Les VA sont programmés pour favoriser ses occupants avant les autres usagers.
Réseau de données	Les réseaux de données sont conçus pour maximiser l'efficacité globale du système de transport et sa durabilité.	Les réseaux de données sont conçus pour maximiser les profits, des informations confidentielles sont vendues.
Gestion de données sensibles	Les données personnelles sont manipulées avec précautions pour l'intérêt général.	Une quantité abondante de données personnelles collectées par les VA sont utilisées à des fins commerciales.
Stationnement	Les zones de stationnement sont converties bâtiments, infrastructures de transport et espaces verts.	Les politiques de stationnement restent telles qu'elles sont, de sorte que le stationnement continue de consommer des terrains précieux.
Accès au trottoir	L'accès au trottoir est géré efficacement pour desservir les passagers des véhicules partagés ainsi que d'autres utilisations.	L'espace en bordure de rue est encombré et dangereux, et d'autres personnes (piétons et cyclistes) sont lésés.
Utilisation du territoire	Les zones urbaines deviennent des lieux de vie plus attractifs. Les politiques de transport favorisent la qualité de vie.	Le foncier urbain est géré pour accueillir les déplacements de VA, au détriment des autres groupes sociaux.
Planification des transports	La planification des transports est multimodale et favorise les modes économes en ressources.	La planification des transports favorise les VA, par exemple, avec des voies réservées et des frais d'utilisation peu élevés.

Tableau 9 : Résultats optimistes et pessimistes - les véhicules automatisés soulèvent de nombreux problèmes de politiques publiques et de planification

Le calendrier ci-dessous résume les exigences de planification des véhicules autonomes.

Figure 9 : Calendrier de planification des véhicules automatisés



Impacts du service de taxi automatisés

En 2017, Waymo et Uber ont commencé à tester des taxis sans conducteur dans la région de Phoenix, en Arizona (Bergen 2017; Lee 2017). Quelques mois plus tard, la mort d'un piéton a mis le programme en attente, mais il a rapidement été rétabli.

Phoenix a été choisie car elle a un climat doux, des rues larges et relativement peu de piétons. Les véhicules sont relativement lents. Un développement et des tests supplémentaires sont nécessaires avant que la technologie ne puisse s'étendre aux villes où les conditions météorologiques et où la congestion sont plus graves, et son expansion dépendra de la rentabilité du service, ce qui nécessitera une confiance et une satisfaction élevées des consommateurs, ainsi que des réductions de coûts. En conséquence, il faudra probablement plusieurs années avant que les services commerciaux de taxis automatisés soient largement disponibles.

Les taxis desservent principalement les déplacements urbains locaux lorsque les voyageurs n'ont pas de véhicule individuels, ce qui représente une part mineure du total des déplacements. Pour réduire significativement les déplacements en véhicule et les coûts associés, les taxis automatisés doivent devenir peu coûteux, omniprésents et intégrés à d'autres options de mobilité afin que les ménages puissent réduire leur possession de véhicules et s'appuyer sur des véhicules partagés. Cela peut être accéléré par des politiques publiques qui découragent la possession de véhicules privés et encouragent le partage, comme la réduction de l'offre de stationnement, les voies réservées aux véhicules à taux d'occupation élevé et les aires d'embarquement pratiques pour les passagers.

Cela est conforme aux prévisions selon lesquelles, au cours des années 2020, les véhicules automatisés auront une disponibilité et des performances limitées. Si la technologie s'améliore et devient abordable et fiable, de sorte que les services de taxi automatisés deviennent rentables, ils pourraient s'étendre pour desservir davantage de zones et de types de déplacements. Cependant, jusqu'à ce que la plupart des ménages passent de la possession de véhicules à des services de mobilité partagée, et jusqu'à ce qu'une plus grande proportion de ménages vivent dans des quartiers compacts et multimodaux, les taxis automatisés n'affecteront qu'une petite partie du total des déplacements et n'apporteront que de modestes avantages à la communauté.

Conflits potentiels et solutions

Il existe des conflits potentiels entre les objectifs des utilisateurs et ceux de la communauté dans la conception et la programmation des véhicules automatisés. Par exemple, s'ils sont programmés pour maximiser le confort des passagers, ils peuvent réduire la vitesse de la circulation, et s'ils sont programmés pour protéger les occupants, ils peuvent augmenter le risque d'accidents pour les autres usagers de la route. Certains avantages (réduction de la congestion et éventuellement des émissions polluantes) nécessitent des voies réservées aux véhicules automatisés, ce qui soulève des problèmes d'équité, de tarification et d'application.

Il existe également des conflits de planification potentiels. En augmentant le nombre total de déplacements en véhicule, en encourageant un développement dispersé et en remplaçant le transport en commun, les véhicules automatisés pourraient exacerber les problèmes de congestion, d'étalement urbains et d'inégalité. Les véhicules partagés réduisent la demande de stationnement mais augmentent le besoin d'installations de chargement des passagers (OECD/ITF 2018). Certaines organisations d'intérêt public ont élaboré des lignes directrices pour optimiser les avantages des véhicules automatisés (Fulton, Mason et Meroux 2017 ; Kaohsiung EcoMobility Festival 2017). L'encadré ci-dessous résume un exemple.

Principes de mobilité partagée pour des villes durables (www.sharedmobilityprinciples.org)

1. Planifier ensemble nos villes et leur mobilité.
2. Donner la priorité aux personnes plutôt qu'aux véhicules
3. Soutenir l'utilisation partagée et efficace des véhicules, des voies, des bordures et des terrains
4. S'engager avec les parties prenantes.
5. Promouvoir l'équité.
6. Diriger la transition vers une énergie propre et renouvelable.
7. Soutenir des frais d'utilisation équitables dans tous les modes.
8. Viser les avantages publics via les données ouvertes.
9. Travailler à l'intégration et à la connectivité transparente.
10. Dans les zones urbaines denses, les véhicules autonomes ne devraient opérer dans des flottes partagées.

