

**Annexe au rapport acceptabilité des véhicules  
automatisés par les usagers**

**Enjeux environnementaux et impacts de  
l'automatisation des véhicules**

***Séminaire national sur l'acceptabilité du véhicule automatisé***

*Rédacteur : Elsa LANAUD*

*Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGITM)  
Direction des mobilités routières (DMR)  
Transition et digitalisation des usages (TUD)*

## Introduction générale

Le rapport ci-joint forme une annexe au rapport sur l'acceptabilité des véhicules automatisés, rédigé dans le cadre de la Septième édition du séminaire sur l'acceptabilité des véhicules automatisés (VA), organisé par la DGITM et présidé par Madame Anne-Marie IDRAC, Haute responsable pour la stratégie de développement des véhicules automatisés.

Initiée dans le cadre du Cinquième séminaire sur l'acceptabilité du véhicule automatisé du 3 juin 2021, la revue de littérature sur les impacts et enjeux environnementaux des véhicules automatisés est réitérée et détaillée dans ce document. L'objectif n'est pas de décrire tous les travaux réalisés sur cette thématique mais de présenter les travaux majeurs sur les différents aspects liés au développement des véhicules automatisés autour de la thématique des enjeux environnementaux. Dans le cadre de l'acceptabilité de ces nouveaux systèmes et nouvelles technologies, les usagers s'intéressent de plus en plus aux impacts environnementaux de la mobilité automatisée et sont de plus en plus sensibles à ces impacts. Dès lors, la prise en compte des enjeux de transition énergétique semble être un facteur de l'acceptabilité des usagers.

Cette revue de littérature est construite autour de trois thématiques. Tout d'abord, l'analyse du cycle de vie prend en compte aussi bien des impacts directs du développement des VA, que des aspects liés au recyclage et à l'entretien des véhicules et des composants des systèmes. Les articles qui se réfèrent à cette thématique ont notamment été proposés par Natalia Kotelnikova-Weiler, du Laboratoire Ville Mobilité Transport (LVMT). Puis, l'étude des émissions produites par le véhicule automatisé prend en compte les évolutions liées aux émissions de polluants et de gaz à effet de serre (GES). Ces articles ont été notamment soumis par Antonio Sciarretta, chercheur à l'Institut français du Pétrole et Energies nouvelles (IFPEN). Enfin, les impacts du développement des véhicules automatisés sur le trafic et l'évolution de la congestion sont des conséquences systémiques. Les articles de cette thématique ont été partagés notamment par Nadège Faul, de l'Institut VEDECOM et certaines synthèses qui figurent dans cette annexe ont été rédigées par Hassan Mahdavi, chercheur à l'Institut VEDECOM.

Enfin, il est utile de préciser que certains des travaux décrits dans ce rapport ont été repris de ceux partagés lors du séminaire du 3 juin 2021, afin de proposer une revue plus complète au séminaire acceptabilité du 13 octobre 2022.

*Les études présentées dans ce document ont été choisies selon plusieurs critères :*

- *le choix de ne faire figurer que des études suffisamment récentes (date de publication postérieure à 2019) permet de ne considérer qu'un nombre restreint d'études pertinentes : les études les plus anciennes sont parfois dépassées dans un contexte où les avancées techniques et technologiques sont rapides ;*
- *les études sont sélectionnées en partie selon les hypothèses/conclusions qu'elles présentent – ce qui peut également avoir un lien avec la date de publication de l'étude – dans la mesure où les études les plus utopistes, avec des paramétrages parfaits et des hypothèses très simplifiées, ont été jugées peu intéressantes et utiles dans le contexte actuel.*
- *les études sont sélectionnées en prenant en considération des cas d'usage : dans le cadre réglementaire français et soutenu aux niveaux européen et international, les mobilités partagée et collective sont privilégiées<sup>1</sup>.*

---

<sup>1</sup> Dans ce cas par exemple, les études consistant à présenter une vision future de la mobilité particulière à des horizons non définis avec un taux de pénétration de 100 % ont été omises.

# Table des matières

<b>Etudes introductives</b> .....	6
« The Environmental and Resource Dimensions of Automated Transport: A Nexus for Enabling Vehicle Automation to Support Sustainable Urban Mobility », Alexandros Nikitas, Nikolas Thomopoulos and Dimitris Milakis, Annual Reviews, 2021 .....	6
« Connected & autonomous vehicles – Environmental impacts – A review », Pantelis Kopelias, Elissavet Demiridi, Konstantinos Vogiatzis, Alexandros Skabardonis, Vassiliki Zafiropoulou, Science of the Total Environment, 712 (2020) .....	9
« Help or hindrance ? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles », Zia Wadud , Don MacKenzie , Paul Leiby , Transportation Research Part A, 2016.....	11
« Shared autonomous vehicle services : A comprehensive review », Santhanakrishnan Narayanan, Emmanouil Chaniotakis, Constantinos Antoniou , Elsevier, Transportation Research Part C, 2020	14
« Impacts of Autonomous Vehicles on Public Health: A Conceptual Model and Policy Recommendations », Soheil Sohrabi, Haneen Khreis, Dominique Lord , Sustainable Cities and Society, 2020 .....	20
<b>1. Analyse du cycle de vie</b> .....	24
« Deep decarbonization from electrified autonomous taxi fleets: Life cycle assessment and case study in Austin, TX », James H. Gawron, Gregory A. Keoleian, Robert D. De Kleine, Timothy J. Wallington, Hyung Chul Kim , Transportation Research Part D, 73 (2019).....	24
« Life cycle greenhouse gas impacts of a connected and automated SUV and van », Nicholas J. Kemp, Gregory A. Keoleian, Xiaoyi He, Akshat Kasliwal , Transportation Research Part D, 83 (2020) .....	27
« Use-stage life cycle greenhouse gas emissions of the transition to an autonomous vehicle fleet: A System Dynamics approach », Peter Stasinopoulos, Nirajan Shiwakoti, Marvin Beining, Journal of Cleaner Production, 278 (2021) .....	31
« The effect of digitalization in the energy consumption of passenger transport: an analysis of future scenarios for Europe », Michel Noussan, Simone Tagliapietra , Elsevier, 2020.....	34
<b>2. Emissions et polluants</b> .....	40
« A review on energy, environmental, and sustainability implications of connected and automated vehicles », M Taiebat, AL Brown, HR Safford, S Qu, M Xu , Environmental Science & Technology, 2018.....	40
« Quantifying the impacts of dynamic control in connected and automated vehicles on greenhouse gas emissions and urban NO2 concentrations », R Tu, L Alfaseeh, S Djavadian, B Farooq, M Hatzopoulou – Elsevier – Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019.....	41
« Energy saving potentials of connected and automated vehicles », Ardalan Vahidi , Antonio Sciarretta , 2018 .....	43
« Energy and emissions implications of automated vehicles in the U.S. energy system », Kristen E. Brown, Rebecca Dodder , Elsevier, 2019.....	45
« Can autonomous vehicle reduce greenhouse gas emissions? A country-level evaluation », F Liu, F Zhao, Z Liu, H Hao , Elsevier, 2019.....	49
<b>3. Trafic et congestion</b> .....	53

« Assessing the impacts of shared autonomous vehicles on congestion and curb use: A traffic simulation study in The Hague, Netherlands », I. Overtoom, G. Correia, Y. Huang, A. Verbraeck , Int. J. Transp. Sci. Technol., 2020.....	53
« Congestion Pricing in a World of Self-Driving Vehicles: An Analysis of Different Strategies in Alternative Future Scenarios », Michele D. Simoni, Kara M. Kockelman, Krishna M. Gurumurthy, and Joschka Bischoff, Transportation Research Part C, 2019 .....	57
« The benefits of autonomous vehicles for community-based trip sharing », M.H. Hasan, P. Van Hentenryck, Transp. Res. Part C, 2021 .....	57
« CoEXIST: Enabling “AutomationReady” Transport Planning », 2020 .....	58
« The Oslo Study – How autonomous cars may change transport in cities? », COWI and PTV Group, 2019.....	60