Les stratégies suivantes peuvent aider à maximiser les avantages des véhicules automatisés et à minimiser leurs coûts sociaux (Larco, et al. 2018 ; González-González, Lynott 2018 ; Nogués et Stead 2020 ; Schlossberg, et al. 2018 ; TRB 2017 ; WEF 2020) :

- Mettre l'accent sur les objectifs sociaux tels que l'efficacité et l'équité du système de transport.
- Tester et réglementer les nouvelles technologies pour la sécurité et l'efficacité.
- Assurer une collecte, un stockage et un partage responsables des données clés, telles que les déplacements en véhicule et les conflits pour mesurer les impacts positifs et négatifs. Encourager l'interopérabilité des systèmes de données et des plateformes.
- Exiger que les véhicules automatisés soient programmés en fonction d'objectifs éthiques et communautaires.
- Mettre en œuvre des politiques, telles qu'une tarification efficace et la priorité des véhicules dans le trafic, pour favoriser les trajets de plus grande valeur et les déplacements plus économes en espace, et pour limiter les volumes de trafic de véhicules à des niveaux optimaux.
- Veiller à ce que les services automatisés partagés soient abordables et desservent les personnes ayant des besoins particuliers.
- Intégrer les services automatisés partagés dans les systèmes de transport multimodaux, par exemple, pour fournir un accès du dernier kilomètre aux stations de transport en commun et pour réduire les voies de circulation afin que plus d'espace routier soit

disponible pour les pistes cyclables, les trottoirs et les espaces verts.

- Incorporer une conception universelle qui s'adapte aux personnes ayant des besoins et des capacités spéciales.
- Utiliser les réductions de la circulation automobile pour réaménager les rues et améliorer l'habitabilité urbaine.
- Réduire les minimums de stationnement et le stationnement public pour profiter des véhicules partagés. Utilisation réduite le stationnement doit augmenter les densités urbaines et les espaces verts.
- Évolution efficace des prix pour éviter un étalement inefficace.

Conclusions

Beaucoup de gens se demandent dans combien de temps les véhicules automatisés aideront à résoudre les problèmes de transport. Les optimistes prédisent que d'ici 2030, les véhicules automatisés seront suffisamment fiables, abordables et courants pour remplacer la plupart des véhicules conventionnels, offrant d'énormes économies et avantages. Cependant, il y a de bonnes raisons d'être sceptique. La plupart des prédictions optimistes sont faites par des personnes ayant des intérêts financiers dans l'industrie, sur la base de l'expérience des technologies telles que les appareils photo numériques, les téléphones intelligents et les ordinateurs personnels. Ils ont tendance à ignorer les obstacles importants au développement de véhicules automatisés et à exagérer les avantages futurs.

Il existe une incertitude considérable concernant les impacts des véhicules automatisés sur la demande, les avantages, les coûts et les déplacements. La conduite d'un véhicule sur la voie publique est compliquée en raison des interactions fréquentes avec des animaux, des personnes et des véhicules souvent imprévisibles. Des progrès considérables sont nécessaires avant que les véhicules automatisés puissent fonctionner de manière fiable dans le trafic urbain mixte, en cas de fortes pluies et neiges, sur des routes non goudronnées et non cartographiées et avec un service sans fil peu fiable. Des années de tests et d'approbations réglementaires sont nécessaires avant qu'ils ne soient disponibles sur le marché dans la plupart des juridictions. Les premiers véhicules automatisés disponibles dans le commerce risquent d'être chers, limités dans leurs performances et introduiront de nouveaux risques. Ces contraintes limiteront les ventes. De nombreux automobilistes hésiteront à payer des milliers de dollars supplémentaires pour des véhicules qui seront parfois incapables d'atteindre une destination en raison du mauvais temps ou de routes non cartographiées. Les véhicules durent plus longtemps, coûtent plus cher, imposent des coûts externes plus importants et sont plus fortement réglementés que la plupart des autres biens de consommation, de sorte que les nouvelles technologies automobiles tardent à pénétrer les marchés. Il faudra probablement des décennies pour que la plupart des véhicules soient automatisés, et certains automobilistes pourraient leur résister.

De manière optimiste, les véhicules automatisés de niveau 5 seront sûrs et fiables d'ici 2025. Quelques années supplémentaires seront nécessaires pour les tests et l'approbation réglementaire, de sorte que d'ici 2030, les véhicules automatisés pourraient être disponibles dans le commerce et autorisés à fonctionner dans de nombreux domaines. S'ils suivent le modèle des technologies de véhicules précédentes, au cours des années 2030 et probablement des années 2040, ils seront coûteux et limités en performances, parfois incapables d'atteindre une destination souhaitée ou nécessitant une intervention humaine lorsqu'ils rencontrent des situations inattendues. Les clients comprendront des automobilistes fortunés au kilométrage annuel élevé et des entreprises qui utilisent des véhicules pour transporter du matériel et des marchandises. Dans un avenir prévisible, la plupart des ménages à revenu modeste et faible continuera d'utiliser des véhicules conventionnels. Ce sera probablement les années 2050 que les véhicules automatisés seront abordables pour la plupart des automobilistes à revenu moyen et faible.

Les véhicules automatisés partagés (taxis autonomes) et le covoiturage (services de micro-transit) sont testés dans certaines juridictions, mais il faudra probablement attendre les années 2030 avant qu'ils ne soient largement disponibles. Les véhicules partagés ont des coûts d'exploitation modérés et offrent une commodité et un confort modérés. Ils devraient être moins chers que les services actuels de taxi et de covoiturage, mais offrir moins de service car aucun chauffeur ne sera disponible pour assister les passagers, assurer la sécurité ou nettoyer les véhicules. La répartition des véhicules sera parfois lente et imprévisible, en particulier dans les zones moins denses. Les trajets partagés ont les coûts les plus bas, mais le moins de commodité et de confort en raison de la collecte des passagers et des retards, ils ne peuvent pas fournir de service porte-à-porte et les passagers doivent partager des espaces confinés avec des étrangers. En raison de ces limitations, les véhicules et les trajets partagés serviront principalement les déplacements urbains et il est peu probable qu'ils dominent les déplacements interurbains et ruraux.

Cette analyse suggère qu'il faudra au moins 2045 avant que la plupart des véhicules soient automatisés, et plus longtemps avant qu'ils ne soient abordables. Un déploiement beaucoup plus rapide nécessitera la mise au rebut de la plupart des véhicules autrement fonctionnels qui manquent de capacité de conduite automatisée. Certains avantages, tels que la réduction du stress du conducteur et la mobilité indépendante des non-conducteurs aisés, pourraient se produire lorsque les véhicules automatisés seront relativement coûteux et rares. Cependant, la plupart des avantages, tels que la mobilité indépendante pour les non-conducteurs à revenu modéré, ne pourraient être significatifs que s'ils devenaient courants et abordables, et certains avantages, tels que la réduction de la congestion et des émissions, nécessiteraient des voies réservées pour permettre le peloton. Leurs impacts sur l'équité sociale sont mitigés, ils sont susceptibles de réduire certains coûts externes mais d'en augmenter d'autres, et ils peuvent bénéficier à certains groupes défavorisés mais nuire à d'autres, en particulier s'ils induisent des déplacements supplémentaires en véhicule et un étalement. Les taxis automatisés et les services de micro-transport en commun peuvent offrir une plus grande efficacité et des avantages en termes d'équité, en particulier si les politiques publiques favorisent les déplacements en véhicule partagé, avec une tarification de décongestion et des voies réservées aux véhicules à forte occupation.

De nombreuses prévisions supposent que la plupart des véhicules automatisés seront électriques, qui ont de faibles coûts de carburant mais nécessitent des batteries coûteuses et ne paient actuellement aucune taxe sur le carburant. L'intégration des coûts de remplacement des batteries et des frais d'utilisation efficaces de la route augmente les coûts d'exploitation des véhicules électriques pour qu'ils soient similaires à ceux des véhicules à carburant fossile. En raison de leurs coûts de main-d'œuvre élevés et de leurs itinéraires prévisibles, les bus et camions automatisés pourraient devenir courants assez rapidement, mais nombre de ces véhicules auront encore besoin d'employés à bord pour assurer l'assistance aux passagers, la sécurité, le chargement et le déchargement.

La figure ci-dessous illustre la pénétration du marché et les prévisions de bénéfices. L'autonomie de niveau 4 (capable de fonctionner de manière automatisée dans des conditions limitées, comme sur des autoroutes à chaussées séparées) pourrait réduire le stress du conducteur et augmenter la productivité, mais la plupart des avantages nécessiteraient une autonomie de niveau 5 (capable de fonctionner de manière automatisée dans toutes les situations) afin que les véhicules puissent transporter les non-conducteurs et voyager à vide pour prendre ou déposer des passagers. Certains avantages, tels que la mobilité indépendante pour les non-conducteurs aisés, pourraient se produire alors que les véhicules automatisés sont chers et rares, mais la plupart des avantages exigent qu'ils soient abordables et courants, ce qui prendra des décennies.

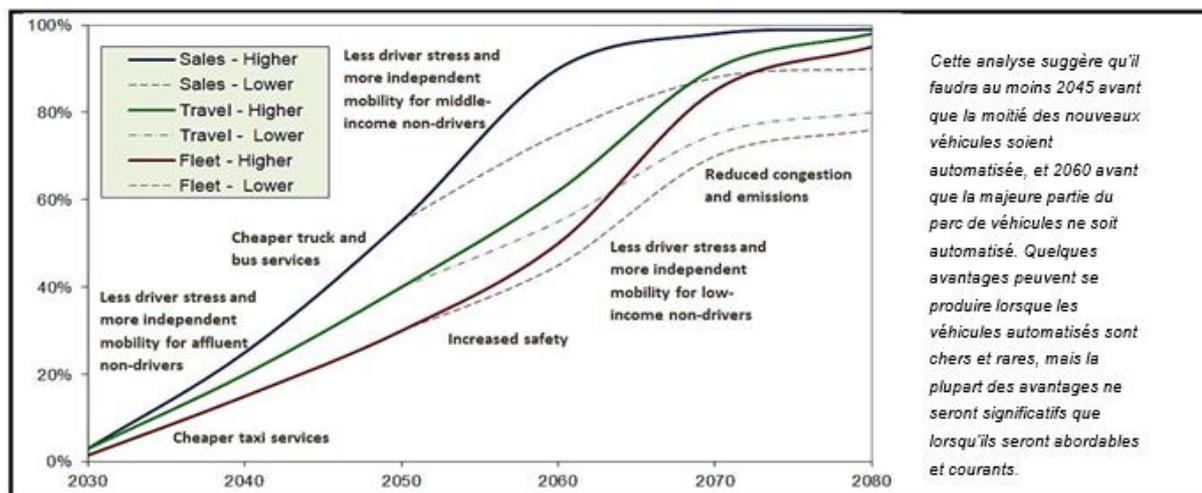


Figure 10 : Projections des ventes, du parc, des déplacements et des avantages des véhicules automatisés