## Table des figures et des tableaux

<i>Figure 1 : Graphe catégorisant les facteurs identifiés ayant des impacts sur l'environnement selon leurs effets</i>	10
<i>Figure 2 : Mécanismes identifiés comme pouvant avoir des répercussions sur les émissions de GES et la consommation d'énergie</i>	12
<i>Figure 3 : Résumé des estimations des impacts de l'automatisation des véhicules sur chacun des mécanismes identifiés dans la revue de littérature</i>	13
<i>Figure 4 : Changements en termes énergétiques pour les différents scénarios</i>	13
<i>Figure 5 : Différents types de services de mobilité partagés automatisés dans la littérature</i>	15
<i>Figure 6 : Demande attendue des différentes études mentionnées - les lignes représentent les intervalles</i>	19
<i>Figure 7 : Graphique présentant les 14 conséquences des transports sur la santé</i>	22
<i>Figure 8 : Impacts du déploiement des véhicules totalement automatisés sur la santé. Les impacts sont catégorisés selon qu'ils sont positifs, négatifs ou incertains</i>	23
<i>Figure 9 : Neufs scénarios obtenus en combinant les cinq paramètres initiaux</i>	24
<i>Figure 10 : Énergie du cycle de vie des véhicules et émissions de GES par km en 2020 pour chacun des neuf scénarios de la flotte AT inclus dans l'étude de cas.</i>	25
<i>Figure 11 : Emissions mensuelles de GES pour chacun des scénarios sur la période de 30 ans. La légende est listée dans l'ordre décroissant des émissions.</i>	26
<i>Figure 12 : Emissions cumulées de GES pour chacun des scénarios sur la période de 30 ans</i>	26
<i>Figure 13 : Modèle, poids, demande d'énergie et émissions de GES pour chaque phase respective du cycle de vie associé aux composants du sous-système</i>	28
<i>Figure 14 : Emissions de GES pour chaque composant du véhicule électrique considéré</i>	28
<i>Figure 15 : Répartition des consommations en GES des composants du véhicule pendant les différentes phases du cycle de vie</i>	29
<i>Figure 16 : Emissions du véhicule en GES avec la contribution du sous-système automatisé</i>	29
<i>Figure 17 : Résultats des analyses pour les deux scénarios par rapport au scénario de base</i>	30
<i>Figure 18 : Combinaison des scénarios simulés</i>	31
<i>Figure 19 : Nombres d'adoptant des VA en pointillés et nombres de VA en circulation en traits pleins d'après les simulations</i>	32
<i>Figure 20 : Emissions de GES de la flotte et émissions de GES lors de la phase d'usage pour un véhicule léger</i>	33
<i>Figure 21 : Comparaison de la demande de transport par modes des différents scénarios</i>	36
<i>Figure 22 : Comparaison des émissions de CO2 par source pour les différents scénarios</i>	37
<i>Figure 23 : Comparaison des émissions par source dans les différents scénarios</i>	37
<i>Figure 24 : Résultats des analyses de sensibilité</i>	38
<i>Figure 25 : Description des scénarios de la simulation</i>	42
<i>Figure 26 : Utilisation de carburant pour les VL en fonction des 4 scénarios et des effets induits à l'horizon 2050 par rapport au scénario de référence</i>	47
<i>Figure 27 : Utilisation de carburant pour les PL en fonction des 4 scénarios et des effets induits à horizons 2030 et 2050 par rapport au scénario de référence – les points représentent les consommations en carburant lorsque soit la demande, soit l'efficacité sont modifiés</i>	48
<i>Figure 28 : Part de marché des VA suivant les scénarios considérés</i>	50
<i>Figure 29 : Total des véhicules-kilomètres parcourus par les flottes de VP dans les différents scénarios</i>	50
<i>Figure 30 : Émissions de GES de l'ensemble du parc de VP</i>	51
<i>Figure 31 : Analyse de sensibilité des changements dans les véhicules kilomètres parcourus pour les VA totalement automatisés, les taux de consommation de carburant VA et les émissions de GES.</i>	52
<i>Tableau 1 : Principales hypothèses sous-jacentes aux trois catégories d'usage des deux scénarios présentés</i>	35
<i>Tableau 2 : Hypothèses pour les analyses de sensibilité</i>	35
<i>Tableau 3 : Effets sur les résultats des hypothèses réalisées sur les paramètres du modèles</i>	36

## Etudes introductives

Avant de présenter les travaux relatifs aux trois aspects détaillés précédemment, certains articles plus généraux sur la prise en compte des enjeux environnementaux pour le développement des VA sont détaillés dans cette partie. Ces travaux n'ont pas toujours pour objectif d'étudier et d'analyser les impacts des véhicules automatisés sur l'environnement, ils expriment parfois les principales préoccupations à prendre en compte et les enjeux qui apparaissent avec la mobilité automatisée. Les scénarios présentés ne sont ni tous blancs, ni tous noirs mais tentent de proposer des évolutions possibles en fonction d'une part des réactions stochastiques des individus et d'autre part des politiques appliquées par les pouvoirs publics.

Cette annexe permet de mettre en avant le besoin de prise en compte des thématiques environnementales par les pouvoirs publics dans les politiques de mobilité et repose sur des revues de littérature.

L'article de Mora et al.<sup>2</sup> qui figure dans le rapport acceptabilité pour le véhicule automatisé du 3 juin 2021, peut aussi être pris comme article introductif de cette annexe. Il dresse un bilan des travaux de recherche sur les véhicules automatisés sur les cinq dernières décennies et met en lumière que la recherche sur les enjeux et impacts environnementaux de leur développement est lacunaire et très récente. Certaines études voient le jour mais sont incomplètes tandis que d'autres aspects sont encore trop peu analysés ni même mentionnés.

*« The Environmental and Resource Dimensions of Automated Transport: A Nexus for Enabling Vehicle Automation to Support Sustainable Urban Mobility », Alexandros Nikitas, Nikolas Thomopoulos and Dimitris Milakis, Annual Reviews, 2021*

L'étude suivante dresse un état des lieux des recherches et des principales préoccupations de l'automatisation des véhicules concernant l'environnement et le développement durable. Cet article est construit sur une revue de littérature à partir de mots clefs sur l'automatisation des transports en général. Dans la mesure où cet article s'intéresse à l'ensemble des mobilités et des modes de transport, ne sont présentés ici que les implications de la mobilité routière.

L'objectif de cette revue de littérature était de pouvoir **comprendre les implications théoriques et empiriques** concernant :

- les **opportunités environnementales et énergétiques** ainsi que les défis autour du développement à grande échelle du transport routier automatisé de personnes ;
- les **facteurs affectant l'environnement et les performances énergétiques** (consommation, ressources) de la mobilité automatisée ;
- le **lien entre l'automatisation des véhicules, la connectivité, l'électrification et la mobilité partagée** et ses conséquences sur le processus de transformation du système vers un régime plus respectueux du développement durable.

Les travaux s'organisent autour d'une large revue de littérature réalisée sur Scopus autour des mots clefs suivants : « autonomous vehicles and environment and city », « autonomous vehicles and environment and urban », « autonomous mobility and environment and city », « autonomous mobility and environment and urban », « autonomous cars and environment and city », « autonomous cars and environment and urban », « autonomous buses and environment and city », « autonomous buses and

---

<sup>2</sup> Mind the Gap: Developments in Autonomous Driving Research and the Sustainability Challenge, L. Mora, A. Panori, X. Wu, Journal of Cleaner Production, 2020

environment and urban ». **Un total d'une centaine d'articles des décennies précédentes a été récolté pour la mobilité routière automatisée.**

De manière générale, les véhicules automatisés et connectés peuvent avoir des conséquences significatives sur la possession, la congestion et les problèmes de trafic, les véhicules kilomètres parcourus, les émissions de polluants et les consommations d'énergie. Les conséquences sur le changement climatique sont incertaines en raison de la multitude de mécanismes qui entrent en jeu, dont les répercussions de chacun sont difficiles à estimer. De ce fait, **il n'existe pour l'instant pas de consensus sur les impacts des véhicules automatisés en termes de retombées environnementales.**

La retranscription des conclusions de cet article n'a pas pour objectif de donner autant de conclusions que le nombre d'articles qui figurent dans la revue de littérature, dans la mesure où les conclusions sont dépendantes des hypothèses formulées, des modélisations effectuées et des indicateurs observés.

Globalement, les impacts sur les émissions de gaz à effets de serre (GES) sont incertains et dépendront essentiellement du taux de pénétration des véhicules automatisés. A ce jour, le déploiement n'étant encore qu'à un stade préliminaire, l'impact sur les GES n'est pas significatif ; une réduction nette des émissions de GES ne pourra être observée qu'à partir d'un taux de pénétration supérieur et conséquemment aux impacts systémiques de l'automatisation (réduction de la congestion, augmentation des véhicules kilomètres parcourus, évolution des comportements de mobilité, type de modèle économique soutenu). **L'étude des implications du véhicule automatisé concerne aussi bien des impacts directs liés aux émissions de polluants par exemple, que des impacts indirects sur le système global comme les impacts sur le trafic et l'augmentation des déplacements.**

De plus, l'étude des implications environnementales dépend du niveau auquel les analyses se placent : soit au **niveau du véhicule seul**, soit au **niveau du système de transport** en incluant donc des composantes externes au véhicule (connectivité, supervision), au **niveau du système urbain** incluant l'ensemble du système de mobilité à l'échelle urbaine et les interactions entre ceux-ci, au **niveau de la société** en intégrant les comportements et tendances évolutives de ces comportements. L'automatisation a des impacts sur l'ensemble des quatre dimensions.

La suite de l'article se focalise sur des thématiques clefs de l'automatisation, qui ont un potentiel significatif sur les retombées environnementales.

### **La mobilité partagée**

La mobilité partagée pourrait permettre, dans le cas d'un usage responsable, de **combiner les avantages de l'automatisation avec ceux de la mobilité à la demande**, ce qui conduirait à réduire l'utilisation d'énergie et les émissions de GES au travers d'une adoption efficace. Un prérequis est néanmoins que les usagers acceptent de voyager avec des étrangers.

Les scénarios favorables se basant sur un système de bus à la demande automatisé prédisent une réduction des GES de 40 % et des kilométrages parcourus moyens de 30 %. Cependant des estimations plus pessimistes mettent en avant le fait que la réduction des coûts du transport pourrait conduire à une augmentation de la demande, accompagnée d'une augmentation des voyages à vide (dans le cas de taxi automatisés par exemple) ; le remplacement de 11 véhicules conventionnels pour un véhicule automatisé partagé pourrait aussi aboutir à 10 % de distance supplémentaire.