Une question importante pour la planification est de savoir si les véhicules automatisés augmenteront ou réduiront les déplacements totaux des véhicules et les problèmes de circulation associés. Cela pourrait aller dans les deux sens. En augmentant les déplacements en véhicule des non-conducteurs, en augmentant la commodité et le confort des déplacements, en réduisant les coûts d'exploitation des véhicules, générant des déplacements à vide et encourageant les déplacements sur de plus longues distances et un développement plus étendu, ils peuvent augmenter les déplacements en véhicule. Ces déplacements supplémentaires en véhicule offre des avantages marginaux au consommateur, et comme les déplacements en véhicule impose des coûts externes importants, une grande partie des déplacements supplémentaire en véhicule est susceptible d'être économiquement inefficace : ses avantages pour l'utilisateur seront inférieurs aux coûts supplémentaires totaux. Alternativement, le fonctionnement automatisé pourrait faciliter le partage de véhicules, permettant aux ménages de réduire la possession de véhicules et les déplacements réalisés. Cela suggère que les véhicules automatisés seraient susceptibles d'augmenter les déplacements dans les zones interurbaines et rurales et les réduire dans les zones urbaines. Leurs impacts nets dépendront des politiques de transport et d'aménagement du territoire. Avec les politiques actuelles, les déplacements et l'étalement des véhicules devraient augmenter de 10 à 30 %. Une tarification plus efficace et une gestion de la voirie qui favorise les véhicules partagés pourraient réduire les déplacements des véhicules et les problèmes associés.

Un autre problème crucial est la mesure dans laquelle les avantages potentiels pourraient être obtenus lorsqu'une partie seulement des déplacements en véhicule sont automatisés. Certains avantages, tels qu'une mobilité améliorée pour les non-conducteurs aisés, peuvent se produire lorsque les véhicules automatisés sont rares et coûteux, mais de nombreux avantages potentiels, tels que la réduction de la congestion et des taux d'émission, la réduction des feux de circulation et de la largeur des voies, exigent que les véhicules fonctionnent de manière automatisés dans des voies dédiées.

Certaines organisations d'intérêt public ont élaboré des lignes directrices pour optimiser les avantages des véhicules automatisés. Celles-ci mettent l'accent sur des objectifs sociaux tels que la sécurité et l'efficacité globales du système, et la gestion de la demande de transport pour limiter les déplacements des véhicules en fonction de la capacité des routes et favoriser les véhicules à fort taux d'occupation par rapport aux véhicules à faible occupation.

La mise en œuvre de véhicules automatisés n'est qu'une des nombreuses tendances susceptibles d'affecter les demandes et les impacts futurs en matière de transport, et pas nécessairement la plus importante. Leurs impacts ultimes dépendent de la manière dont les véhicules automatisés interagiront avec d'autres tendances, telles que le passage des véhicules privés aux véhicules partagés. Les véhicules automatisés ne changeront probablement pas la donne pendant la majeure partie de notre vie et ne provoqueront un « changement de paradigme » que si cette technologie entraîne de forts reports modaux des véhicules privés vers les véhicules partagés et crée davantage de communautés multimodales.

Les professionnels du transport ont un rôle important à jouer dans le développement et le déploiement de véhicules automatisés. Ils doivent prévoir comment les nouvelles technologies et les nouveaux services sont susceptibles d'affecter les besoins en matière de routes, de stationnement et de transport en commun, et comment réagir pour minimiser les problèmes et maximiser les avantages totaux. Ils peuvent aider à définir les normes qu'ils doivent respecter pour circuler légalement sur la voie publique. Ils devraient évaluer leurs avantages et leurs coûts et élaborer des politiques pour maximiser les avantages nets et veiller à ce que leur déploiement soutienne les objectifs communautaires stratégiques.

Références

AAA (annual reports), Your Driving Costs, American Automobile Association (<http://newsroom.aaa.com>); at <https://publicaffairsresources.aaa.biz/YDC/html5/index.html>.

AAA (2018), Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) Repair Costs, Fact Sheet, AAA News Room (<https://newsroom.aaa.com>); at <https://bit.ly/39JO6Cl>.

Evan Ackerman (2017), "Toyota's Gill Pratt on Self-Driving Cars and the Reality of Full Autonomy," Spectrum, International Institute of Electrical Engineers (www.ieee.org); at <https://bit.ly/2FJYJax>.

Air Quality Expert Group (2020), Non-Exhaust Emissions from Road Traffic, UK Department for Environment, Food and Rural Affairs (<https://uk-air.defra.gov.uk>); at <https://bit.ly/2Ufin64>.

APA (2016), Autonomous Vehicles: Knowledgebase Collection, American Planning Association (www.planning.org); at www.planning.org/knowledgebase/autonomousvehicles.

Bruce Appleyard and William Riggs (2018), 10 Principles Toward More Sharing and Less Sprawl: A Manifesto for Street Livability, Health, and Humanity in the Era of Driverless Cars, Planetizen (www.planetizen.com); at www.planetizen.com/features/96769-10-principles-toward-more-sharing-and-less-sprawl.

Jaâfar Berrada and Fabien Leurent (2017), "Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicles: State of the Art," Transportation Research Procedia, Vol. 27, pp. 215-221 (<https://bit.ly/2IK9iwO>).

Brad Berman (2011), History of Hybrid Vehicles, Hybrid Cars (www.hybridcars.com); at <https://bit.ly/2z9aSEg>.

Patrick Bösch, et al. (2017), Cost-based Analysis of Autonomous Mobility Services, Working Paper 1225, Institute for Transport Planning and Systems (www.ivt.ethz.ch); at <https://bit.ly/3glVlpW>.

Meredith Broussard (2018), "The Dirty Truth Coming for Self-Driving Cars: Trash. Odors. Bodily Fluids. Will Autonomous Rideshares be Ready for our Mess?" Slate (<https://slate.com>); at <https://slate.me/2Ls9Irl>.

Huajun Chai, et al. (2020), The Impacts of Automated Vehicles on Center City Parking Demand, National Center for Sustainable Transport (<https://ncst.ucdavis.edu>); at <https://bit.ly/2CxLAec>.

Tay Hong Chuen, et al. (2013), Autonomous Vehicles, MT5009; at <https://bit.ly/2RTGdS7>.