Une étude réalisée sur 40 experts des mobilités du futur met en exergue que les **enjeux environnementaux restent d'importance secondaire pour les acteurs comparés aux aspects technologiques, à l'acceptabilité des usagers et aux préoccupations réglementaires.**

## L'électrification des véhicules

L'automatisation des véhicules est souvent corrélée à l'électrification pour amplifier les retombées positives pour l'environnement. La source d'énergie alimentant le véhicule est un facteur clef des études : alimentation thermique, électrique ou hybride. Malgré de coûts importants, les véhicules électriques ont la prétention de **réduire la dépendance des véhicules routiers aux énergies fossiles et les émissions du trafic routier considérablement**. L'automatisation combinée à l'électrification peut être perçue comme un accélérateur de l'électrification.

En revanche, les **analyses du cycle de vie** qui comparent les trois modes d'énergie de la propulsion des véhicules mettent en avant des résultats mitigés : les véhicules automatisés et électriques étant plus consommateurs d'énergie en raison du changement des batteries et de la consommation supplémentaire due en partie à son poids, à sa résistance et à la transmission de données. Les **estimations annoncent en moyenne une augmentation de 35 % comparé aux véhicules conventionnels thermiques, de 22 % comparé aux véhicules hybrides et de 5 % comparé aux véhicules électriques**.

Néanmoins, d'autres études mettent en avant que le scénario de véhicule automatisé électrique pourrait conduire à une réduction approximative de 30 % des émissions de NOx et CO<sub>2</sub>, contre une augmentation de 2 % (NOx) et 1 % (CO<sub>2</sub>) pour le véhicule automatisé à propulsion thermique.

La combinaison de la mobilité automatisée partagée électrique pourrait permettre de combiner les effets positifs sur l'environnement.

## Bus automatisé

La littérature se focalise souvent sur la mobilité partagée mettant en scène des véhicules légers, mais s'intéresse encore peu à la mobilité collective en bus automatisés. La combinaison des bienfaits attendus de la mobilité partagée à bord de bus pourrait permettre de réduire les émissions de polluant et économiser de l'énergie. Si les bus étaient en plus électrifiés, les gains attendus pourraient être très intéressants à l'échelle du système global, que l'on s'intéresse aux effets directs ou bien aux effets indirects de la qualité de vie.

## Conclusion

Cette revue de littérature permet aux auteurs de mettre en avant quatre points clefs complémentaires afin d'espérer un développement des véhicules automatisés qui puisse répondre aux enjeux environnementaux :

- a) la connectivité qui permet aux véhicules automatisés de communiquer et de coopérer ;
- b) l'électrification qui rendrait l'automatisation indépendante de pétrole et moins polluante pourvu que l'électricité soit basée sur des sources d'énergie renouvelables ;
- c) la mobilité partagée qui permettrait des services à la demande et des services de mobilité collective pour transporter plus de personnes en même temps ;
- d) la multimodalité qui reflète l'abandon du transport uniquement routier (mise en perspective de l'usage complémentaire des modes de transport et notamment le ferroviaire pour le transport de masse).

Le schéma ci-dessous présente les liens et les interactions entre tous ces points et met également en perspective l'importance du développement technologique corrélé aux travaux réglementaires et politiques, aux dynamiques du marché, au système éducatif. Tous ces mécanismes définissent les principes et la nature du transport automatisé.



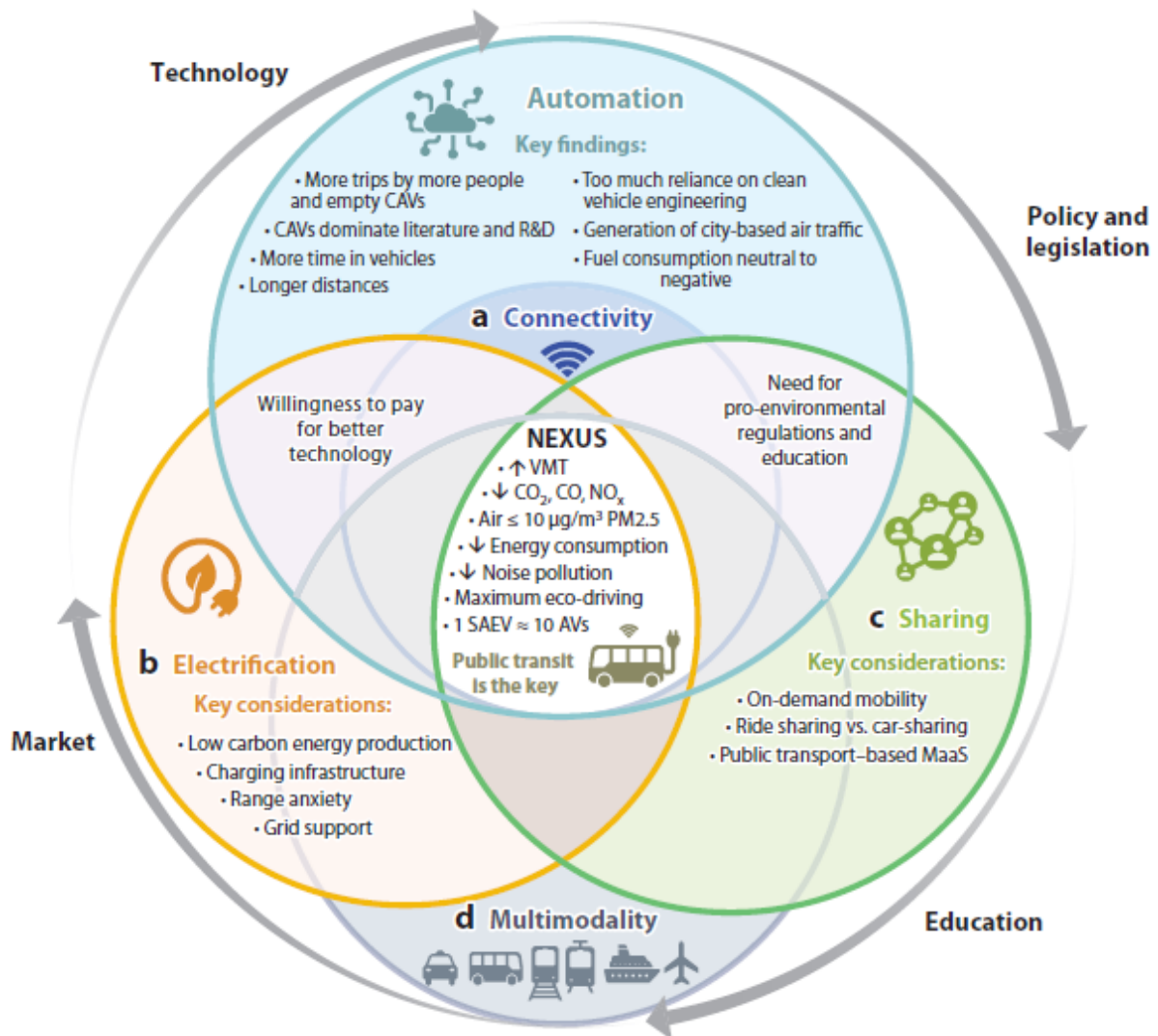


Figure 1 : Automatisation des véhicules et liens avec les quatre parties complémentaires

« *Connected & autonomous vehicles – Environmental impacts – A review* », Pantelis Kopelias, Elissavet Demiridi, Konstantinos Vogiatzis, Alexandros Skabardonis, Vassiliki Zafiropoulou<sup>3</sup>, *Science of the Total Environment*, 712 (2020)

Dans le même style que l'article de Mora et al., celui-ci dresse une revue de littérature des dix dernières années sur la recherche autour du véhicule automatisé. Deux types d'études sont incluses : celles qui utilisent des estimateurs logiques pour tirer des conclusions à propos des véhicules automatisés et connectés (VAC) et celles qui se servent du cadre mathématique et des données disponibles pour extraire des données chiffrées. Ainsi, dans cette revue de littérature, onze facteurs ont été trouvés comme affectant l'environnement. Ils ont été catégorisés selon la manière dont ils sont liés au véhicule, au réseau routier ou à l'utilisateur. La recherche est en effet basée sur le fait que les impacts environnementaux liés aux véhicules automatisés ont pour origine le véhicule lui-même, le système du réseau dans son ensemble et les usagers.

<sup>3</sup> Les auteurs appartiennent au département transport de la faculté d'ingénierie civile de l'université de Thessaly en Grèce et au département d'ingénierie civile et environnementale de l'université de Berkeley aux États-Unis.

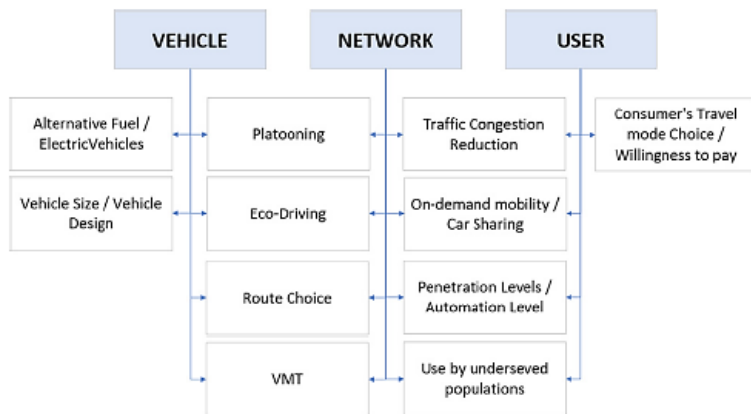


Figure 2 : Graphe catégorisant les facteurs identifiés ayant des impacts sur l'environnement selon leurs effets

La recherche s'est progressivement intéressée aux facteurs ayant des conséquences des véhicules automatisés sur l'environnement.

Les premières études s'intéressent à la **l'éco-conduite**, qui consiste à avoir une conduite plus douce et ainsi plus économe. D'après les différentes études réalisées, l'éco-conduite pourrait aboutir à des **réductions de la consommation en carburant assez intéressantes, variant entre 4 à 45 % selon les auteurs**, les hypothèses faites et surtout le type de conduite initiale de l'utilisateur.

Puis, le **platooning**, a très rapidement été perçu comme un enjeu majeur permettant de réduire l'impact environnemental du transport routier et notamment du transport de marchandises. Les estimations sont **entre 3 et 25 % d'économies de consommation de carburant** en fonction encore une fois des hypothèses et surtout du nombre de véhicules dans le peloton.

Le **design du véhicule** est aussi un facteur pris en compte pour la réduction des GES dans la mesure où des véhicules moins lourds seraient conçus. L'automatisation étant censée réduire le nombre d'accidents de la route, la conception des véhicules nécessiterait moins d'équipements de sécurité. Cette réflexion implique que la réduction du poids des véhicules sera d'autant plus importante que le niveau d'automatisation sera élevé. Les études montrent qu'une **réduction de poids de 10 à 25 % du véhicule, pourrait réduire la consommation de carburant de l'ordre de 4 à 7 %**.

Le **changement de source** pourrait également permettre de réduire considérablement les émissions des véhicules et donc de l'automatisation. L'électrification des véhicules et les gains associés impactent à la fois la consommation du véhicule ainsi que les émissions de GES lors de la production des batteries. Les **véhicules électriques (VE)** émettraient moins de GES que les véhicules conventionnels, produisant jusqu'à **50 % de GES en moins tout au long de leur cycle de vie** par rapport à une voiture conventionnelle. Le **recyclage des batteries** et les technologies d'amélioration des batteries permettraient d'atteindre une **réduction supplémentaire de 41 %**.

Un autre aspect indirect qui pourrait conduire à une réduction des émissions de polluants est le **reroutage** permis par la connectivité des véhicules à l'infrastructure, et aux autres véhicules. La connaissance des informations de trafic en temps réel, de la congestion et de pouvoir éviter ces zones permettrait **d'économiser jusqu'à 12 % la consommation de carburant**.

Un des effets les plus discutés des véhicules automatisés est la **réduction de la congestion** en étant capable de garder des distances plus faibles entre les véhicules et d'augmenter la capacité des voies. En fonction du **taux de pénétration des véhicules automatisés** dans la circulation, la **réduction des émissions de GES serait entre 15 et 60 %** dans ces zones congestionnées, où les émissions sont importantes.

La **mobilité à la demande et le covoiturage** peuvent avoir des effets très positifs sur les émissions de GES, en réduisant notamment le nombre de véhicules sur les routes ou en adaptant la taille des véhicules en fonction de la demande de transport. Par ailleurs, ces nouveaux services pourraient aussi

conduire à une augmentation de la demande et à une augmentation des émissions : c'est l'effet rebond. Ainsi, une augmentation des **kilomètres parcourus par véhicule** en raison d'une plus forte demande pourrait être un frein à la réduction des émissions et pourrait même les faire augmenter.

Enfin, le **choix des usagers** est crucial puisqu'il conditionne à la fois le taux de pénétration des VA dans la circulation et la demande des nouveaux services de mobilité. L'évolution du choix des usagers passe par une acceptabilité progressive et par leur propension à payer pour les véhicules automatisés.

Ainsi, cet article montre que les véhicules automatisés sont sur le point d'apporter de grands changements de la mobilité et que ces modifications ont aussi des effets non négligeables sur l'environnement (consommation d'énergie et émissions de polluants). Bien que la plupart des études prédisent des effets positifs en réduisant les émissions et la consommation des véhicules, il est important de noter que certaines implications visant plutôt à augmenter la demande de transport sont à prendre en compte. La recherche s'appuie de plus aujourd'hui sur des simulations et des modèles ainsi que sur des estimations et des prévisions, ce qui forme des scénarios incertains, qu'il convient de nuancer.

*« Help or hindrance ? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles », Zia Wadud<sup>4</sup>, Don MacKenzie<sup>5</sup>, Paul Leiby<sup>6</sup>, Transportation Research Part A, 2016*

L'article cherche à identifier les mécanismes à travers lesquels l'automatisation pourrait affecter les déplacements et la demande en énergie ainsi que les émissions de GES qui en résultent. L'étendue de chaque mécanisme est prise en compte et l'impact potentiel est quantifié sur une base commune : le pourcentage de changements qu'il devrait entraîner sur les émissions totales de GES des véhicules légers ou lourds aux États-Unis. Les auteurs s'appuient sur une **vaste revue de littérature**, la plus exhaustive possible en termes de thèmes abordés par les références utilisées.

Il s'agit d'une **étude qui présente les impacts produits par le système en termes d'émissions de GES** : l'article se concentre principalement sur la consommation d'énergie et sur les émissions liées aux déplacements.

Le **système technique impliqué est le véhicule seul**, il ne s'agit pas de tenir compte de l'infrastructure ou de la supervision. Par ailleurs, des estimations sont faites pour l'ensemble du réseau et non seulement à l'échelle du véhicule unitaire.

Les effets nets de l'automatisation sur les émissions sont l'objet des travaux. D'une part, **un scénario sur des véhicules partiellement automatisés** (de niveau SAE 2-3) est étudié, puis **des estimations sont réalisées avec des véhicules totalement automatisés** (de niveau SAE 4-5). Le taux de pénétration des véhicules automatisés dans les scénarios proposés est presque de 100 %, c'est pourquoi l'horizon envisagé est pris à 2050.

Enfin, des recommandations sont formulées concernant les domaines prioritaires pour la poursuite des recherches à destination des décideurs politiques.

#### **Périmètre de l'étude et limites :**

L'étude applique la méthode ASIF pour déterminer les émissions d'un mode de transport : niveau d'activité (A), partage modal (S), intensité d'énergie (I) et contenu du carburant en carbone (F). Ce principe explicite que les émissions produites par un mode de transport dépendent du niveau global des déplacements, de la fraction effectuée de ce déplacement par ce mode, de la consommation

---

<sup>4</sup> Centre de recherche intégrée sur l'énergie, Institut d'études sur les transports et École d'ingénierie chimique et des procédés, Université de Leeds, Royaume-Uni

<sup>5</sup> Département d'ingénierie civile et environnementale, Université de Washington, USA

<sup>6</sup> Laboratoire national d'Oak Ridge, USA

énergétique moyenne par kilomètre dans ce mode, et de l'intensité en carbone des carburants utilisés par ce mode de transport.

Le cadre de la méthode ASIF se prête à la modélisation des impacts de premier ordre et moins à la modélisation des effets non indépendants, des interactions d'ordre supérieur et des rétroactions d'équilibre. Par exemple, l'augmentation des déplacements augmentera la congestion, qui reprendra une partie de l'augmentation de la demande de déplacements, mais entraînera également une augmentation de l'intensité énergétique.

Ces nuances peuvent être perdues avec la formulation simple de l'ASIF, néanmoins elle reste utile pour agréger les principaux effets de l'automatisation.

Ci-dessous figurent les mécanismes directement liés à l'automatisation des véhicules identifiés par les auteurs à partir d'une vaste revue de littérature et qui pourraient avoir un impact sur les émissions et la consommation d'énergie.

Mechanisms	ASIF element	Vehicle (V) or network (N) effect	Direction of effect	Automation level	Penetration level	Comments
Congestion mitigation	I	N	-	1-4	Moderate to high	
Eco-driving	I	V + N	-	1-4	Any	Could have adverse network effect
Platooning	I	V + N	-	2-4	Any	Platoons affect road capacity
Higher highway speeds	I		+	1-4	Moderate to high	Step change for levels 3-4
De-emphasized performance	I	V	-	3, 4	Any	
Improved crash avoidance	I	V	-	2-4	Very high, near 100%	Safety allows size-weight reductions
Vehicle right-sizing	I	V + N	-	3, 4	High to very high	Smaller size affects congestion
Increased features	I	V	+	3, 4	Any	Further demand for comfort
Demand due to travel cost reduction	A, S		+	1-4	Any	Step change for levels 3-4
Demand from New user groups	A, S		+	3, 4	Any	
Changed mobility services	A, S		-	3, 4	Any	
Potential for low carbon transition	F	V+N	-	3, 4	High	Through automated refueling/charging

Figure 3 : Mécanismes identifiés comme pouvant avoir des répercussions sur les émissions de GES et la consommation d'énergie

### Les implications énergétiques et environnementales globales de l'automatisation à l'avenir dépendront :

- du degré de mise en pratique des algorithmes d'économie d'énergie et des changements de conception ;
- de la mesure dans laquelle l'automatisation entraîne des changements à l'échelle du système qui facilitent les économies d'énergie, par exemple le partage des véhicules, l'adoption de technologies de propulsion et de carburants alternatifs ;
- de la mesure dans laquelle la réduction de la charge du conducteur (et la réduction du coût du temps passé dans le véhicule) conduit les voyageurs particuliers à passer plus de temps et à parcourir de plus grandes distances dans leur véhicule, ou conduit à une plus grande activité commerciale sur les routes ;
- des réponses politiques au niveau fédéral, étatique et local.