Giovanni Circella and Scott Hardman (2022), Driverless Cars Won't be Good for the Environment if They Lead to More Auto Use, The Conversation (<https://theconversation.com>); at <https://bit.ly/3gkmgO>.

CPUC (2020), Autonomous Vehicle Pilot Permits Issued, California Public Utilities Commission (www.cpuc.ca.gov/avcissued).

Hana Creger, Joel Espino and Alvaro S. Sanchez (2019), Autonomous Vehicle Heaven or Hell? Creating a Transportation Revolution that Benefits All, Greenlining (<http://greenlining.org>); at <https://bit.ly/2W710ab>.

Angela DeLuca (2018), *Ending the Search for Parking*, Urbanism Next (<https://urbanismnext.uoregon.edu>); at <https://bit.ly/2q6uTWD>.

Stephen Dirksen (1997), *Air Bags: History of American Technology*, Bryant University Community Web (http://web.bryant.edu/~ehu/h364proj/sprg_97/dirksen/airbags.html).

Dawn Project (2022), *Tesla Full Self-driving Safety Analysis*, The Dawn Project: Making Computers Safe for Humanity (<https://dawnproject.com>); at <https://bit.ly/3rlvh4q>.

The Economist (2019), "Driverless Cars are Stuck in a Jam," 10 October (www.economist.com); at www.economist.com/leaders/2019/10/10/driverless-cars-are-stuck-in-a-jam.

John Eddy and Ryan Falconer (2017), *A Civil Debate: Are Driverless Cars Good for Cities?*, Doggerel (<http://doggerel.arup.com>); at <https://bit.ly/3Hl2sdX>.

Kevin Eykholt, et al. (2018), "Robust Physical-World Attacks on Deep Learning Models," *Cryptography and Security* (<https://arxiv.org/abs/1707.08945>).

Fehr & Peers (2014), *Effects of Next-Generation Vehicles on Travel Demand & Highway Capacity*, Fehr and Peers (www.fehrandpeers.com); at www.fehrandpeers.com/fpthink/nextgenerationvehicles.

FHWA (2018), *Highway Statistics*, Federal Highway Administration (www.fhwa.dot.gov); at www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics.cfm.

Kelly Fleming and Mark Singer (2019), *Energy Implications of Current Travel and the Adoption of Automated Vehicles*, National Renewable Energy Laboratory; at www.nrel.gov/docs/fy19osti/72675.pdf.

Lew Fulton, Jacob Mason and Dominique Meroux (2017), *Three Revolutions in Urban Transportation*, UC Davis and ITDP (www.itdp.org); at www.itdp.org/publication/3rs-in-urban-transport.

Lewis Fulton, Junia Compostella and Alimurtaza Kothawala (2020), *Estimating the Costs of New Mobility Travel Options: Monetary and Non-Monetary Factors*, National Center for Sustainable Transportation (https://escholarship.org/uc/itsdavis_ncst); at (<https://doi.org/10.7922/G20R9MN8>).

GAO (2016), *Vehicle Cybersecurity: DOT and Industry Have Efforts Under Way, but DOT Needs to Define Its Role in Responding to a Real-world Attack*, GAO (www.gao.gov); at <https://bit.ly/1ruZi09>.

GM (2020), *OnStar Services* (www.onstar.com).

Esther González-González, Soledad Nogués and Dominic Stead (2020), *Parking Futures: Preparing European Cities for the Advent of Automated Vehicles*, *Land Use Policy*, Vo. 90 (doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.029).

David G. Groves and Nidhi Kalra (2017), *Enemy of Good: Autonomous Vehicle Safety Scenario Explorer*, Rand Corporation (www.rand.org); at www.rand.org/pubs/tools/TL279.html.

Bern Grush (2016), *Driverless Cars Ahead: Ontario Must Prepare for Vehicle Automation*, Residential and Civil Construction Alliance of Ontario (RCCAO); at <https://bit.ly/2DFNNwy>.

Bern Grush and John Niles (2018), *The End of Driving: Transportation Systems and Public Policy Planning for Autonomous Vehicles*, Elsevier (www.elsevier.com/books/the-end-of-driving/niles/978-0-12-815451-9).

Erick Guerra (2015), "Planning for Cars that Drive Themselves: Metropolitan Planning Organizations, Regional Transportation Plans, and Autonomous Vehicles," *Journal of Planning Education and Research*, pp. 1–15 (DOI: 10.1177/0739456X15613591); at <http://bit.ly/1RqcBaZ>.

Subhrajit Guhathakurta and Amit Kumar (2019), "When and Where are Dedicated Lanes Needed under Mixed Traffic of Automated and Non-Automated Vehicles for Optimal System Level Benefits?," Center for Transportation, Equity, Decisions and Dollars (<https://ctedd.uta.edu>); at <https://bit.ly/3lgxA6l>.

Mustapha Harb, et al. (2018), "Projecting Travelers into a World of Self-Driving Vehicles," *Transportation*, Vol. 45, pp. 1671-1685 (<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11116-018-9937-9>).

Mark Harris (2014), "FBI Warns Driverless Cars Could Be Used As 'Lethal Weapons'" *The Guardian* (www.theguardian.com), 16 July 2014; at <https://bit.ly/1p7fQU6>.

Andrew Hawkins (2017), "Tesla's Autopilot is Supposed to Deliver Full Self-Driving, So Why Does it Feel Stuck in the Past?," *The Verge* (www.theverge.com); at <https://bit.ly/2Fmftfed>.

James R. Healey (2012), "Stick Shifts Popular Again, Despite Lower Gas Mileage," *USA Today*, 30 April (www.usatoday.com); at <https://bit.ly/2FoFPdc>.