### Scénarios :

A partir de la vaste revue de littérature qu'ils font, les auteurs construisent quatre scénarios possibles, du plus positif au plus négatif, permettant ainsi de proposer différentes évolutions possibles en fonction des implications induites par l'automatisation des véhicules.

La figure ci-dessous montre les évolutions possibles sur la consommation d'énergie ainsi que sur l'intensité énergétique à partir de la revue de littérature. Pour chacun des mécanismes identifiés, les estimations basse et haute figurent.

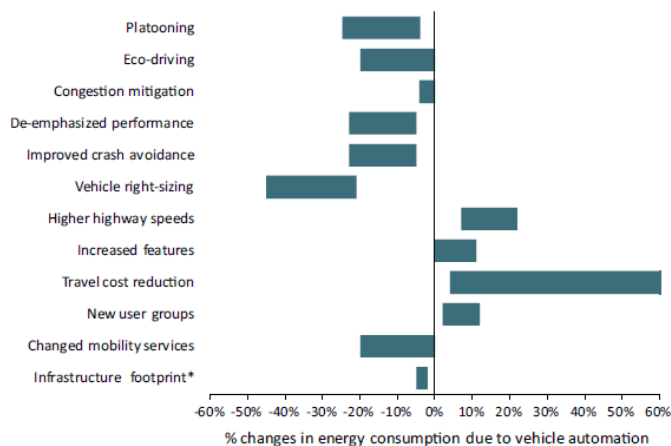


Figure 4 : Résumé des estimations des impacts de l'automatisation des véhicules sur chacun des mécanismes identifiés dans la revue de littérature

La figure ci-dessous montre les résultats des quatre scénarios.

(a) Dans le scénario optimiste, tous les avantages liés à l'intensité énergétique se concrétisent et la demande de transport n'augmente que légèrement, ce qui se traduit par une **réduction d'environ 45 % de la demande totale d'énergie pour le transport routier**. Étant donné que le transport routier est responsable de près des trois quarts de la consommation totale d'énergie des transports, cela représente une réduction d'environ 40 % de la demande totale d'énergie dans les transports.

(b) Dans le scénario moyen, les avantages en termes d'intensité énergétique sont partiellement compensés par une augmentation de la demande de transport, ce qui entraîne **une réduction modeste de 9 % de l'énergie totale du transport routier** (7 % pour l'ensemble de l'énergie du transport).

(c) Dans le scénario plutôt défavorable, tous les mécanismes envisagés produisent des effets maximaux, mais ceux-ci s'annulent pour laisser l'énergie du transport essentiellement inchangée.

(d) Le « cauchemar dystopique » est un scénario pessimiste dans lequel aucune amélioration de l'intensité énergétique ne se matérialise, mais les coûts et les temps de trajet diminuent, la demande de transport augmente de manière significative, et la vitesse des autoroutes accroît l'intensité énergétique, faisant plus que doubler la demande d'énergie pour les transports. Un tel scénario est hautement improbable étant donné les autres contraintes qui limiteront éventuellement une telle augmentation, mais il est tout de même utile de souligner les augmentations potentielles de la demande d'énergie dues à l'automatisation.

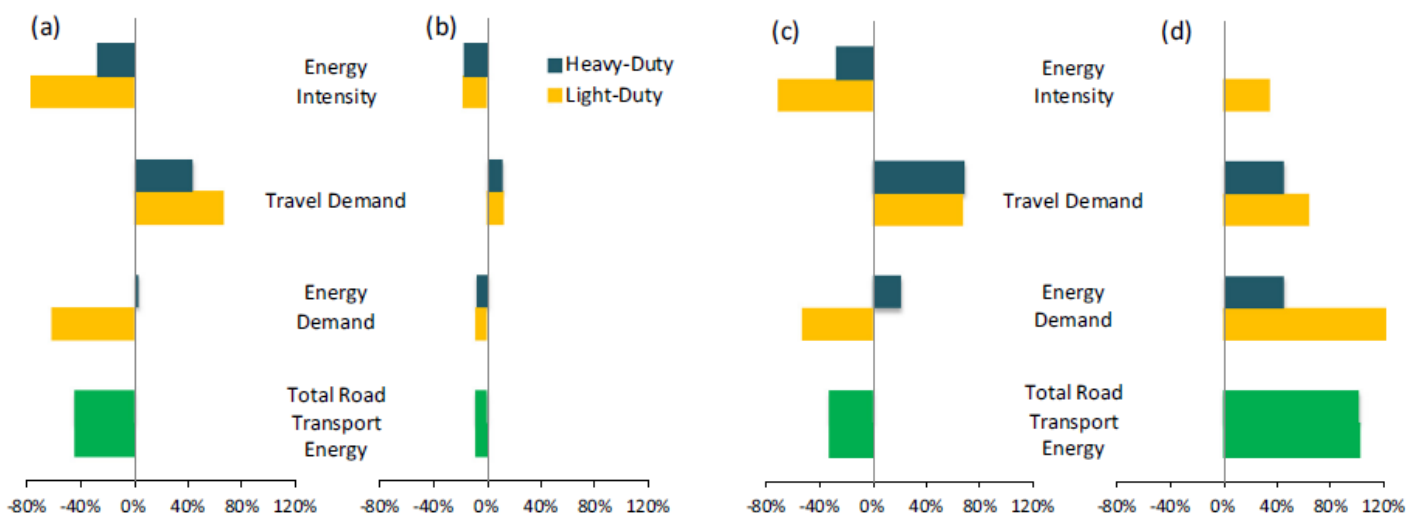


Figure 5 : Changements en termes énergétiques pour les différents scénarios

## Recommandations :

- Les responsables politiques devraient envisager des actions précoces pour atténuer les effets négatifs possibles de l'automatisation des véhicules, tout en encourageant la réalisation de ses avantages énergétiques potentiels.
- Les réglementations visant à imposer et à normaliser les capacités et les protocoles de communication V2X peuvent être un catalyseur nécessaire notamment pour rendre le platooning efficace.
- Il est nécessaire de clarifier les mécanismes par lesquels les constructeurs peuvent générer de manière fiable des améliorations hors cycle et obtenir des crédits vérifiables pour les technologies d'automatisation partielle des véhicules.
- Les responsables politiques locaux peuvent souhaiter examiner les avantages en termes d'énergie et de demande de transport qu'il y aurait à autoriser des services d'auto-partage à fonctionner sur leur territoire. Le fonctionnement des opérateurs de mobilité à la demande offre également l'occasion d'apprendre et de mieux se préparer à un avenir où ces services seront répandus.
- Le contrôle des émissions des véhicules et les réglementations associées devront peut-être être reconsidérer si l'automatisation induit une plus grande demande.
- S'il est prématuré d'assouplir les exigences de résistance aux chocs pour les véhicules automatisés à l'heure actuelle, dans la mesure où les promesses de l'automatisation en termes de sécurité ne sont pas encore atteintes, les pouvoirs publics devraient surveiller les taux d'accidents des véhicules hautement automatisés et envisager des changements appropriés à l'avenir.

« *Shared autonomous vehicle services : A comprehensive review* », Santhanakrishnan Narayanan, Emmanouil Chaniotakis, Constantinos Antoniou<sup>7</sup>, Elsevier, *Transportation Research Part C*, 2020

Cet article s'apparente à une **revue de littérature retraçant l'évolution des travaux sur les services de mobilités automatisés** à l'image de la revue réalisée par Mora et al. Elle se base sur un nombre important d'études réalisées entre 1950 et aujourd'hui mais contrairement à Mora et al., Narayanan et al. s'intéressent plus aux **impacts et aux externalités du déploiement et du développement des véhicules automatisés** qu'aux thèmes étudiés et aux évolutions des recherches effectuées.

L'objectif de cet article est de fournir une revue de littérature des études pertinentes dans le domaine des services de mobilité automatisés partagés, incluant notamment des anticipations de modèles économiques, l'identification d'impacts, des estimations de la demande ainsi que des recommandations politiques.

L'étude s'intéresse aux **véhicules automatisés de niveaux SAE 4 et 5**, appelés véhicules hautement et totalement automatisés en France. Les articles alimentant la revue de littérature sont tirés de Scopus, à partir de 13 mots clefs (*shared autonomous, autonomous mobility(-) on(-) demand, autonomous taxi(s), shared automated, autonomous fleet, autonomous shared, driverless taxi(s), autonomous vehicle sharing, robo(-) taxi(s), autonomous mobility service(s), automated electric taxi, autonomous electric taxi, shared self(-) driving*), dans les publications entre 1950 et 2019.

Ces travaux sont résumés en cinq parties : 1. Typologie des études, 2. Identification des différents composants impliqués dans la modélisation des services de transport partagés automatisés et des méthodes utilisées, 3. Catégorisation des impacts attendus de ces services, 4. Evaluation de la demande attendue, 5. Réflexion sur les recommandations politiques et opérationnelles du développement et du déploiement de ces services.