Kevin Heaslip, et al. (2020), *Assessment of Capacity Changes Due to Automated Vehicles on Interstate Corridors*, Virginia Transportation Research Council (www.virginiadot.org); at <https://bit.ly/3Aghf71>.

Jennifer Henaghan (2018), *Preparing Communities for Autonomous Vehicles*, American Planning Association (www.planning.org); at <https://bit.ly/2piKBhX>.

Alexandro Henao and Wes Marshall (2018), "The Impact of Ridehailing on Vehicle Miles Traveled," *Transportation* (<https://doi.org/10.1007/s11116-018-9923-2>).

Jeremy Hsu (2017), "When It Comes to Safety, Autonomous Cars Are Still 'Teen Drivers,'" *Scientific American* (www.scientificamerican.com); at <http://bit.ly/2j9gFPT>.

Kyle Hyatt (2020), *Toyota had the Most Autonomous Vehicle Disengagements*, Road Show (www.cnet.com); at www.cnet.com/roadshow/news/2019-california-self-driving-disengagement-report-baidu-waymo-cruise.

Intellias (2018), *How a Self-Driving Car Could Save You Money*; at <https://bit.ly/36ZVBDD>.

ITF (2014), *Urban Mobility: System Upgrade*, International Transport Forum (www.internationaltransportforum.org) and Corporate Partnership Board; at <https://bit.ly/2JJrWUo>.

ITF (2018), *Safer Roads with Automated Vehicles?* International Transport Forum (www.itf-oecd.org); at www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/safer-roads-automated-vehicles.pdf.

Qinhua Jiang, Brian Yueshuai He and Jiaqi Ma (2022), "Connected Automated Vehicle Impacts in Southern California Part-II: VMT, Emissions, And Equity, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*,
Vo. 109 (<https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103381>).

Charlie Johnston and Jonathan Walker (2017), *Peak Car Ownership: The Market Opportunity for Electric Automated Mobility Services*, Rocky Mountain Institute (www.rmi.org); at <http://bit.ly/2rhJRNI>.

Kaohsiung EcoMobility Festival (2017), *Kaohsiung Strategies for the Future of Urban Mobility*, EcoMobility Festival (www.ecomobilityfestival.org); at <https://bit.ly/2OMwsDD>.

Tasha Keeney (2017), *Mobility-As-A-Service: Why Self-Driving Cars Could Change Everything*, ARC Investment Research (<http://research.ark-invest.com>); at <http://bit.ly/2xz6PNV>.

Irem Kok, et al. (2017), *Rethinking Transportation 2020-2030: Disruption of Transportation and the Collapse of the Internal-Combustion Vehicle & Oil Industries*, RethinkX (www.rethinkx.com); at <http://bit.ly/2pL0cZV>.

Kara Kockelman, et al. (2016), *Implications of Connected and Automated Vehicles on the Safety and Operations of Roadway Networks*, University of Texas Center for Transportation Research (<http://ctr.utexas.edu>); at <http://library.ctr.utexas.edu/ctr-publications/0-6849-1.pdf>.

Kara Kockelman and Stephen Boyles (2018), *Smart Transport for Cities & Nations: The Rise of Self-Driving & Connected Vehicles*, The University of Texas at Austin (www.caee.utexas.edu); at <https://bit.ly/3gDpEaa>.

Philip Koopman and Michael Wagner (2017), "Autonomous Vehicle Safety: An Interdisciplinary Challenge," *IEEE Intelligent Transportation Systems*, Vol. 9, No. 1; at <http://ieeexplore.ieee.org/document/7823109>.

Will Knight (2020), "Snow and Ice Pose a Vexing Obstacle for Self-Driving Cars," *Wired Magazine*; at www.wired.com/story/snow-ice-pose-vexing-obstacle-self-driving-cars.

Nico Larco, et al. (2018), *AVs in the Pacific Northwest: Reducing Greenhouse Gas Emissions in a Time of Automation*, Urbanism Next Center (<https://urbanismnext.uoregon.edu>); at <https://bit.ly/2MHIXix>.

Nico Larco (2022), *The Road Ahead for Automated Vehicles*, U.S. House of Representatives Committee on Transportation & Infrastructure Director, Urbanism Next Center, University of Oregon (www.urbanismnext.org); at <https://docs.house.gov/Committee/Calendar/ByEvent.aspx?EventID=114362>.

Mohammad Lavasani and Xia Jin (2016), "Market Penetration Model for Autonomous Vehicles on the Basis of Earlier Technology Adoption Experience," *Transportation Research Record* 2597, pp. 67–74 (DOI: 10.3141/2597-09).

Steve Lawson (2018), *Tackling the Transition to Automated Vehicles, Roads that Cars Can Read Report III*, European Road Assessment Association (www.eurorap.org); at <https://bit.ly/2IrYTTQ>.

Scott Le Vine, Alireza Zolfaghari and John Polak (2015), "Autonomous Cars: Tension Between Occupant-Experience and Intersection Capacity," *Transportation Research C* (doi.org/10.1016/j.trc.2015.01.002).

John J. Leonard, David A. Mindell and Erik L. Stayton (2020), *Autonomous Vehicles, Mobility, and Employment Policy*, MIT Work of the Future (<https://workofthefuture.mit.edu>); at <https://bit.ly/3eTRWeA>.

Jamie Lendino (2012), "The History of Car GPS Navigation," *PC Magazine* (www.pcmag.com), 16 April; at www.pcmag.com/article2/0,2817,2402755,00.asp.

Todd Litman (2021), *Transportation Cost and Benefit Analysis*, Victoria Transport Policy Institute (www.vtpi.org/tca).

Todd Litman (2013), "The New Transportation Planning Paradigm," *ITE Journal* (www.ite.org), Vol. 83, No. 6, pp. 20-28, 2013; at www.vtpi.org/paradigm.pdf.