---

<sup>7</sup> Les auteurs appartiennent à l'université technique de Munich en Allemagne et à l'Institut d'énergie MaaSLab de Londres.

## Typologie des études

Le document s'intéresse au concept du véhicule automatisé depuis le début des années 1920 afin de remonter aux premiers véhicules et premiers développements, en passant par les incontournables DARPA Challenge respectivement en 2004/2005 et 2007. Ces challenges ont permis de démocratiser le « véhicule autonome » ; entre 2012 et 2014, les expérimentations ont subi une augmentation de 65 % à travers le monde. Le **premier concept combinant du transport partagé et du véhicule automatisé est né en France au début des années 1990 par l'INRIA<sup>8</sup> et l'INRETS<sup>9</sup>**. La figure ci-dessous présente les types de services étudiés dans la littérature par catégories.

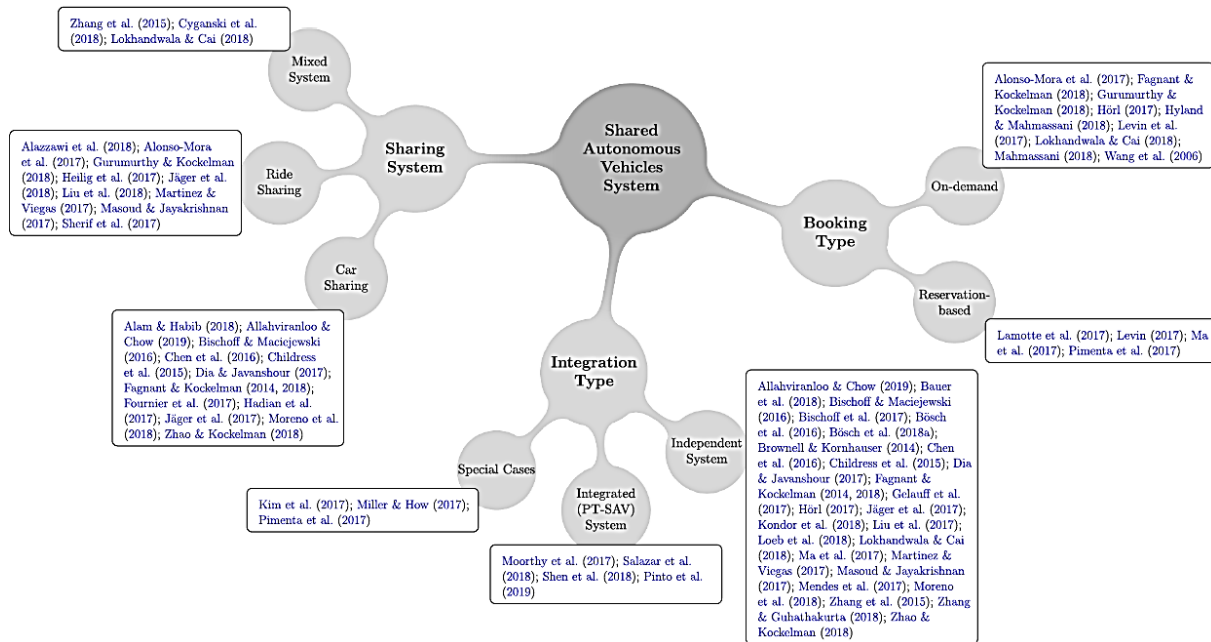


Figure 6: Différents types de services de mobilité partagés automatisés dans la littérature

Les services de **mobilité automatisés et partagés** peuvent être divisés en trois catégories : les services **à la demande (réservation en temps réel)**, les services de **réservation (type taxis)** et les **systèmes partagés**. Les études de services à la demande sont les plus répandus car sont les scénarios les plus recherchés. Puis, les services de mobilité partagés peuvent être catégorisés entre le **covoiturage**, la **location partagée** et les services mixtes dans lesquels les usagers peuvent choisir entre l'un et l'autre. En ce qui concerne le **type d'intégration de ces systèmes**, on distingue les services indépendants (sans connexion avec les autres modes), qui peuvent ensuite être divisés en deux catégories selon qui détient le véhicule (une entreprise privée comme Uber ou Lyft ou bien un système groupé par exemple dans lequel un véhicule est propriété de plusieurs ménages) ; les services intégrés dans l'offre des transports en commun notamment pour la desserte du premier et du dernier kilomètre ou en complément du transport en commun dans les zones de faible demande (université ou campus par exemple).

Les types de services de mobilité automatisés identifiés dans les études sont : le **système de taxis**, les **taxis partagés**, le **module pour desservir une zone** et le **module sur parcours prédéfini**. Le premier correspond au système indépendant, le deuxième est équivalent au système de covoiturage indépendant tandis que les deux derniers s'apparentent à des services de transport public (compléments au réseau principal).

<sup>8</sup> Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique

<sup>9</sup> Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité, aujourd'hui Université Gustave Eiffel

En termes de **rentabilité économique et de modèle économique**, les systèmes peuvent être regroupés en trois types : la location à court-terme, les services point à point et les services mixtes. Pour la location à court terme, l'utilisateur a le véhicule pour une durée déterminée et peut se déplacer où il veut. Dans le cas d'un service point à point, l'utilisateur est transporté d'un point de départ fixe à un point d'arrivée fixe. Enfin, les services mixtes sont décrits comme une combinaison des deux précédents.

Concernant le **modèle économique**, les services peuvent être répertoriés selon qu'ils ont un **prix fixe ou dynamique**. Dans le cas d'un tarif fixe, celui dépend soit du trajet effectué (kilomètres parcourus) ou du temps de trajet. A l'inverse, dans le cas d'un tarif dynamique, le prix peut être dépendant du point d'origine ou du point d'arrivée ou encore de la période de la journée et varie en fonction de l'offre et de la demande. Les services à tarif fixe sont assimilés aux services de transport à la demande tandis que les services à tarifs dynamiques sont assimilés aux services à réservation.

Pour le cas des services de transport automatisés, le covoiturage conventionnel et la location partagée sont souvent non dissociés ; dans la suite de l'article les deux sont considérés sans distinction par le terme mobilité partagée. Dans la suite de cet article, on s'intéresse à la mobilité partagée automatisée pour un usage point à point (tracé prédéfini).

### **Composants des modèles des services de transport partagés automatisés**

Les composants des modèles des services partagés automatisés sont complexes et nombreux. Dans les études, les auteurs se focalisent sur certains d'entre eux afin de maîtriser la complexité et les estimations. Ces composants sont : a) **la demande**, b) **la flotte**, c) **le trafic**, d) **l'affectation des véhicules**, e) **la redistribution des véhicules**, f) **le tarif**, g) **le rechargement de batteries des véhicules** et h) **le stationnement**.

La **demande** se base sur des estimations de demande dans la zone étudiée et sur la part modale des services de mobilité partagée automatisés. Les trajets sont alors générés à partir des données d'études de déplacement, des modèles de transport, des données des véhicules et de la localisation des smartphones ou encore des bases de données des taxis. La demande est souvent considérée constante pour les services de mobilité partagée à partir des estimations de demande et de la part modale représentée.

En ce qui concerne la **flotte**, les études visent principalement à estimer la taille de la flotte nécessaire pour répondre à une demande donnée et à déterminer la position initiale des véhicules. Les tailles de flottes idéales sont souvent déterminées en appliquant des algorithmes et des modèles de choix. De même, le dimensionnement des flottes aboutit souvent à des tailles constantes dans la littérature.

L'**affectation du trafic** est utilisée pour extraire les flux de trafic et les temps de trajet entre les paires origine/destination. Dans les cas simples, le temps de trajet est communément fixé et calculé soit comme étant le temps de trajet en situation fluide multiplié par un coefficient représentant le taux de congestion, soit le temps de trajet moyen entre le temps de trajet en heure creuse et celui en heure de pointe, soit une valeur horaire trouvée via Google Maps. La modélisation des affectations des services à la demande automatisés est souvent faite par simulation.

L'**affectation des véhicules** permet d'assigner un véhicule à un utilisateur, qui peut être basée soit sur des algorithmes d'optimisation ou des algorithmes heuristiques. Souvent, le véhicule le plus prêt est assigné à l'utilisateur, l'objectif étant toujours de limiter le temps d'attente des usagers.

La **redistribution des véhicules** consiste à transférer des véhicules des zones de faible demande vers des zones de forte demande. En effet, la littérature montre que la redistribution des véhicules a un impact significatif sur l'efficacité du service et de l'usage de la flotte. En revanche, cela conduit à une augmentation des kilomètres parcourus et parallèlement à une augmentation des trajets réalisés à vide, qui peut être limitée par la stratégie de redistribution choisie.



Le **prix** attribué au service dépend à la fois des estimations des paramètres spatiaux (sur les trajets et les paires origine/destination) et temporels (périodes de la journée). La littérature étudie la variabilité des prix en fonction de la congestion et les stratégies pour diviser le prix du trajet entre les usagers lors de trajets communs. Les modèles plus poussés peuvent prendre en compte le niveau de service de l'infrastructure dans le prix du trajet.