Todd Litman (2014), "Ready or Waiting," *Traffic Technology International* (www.trafficechnologytoday.com), January, pp. 36-42; at www.vtpi.org/AVIP_TTI_Jan2014.pdf.

Todd Litman (2017), Presentation to the Canadian Standing Senate Committee on Transport and Communication Concerning Connected and Self-driving Vehicles (<http://bit.ly/2u2Grhe>).

Todd Litman (2021), *New Mobilities: Smart Planning for Emerging Transportation Technologies*, Island Press (<https://islandpress.org/books/new-mobilities>).

Jana Lynott (2018), *Creating the Transportation System We Want: Building Blocks for the Road Ahead*, AARP Public Policy Institute (www.aarp.org); at <https://bit.ly/2Xg3PpN>.

Marowits (2017), "Self-driving Ubers Could Still be Many Years Away, Says Research Head," CTV News (www.ctvnews.ca); at <http://bit.ly/2DI48Y7>.

Greg Marsden, Iain Docherty and Robyn Dowling (2020), "Parking Futures: Curbside Management in the Era of 'New Mobility' Services," *Land Use Policy*, Vol. 91 (doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.031).

McKinsey (2016), *Automotive Revolution* (www.mckinsey.de); at <https://bit.ly/2zYBTfG>.

Peter McLeod (2021), *Technology Readiness Level Scale Explained*, Prospect IP (www.prospectip.com); at www.prospectip.com/technology-readiness-level-scale-explained.

Jeffrey Mervis (2017), "Are We Going Too Fast on Driverless Cars?," *Science Magazine* (www.sciencemag.org); at www.sciencemag.org/news/2017/12/are-we-going-too-fast-driverless-cars.

Dimitris Milakis, Bart van Arem and Bert van Wee (2017), "Policy and Society Related Implications of Automated Driving: A Review of Literature and Directions for Future Research," *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 21, No. 4, pp. 324–348; at <https://bit.ly/2zSSOgZ>.

Adam Millard-Ball (2016), "Pedestrians, Autonomous Vehicles, and Cities," *Journal of Planning Education and Research*, pp. 1-7 (DOI: 10.1177/0739456X16675674); at <https://bit.ly/2hhYrxV>.

John S. Miller and Di Kang (2019), *Ways to Consider Driverless Vehicles in Virginia Long-Range Travel Demand Models*, Virginia Transport. Res. Council (www.viriniadot.org/vtrc); at <https://bit.ly/33C5VBM>.

Alexandra S. Mueller, Jessica B. Cicchino and David S. Zuby (2020), *What Humanlike Errors Do Autonomous Vehicles Need to Avoid to Maximize Safety?*, Insurance Institute for Highway Safety (www.iihs.org); at www.iihs.org/topics/bibliography/ref/2205.

Razieh Nadafianshamabadi, Mohammad Tayarani and Gregory Rowangould (2021), "A Closer Look at Urban Development Under the Emergence of Autonomous Vehicles, *Journal of Transport Geography*, Vo. 94 (<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103113>).

NCHRP (2018), *Impacts of Connected Vehicles and Automated Vehicles on State and Local Transportation Agencies*, National Cooperative Highway Research Program (<http://trb.org>); at <https://bit.ly/2dwWddo>.

NHTSA (various years), *Automated Vehicles*, National Highway Traffic Safety Administration (www.nhtsa.gov); at <https://one.nhtsa.gov/Research/Crash+Avoidance/Automated+Vehicles>.

Peter Norton (2021), *Autonorama: The Illusory Promise of High-Tech Driving*, Island Press (<https://islandpress.org>); at <https://bit.ly/3JCo9bm>; Michael Lewyn review <https://bit.ly/3QnutWk>.

Ashley Nunes and Kristen D. Hernandez (2020), "Autonomous Taxis & Public Health: High Cost or High Opportunity Cost?", *Transportation Research Part A*, Vo. 138, pp. 28-36 (doi.org/10.1016/j.tr.2020.05.011).

Ashley Nunes et al. (2021), "Estimating the Energy Impact of Electric, Autonomous Taxis: Evidence from a Select Market," *Environmental Research Letters* (<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1bd9>).

OECD/ITF (2018), *The Shared-use City: Managing the Curb*, Organization for Economic Cooperation and Development and the International Transport Forum (www.itf-oecd.org); at <https://bit.ly/2B8hLqG>.

Alan Ohnsman (2014), "Automated Cars May Boost Fuel Use, Toyota Scientist Says," *Bloomberg Press*, 16 July 2014 (www.bloomberg.com); at <https://bloom.bg/2mDkmAu>.

ORNL (annual reports), *Transportation Energy Book*, Oak Ridge National Lab (www.cta.ornl.gov/data).

Enrica Papa and António Ferreira (2018), "Sustainable Accessibility and the Implementation of Automated Vehicles," *Urban Science*, Vo. 2/1 ([doi:10.3390/urbansci2010005](https://doi.org/10.3390/urbansci2010005)); at <https://bit.ly/2DHjZQz>.

PBIC (2017), *Automated and Connected Vehicles, Pedestrians, and Bicyclists*, Pedestrian and Bicycle Information Center (www.pedbikeinfo.org); at www.pedbikeinfo.org/AV.

David Reighmuth (2020), *Are Electric Vehicles Really Better for the Climate? Yes. Here's Why*, Union of Concerned Scientists (<https://blog.ucsusa.org>); at <https://bit.ly/2ZPLku3>.

Caroline Rodier (2018), *Travel Effects and Associated Greenhouse Gas Emissions of Automated Vehicles*, UC Davis Institute for Transportation Studies (<https://ncst.ucdavis.edu>); at <https://bit.ly/3iJVlB5>.

Shelley Row (2013), "The Future of Transportation: Connected Vehicles to Driverless Vehicles...What Does It Mean To Me?" *ITE Journal* (www.ite.org), Vol. 83, No. 10, pp. 24-25.