Le **rechargement des batteries** concerne la vérification du niveau des batteries des véhicules électriques et désigne les stratégies de rechargement afin de conserver un bon niveau de service. La littérature propose des stratégies de parcours et de lieu de chargement pour les véhicules et pour garder un service efficace. Utiliser un modèle d'optimisation énergétique pour évaluer l'impact de la recharge des véhicules à des moments optimaux est une stratégie efficace et lorsque le taux de pénétration des véhicules automatisés est élevé, le gain environnemental est bénéfique (meilleur que la taxe carbone).

Le stationnement des véhicules implique d'estimer les besoins en stationnements et de déployer des stratégies de stationnement des véhicules.

Ces éléments issus des revues de littératures sont définis dans le cadre des études des impacts des services de mobilité automatisés.

### **Impacts**

Les impacts du déploiement des services partagés automatisés sont multiples et encore controversés, toutes les études n'ayant pas les mêmes résultats.

Les **impacts sur le trafic** sont assez différents entre les études puisque d'un côté, les services de mobilité partagée sont susceptibles d'augmenter la congestion et d'un autre côté, ils sont susceptibles de réduire le trafic. Les résultats des études dépendent essentiellement des hypothèses formulées et notamment du taux d'occupation des véhicules, de la densité de la demande, des typologies du réseau considéré et des algorithmes d'affectation et de redistribution des véhicules. Une étude<sup>10</sup> montre même que l'intégration de ces services en complément des transports en commun, pourrait réduire drastiquement le trafic.

Sur le **volet de la sécurité**, les études sont unanimes et traduisent des résultats positifs de réduction de l'accidentalité. La littérature se base soit sur le retour d'expérience d'autres secteurs<sup>11</sup>, soit sur les données d'accidentalité en estimant qu'à minima, l'automatisation pourrait réduire de 40 % l'accidentalité en supprimant les accidents dus à l'alcool, à la distraction du conducteur, à la fatigue et à la consommation de drogues. Cependant, les accidents dus aux dysfonctionnements et en particulier aux défaillances du système ne sont aujourd'hui pas quantifiés, ce qui donne des estimations incertaines sur l'évolution de l'accidentalité. Les questions de cybersécurité sont aussi incertaines et les actes de malveillance sur les systèmes sont encore très peu connus.

Au **niveau des comportements des usagers** sur les trajets effectués, une étude réalisée à Seattle<sup>12</sup> montre une légère augmentation de la longueur des trajets réalisés (à l'exception d'un scénario visant à augmenter le tarif du service). De manière générale, les études montrent une augmentation de la longueur des trajets pour une réduction des coûts. De plus, bien que la valeur de remplacement soit incertaine, il est affirmé que les services de mobilité partagés automatisés ont le potentiel de réduire la part des véhicules personnels lorsqu'ils sont accompagnés de politiques fortes. Certaines études<sup>13</sup> affirment même que ces nouveaux services pourraient fournir une mobilité équivalente à la mobilité particulière et pourraient remplacer les véhicules conventionnels entre 67 et 90 %.

---

<sup>10</sup> Salazar et al, 2018

<sup>11</sup> Keeney, 2017 se base sur le retour d'expérience de l'industrie du transport aérien.

<sup>12</sup> Childress et al, 2015

<sup>13</sup> Milakis et al, 2107

Une **augmentation des kilomètres parcourus** est souvent une observation faite dans les études comme déjà évoqué, la principale raison étant la circulation à vide des véhicules entre les courses. Cependant, une réduction des kilomètres parcourus peut être observée dans le cas où le modèle de taxis actuel était remplacé par un modèle de partage du véhicule entre les usagers<sup>14</sup>. La littérature<sup>15</sup> montre également que l'utilisation d'un même véhicule partagé automatisés entre plusieurs usagers est plus soutenable que la simple automatisation d'une flotte de taxis, mais que celle-ci n'a pas des meilleurs résultats que le covoiturage avec des véhicules conventionnels (parcourir des kilomètres à vide par les véhicules de la flotte étant le principal point négatif). Dans la plupart des études, les impacts liés au changement de la flotte de véhicules et aux kilomètres parcourus sont souvent les plus détaillés.

En termes de **modèle économique**, les études<sup>16</sup> n'aboutissent pas aux mêmes estimations tarifaires. Cependant, la plupart met en avant que la réduction des prix n'est pas évidente car les économies réalisées grâce à la suppression des chauffeurs seront remplacées par une augmentation des coûts d'exploitation et des taxes supplémentaires afin de compenser la perte des taxes provenant des taxis conventionnels. En revanche, l'utilisation des services de transport automatisés partagés en complément des transports en commun pourraient faire baisser les coûts de transport individuels.

Concernant les **infrastructures de transport**, l'automatisation est censée permettre une augmentation de la capacité des voies, notamment en réduisant les interdistances. De plus, plus le taux de pénétration serait important, plus l'augmentation de la capacité pourrait être importante<sup>17</sup>. La communication entre les véhicules pourrait également permettre d'augmenter la capacité des voies. L'utilisation de l'espace est souvent un impact qui est étudié du point de vue des emplacements de stationnements nécessaires : l'automatisation est souvent synonyme d'un besoin plus faible en zones de parking<sup>18</sup>. De plus, l'automatisation au profit des services de transport partagés pourraient aboutir à une urbanisation plus intense en raison de l'espace dégagé en centre-ville par la suppression de zones de parking (cet espace libéré dépendant directement du taux de pénétration de ces véhicules dans la flotte de véhicules).

Enfin, le dernier impact concerne **l'environnement et les conséquences écologiques du déploiement** de ces véhicules. Ces **impacts sont directement corrélés à l'utilisation de véhicules électriques, ce qui conduirait à une diminution de la consommation en énergies**<sup>19</sup>. Les études relatives aux **émissions montrent également que les véhicules électriques utilisés dans ces systèmes pourraient réduire les émissions de gaz à effets de serre**<sup>20</sup>. En lien avec les précédentes affirmations, une **intégration des services partagés dans l'offre de transports en commun aurait également un impact positif sur les émissions, même si les kilomètres parcourus sont pourtant supérieurs**.

---

<sup>14</sup> Lokhandwala and Cai, 2018

<sup>15</sup> Bischoff et al, 2017 ; Soteropoulos et al, 2018 ; Vosooghi et al, 2019

<sup>16</sup> Bauer et al., 2018; Chen et al., 2016; Corwin et al., 2015; Keeney, 2017; Litman, 2018; Walker and Marchau, 2017

<sup>17</sup> Talebpour and Mahmassani, 2016

<sup>18</sup> (Dia and Javanshour, 2017; Fournier et al., 2017; International Transport Forum, 2015; Keeney, 2017; Kondor et al., 2018; Lang et al., 2018; Vleugel and Bal, 2018; Zhang et al., 2015; Zhang and Guhathakurta, 2017

<sup>19</sup> Arbib and Seba, 2017; Bauer et al., 2018; Fagnant and Kockelman, 2018; Fulton et al., 2017; Jäger et al., 2018; Moorthy et al., 2017; Ross and Guhathakurta, 2017

<sup>20</sup> Arbib and Seba, 2017; Bauer et al., 2018; Fagnant and Kockelman, 2014; Fournier et al., 2017; Fulton et al., 2017; Greenblatt and Saxena, 2015; Lokhandwala and Cai, 2018; Martinez and Viegas, 2017; Salazar et al., 2018; Vleugel and Bal, 2018

## Evaluation de la demande

L'évaluation des impacts des services de mobilité partagés automatisés est fortement dépendante de la demande et de l'attraction de ces services auprès des usagers.

Concernant le taux de pénétration, la plupart des études convergent vers des taux de pénétration inférieurs à 100 %. Les évaluations sont réalisées pour les différentes utilisations possibles des services de mobilité partagés automatisés, à différents horizons. Plus généralement, le développement de la mobilité automatisée est soumis au développement d'autres secteurs comme le secteur de la cybersécurité, l'utilisation des données, les mesures de sécurité routière.

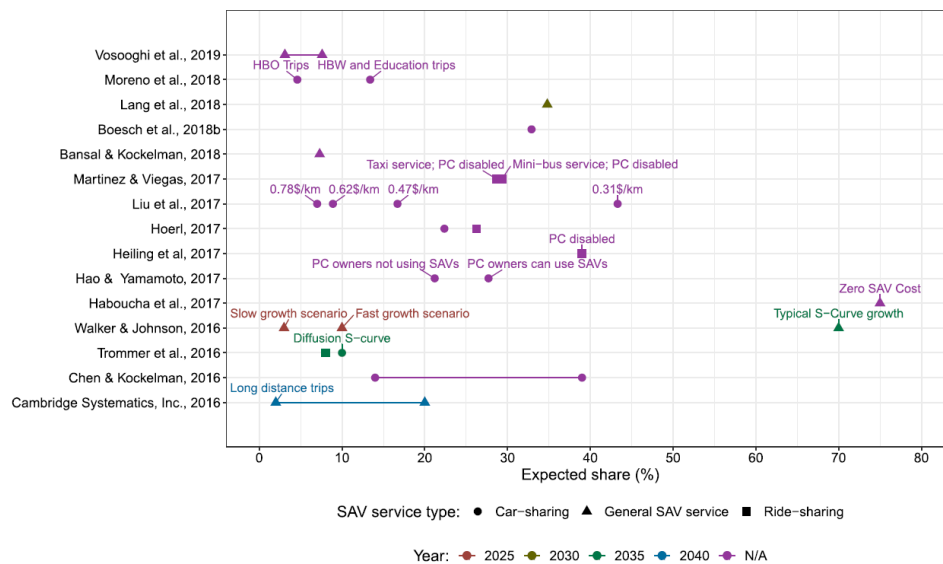


Figure 7 : Demande attendue des différentes études mentionnées - les lignes représentent les intervalles

La littérature indique couramment que les services de mobilité partagés attireront les utilisateurs des modes de transport durables. Dans les aires urbaines, les utilisateurs des transports en commun et de la voiture particulière pourront être captivés par ces services, ce qui sera moins le cas dans les zones plus interurbaines voire rurales. En termes socio-économiques, les personnes les plus jeunes et les plus diplômées sont plus susceptibles d'adopter ces services, tandis qu'à l'inverse les moins acclimatés aux nouvelles technologies, les moins urbains et les plus riches sont moins susceptibles d'abandonner le véhicule particulier pour les services partagés automatisés.