SAE (2014), *Levels of Driving Automation Are Defined in New SAE International Standard J3016*, Society of Automotive Engineers (www.sae.org); at www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf.

Bruce Schaller (2017), *Empty Seats, Full Streets: Fixing Manhattan's Traffic Problem*, Schaller Consulting (<http://schallerconsult.com>); at <http://schallerconsult.com/rideservices/emptyseats.pdf>.

Susan Shaheen, Hannah Totte and Adam Stocker (2018), *Future of Mobility White Paper*, ITS Berkeley; at <https://escholarship.org/uc/item/68g2h1qv>.

Shared Mobility Principles for Livable Cities (www.sharedmobilityprinciples.org). Principles to guide decision-makers and stakeholders toward the best outcomes for new mobility options.

Marc Schlossberg, et al. (2018), *Rethinking the Street in an Era of Driverless Cars*, Urbanism Next Research (www.urbanismnext.com); at www.urbanismnext.com/s/RethinkingStreetsAVs012618-27hcyr6.pdf.

Brandon Schoettle and Michael Sivak (2014), *A Survey Of Public Opinion About Autonomous And Self-Driving Vehicles*, Transportation Research Institute, University of Michigan (www.umich.edu/~umtriswt).

Brandon Schoettle and Michael Sivak (2016), *Motorists' Preferences for Different Levels of Vehicle Automation*, Transportation Research Institute, University of Michigan (www.umich.edu/~umtriswt).

Faiz Siddiqui, Rachel Lerman and Jeremy B. Merrill (2022), "Tesla Running Autopilot Involved in 273 Crashes Reported Since Last Year," Washington Post (www.washingtonpost.com); at www.washingtonpost.com/technology/2022/06/15/tesla-autopilot-crashes.

Michele D. Simoni, et al. (2019), *Congestion Pricing in a World of Self-Driving Vehicles: An Analysis of Different Strategies in Alternative Future Scenarios*, TRB Annual Meeting; at <https://bit.ly/3Kn1EqS>.
Tom Simonite (2016), "Prepare to be Underwhelmed by 2021's Autonomous Cars," *MIT Technology Review* (www.technologyreview.com); at <https://bit.ly/2PZxH6X>.

Michael Sivak and Brandon Schoettle (2015a), *Road Safety with Self-Driving Vehicles*, Sustainable Worldwide Transportation Program (www.umich.edu/~umtriswt), University of Michigan.

Michael Sivak and Brandon Schoettle (2015b), *Potential Impact of Self-Driving Vehicles on Household Vehicle Demand and Usage*, Sustainable Worldwide Transportation Program (www.umich.edu/~umtriswt).

Soheil Sohrabi, Haneen Khreis and Dominique Lord (2020), "Impacts of Autonomous Vehicles on Public Health: A Conceptual Model and Policy Recommendations," *Sustainable Cities and Society*, Vo. 63 (<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102457>); at <https://bit.ly/3fCbOWs>.

Jeff Speck (2017), *Autonomous Vehicles*, United Conference of Mayors; at <https://bit.ly/2BE9tcG>.

Daniel Sperling (2017), *Three Revolutions: Steering Automated, Shared, and Electric Vehicles to a Better Future*, Island Press (<https://islandpress.org>).

T. Stephens, et al. (2016), *Estimated Bounds and Important Factors for Fuel Use and Consumer Costs of Connected and Automated Vehicles*, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory (www.nrel.gov); at www.nrel.gov/docs/fy17osti/67216.pdf.

Araz Taeihagh and Hazel Si Min Lim (2018), "Governing Autonomous Vehicles: Emerging Responses for Safety, Liability, Privacy, Cybersecurity, and Industry Risks," *Transport Reviews*, at <https://bit.ly/2DYQaLd>.

Morteza Taiebat, Samuel Stolper and Ming Xu (2019), "Forecasting the Impact of Connected and Automated Vehicles on Energy Use: A Microeconomic Study of Induced Travel and Energy Rebound," *Applied Energy*, Vol. 247, pp 297-308 (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.174>).

Stefan Trommer, et al. (2016), *Autonomous Driving: The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour*, Institute of Transport Research (www.ifmo.de); at <http://bit.ly/2klA00Q>.

TRB (2017), *Strategies to Advance Automated and Connected Vehicles*, Transportation Research Board (www.trb.org); at www.nap.edu/download/24873.

TRB (2019), *Socioeconomic Impacts of Automated and Connected Vehicles*, European Commission and the Transportation Research Board (www.trb.org); at www.trb.org/Publications/Blurbs/178576.aspx.

Wharton (2017), *The Road Ahead for Connected Vehicles*, Wharton School of Management (<http://wharton.upenn.edu>); at <http://whr.tn/2BqKluT>.

Kea Wilson (2022), *Why Tesla Can Program Its Cars to Break Road Safety Laws*, StreetBlog USA (<https://usa.streetsblog.org>); at <https://bit.ly/3fGTmMg>.

WSJ (2017), "Why Your Next Car May Look Like a Living Room," *Wall Street Journal* (www.wsj.com); at <http://on.wsj.com/2tlCvYp>.

WEF (2020), *Guidelines for City Mobility: Steering Towards Collaboration*, World Economic Forum (www.weforum.org/reports/guidelines-for-city-mobility-2020)

World Bank (2005), *A Framework for the Economic Evaluation of Transport Projects* (www.worldbank.com) ; at <https://bit.ly/2wPF7Sg>.

Wenwen Zhang and Kaidi Wang (2020), "Parking Futures: Shared Automated Vehicles and Parking Demand Reduction Trajectories in Atlanta," *Land Use Policy*, Vo. 91 (doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.04.024).

David Zipper (2021), *When Cities Say No to New Transportation Technology*, City Lab (www.bloomberg.com/citylab); <https://bloom.bg/3ioMpSL>.