**En terme de durabilité, ces services sont jugés efficaces et durables lorsqu'ils sont déployés à des endroits où la demande est éparpillée et plutôt contrôlée, contrairement aux pôles de demande forte et continue.** En revanche, d'un point de vue des opérateurs, ces localisations seront moins profitables et résulteront à une quantité plus forte de kilomètres parcourus. L'acceptation des services de mobilité partagée entre particuliers a actuellement un niveau plus faible que les services de taxis autonomes.

L'acceptation des services de mobilité partagés automatisés est soumise à différents facteurs. Comme évoqué dans les revues acceptabilité du véhicule automatisé, les inquiétudes sur la sécurité représente un facteur crucial dans leur adoption. Pour les services partagés automatisés, les heures exactes de prise en charge à l'origine et à l'arrivée sont des facteurs plus importants que le trajet ainsi que les co-passagers. Les usagers ne sont pas prêts à payer plus cher pour de l'individualisation ou des services type connexion. En revanche, la variable liée au prix est importante pour les usagers, qui y sont sensibles.

## Politiques de déploiement

L'article présente la valeur des recommandations politiques dans le déploiement de ces services. L'amélioration de la technologie n'est pas le déclencheur de leur utilisation mais une brique qui doit être accompagnée d'une politique forte pour sensibiliser d'une part et inciter en facilitant son utilisation. **Ce sont les choix politiques qui vont orienter les utilisations et qui vont permettre l'atteinte des objectifs, notamment concernant le développement durable.** La prise en compte des enjeux environnementaux passe par une évolution des comportements de mobilité des populations notamment.

Bien que cet article ne se concentre pas directement sur les impacts des véhicules automatisés et de leur déploiement par une étude ou un modèle complet, elle permet d'avoir une première revue de littérature qui estime les impacts globaux de leur déploiement. Les articles présentés dans la suite de ce document dressent des modèles et des analyses à partir des facteurs mis en évidence dans cet article. De plus, la revue de littérature sur la mobilité partagée s'aligne avec la politique de déploiement permise aujourd'hui par le cadre réglementaire français.

*« Impacts of Autonomous Vehicles on Public Health: A Conceptual Model and Policy Recommendations », Soheil Sohrabi, Haneen Khreis, Dominique Lord <sup>21</sup>, Sustainable Cities and Society, 2020*

Alors que les impacts de l'automatisation des véhicules sont relativement étudiés en économie, sur l'environnement et sur la société, les avantages et les inconvénients sur **la santé publique** ne sont encore que très peu étudiés. Cet article se base sur une **revue de littérature** très large afin de construire un modèle permettant d'identifier les potentiels impacts des véhicules automatisés sur la santé dans les villes.

Le modèle dont il est question résume d'abord les **impacts de l'automatisation du système des transports en 7 points** : infrastructures de transport, utilisation du sol et du bâti, flux de trafic, choix modaux des déplacements, équité en matière de transport, emplois du secteur des transports et sécurité routière. Les implications et les conséquences étudiées englobent **l'intégralité du système de transport** et non uniquement le véhicule seul.

Puis les **facteurs de risque des transports affectant la santé** sont présentés. Enfin, des passerelles entre l'automatisation et la santé publique sont réfléchies à partir d'une consolidation des deux premiers points.

Cet article étudie les **implications de santé publique du déploiement en milieu urbain des véhicules totalement automatisés** (plus couramment référencés par la classification SAE correspondant à du niveau 5).

La vaste revue de littérature situe les travaux actuels par rapport à l'existant, en rappelant que de nombreux travaux ont déjà vu le jour en ce qui concerne les impacts des véhicules automatisés sur les flux de trafic, sur l'efficacité des systèmes de transport et sur la sécurité routière. Les impacts de l'automatisation de la mobilité ne sont pas uniquement répercutés sur les questions de transport mais ont des impacts directs sur les questions économiques, environnementales, sociétales et de santé publique. Certaines externalités de l'automatisation des véhicules ont déjà fait l'objet de recherches et de travaux. En revanche, aucune revue n'existe sur les impacts de l'automatisation des véhicules sur les questions de santé publique tandis qu'un nombre limité d'études y font référence. Cette revue de littérature a permis aux auteurs d'identifier trois manques de la littérature :

---

<sup>21</sup> Les auteurs appartiennent au département d'ingénierie civile et environnementale de l'université du Texas et à l'Institut des transports du Texas (TTI).

- les principales études restent spéculatives et dressent finalement une opinion des auteurs, plutôt que de présenter de réelles études qualitatives ou quantitatives ;
- la nature et l'étendue des impacts de l'automatisation sont très incertaines dans la mesure où les évolutions dues à leur déploiement demeurent incertaines ;
- une incohérence existe entre les implications sanitaires identifiées dans les études, qui peut être due à un manque de référentiel pour identifier les impacts liés à la santé.

### **Modifications potentielles du secteur des transports après déploiement des véhicules automatisés**

Le déploiement des véhicules totalement automatisés sera à l'origine de profonds changements en termes de déplacements, de comportements de conduite, d'infrastructures de transport. La mobilité va certainement évoluer avec des attentes différentes en termes de confort, de tarification ; la valeur du temps pourrait être impactée aussi bien que le rapport à la possession d'un véhicule personnel. De même, le développement d'une infrastructure plus connectée et capable d'accueillir ces nouveaux véhicules sera à l'origine de profonds changements en termes de comportements de conduite. Les auteurs ont construit ainsi 7 catégories d'impacts liés à la mobilité et au transport.

- Sécurité routière** : ce point étant bien connu et même un des fondements du développement de la mobilité automatisée puisque la « voiture autonome » serait censée réduire drastiquement le nombre d'accidents de la route en éliminant les erreurs humaines. Cependant, les véhicules automatisés vont apporter de nouveaux défis en termes de sécurité, notamment par des problèmes liés à des défaillances ou des dysfonctionnements du système (capteur défaillant ou occulté, mauvaise interprétation des données par le système). Les aspects de cybersécurité sont également à considérer comme une problématique de sécurité, au même titre que le fameux dilemme macabre en cas d'accident non évitable.
- Flux de trafic** : les véhicules automatisés devraient avoir des conséquences sur les flux de trafic et sur les comportements de conduite en induisant des comportements plus doux et en supprimant certaines manœuvres. Les distances inter-véhiculaires pourraient être réduites permettant d'augmenter la capacité de l'infrastructure. De meilleurs choix d'itinéraires et de meilleurs comportements de conduite pourraient également conduire à des réductions de la consommation d'énergie et de gaz à effets de serre.
- Choix modaux** : le développement de la mobilité automatisée pourrait avoir pour conséquence un fort report modal des transports en commun ou des mobilités douces vers la voiture personnelle (estimation d'un report modal de 26 % pour un taux de pénétration de 90 % de véhicules automatisés dans la circulation dans la ville d'Austin, au Texas). Couramment appelé l'effet rebond, les véhicules automatisés pourraient être à l'origine d'une augmentation de la demande de transport, notamment par une accessibilité accrue (personnes âgées, personnes à mobilité réduite ou handicapées, personnes ne disposant pas de véhicule personnel).
- Utilisation de l'espace et du bâti** : en permettant des déplacements plus confortables et une meilleure accessibilité, les véhicules automatisés pourraient favoriser des déplacements plus longs et donc favoriser un étalement urbain. De plus, la possibilité de circuler sans passager à bord crée un besoin de place supplémentaire dans l'espace urbain et nécessite d'aménager de nouveaux espaces de parking et des stationnements, qui peuvent cependant être localisés plus loin des hyper-centres. De ce fait, les villes pourraient se densifier et ainsi favoriser les déplacements actifs.
- Infrastructure de transport** : l'infrastructure a besoin d'être mise aux normes afin de permettre le bon fonctionnement des véhicules automatisés, la signalisation doit également être adaptée. Les besoins en nouvelles infrastructures pourraient être limités notamment par l'augmentation des capacités des voies ; qui pourrait être toutefois contrebalancée par une augmentation de la demande de trafic.

- vi. **Emplois** : la question des emplois est centrale quand il s'agit d'automatisation puisqu'il s'agit de permettre la circulation de véhicule sans conducteurs. Ainsi, des questions se posent sur la reconversion professionnelle des chauffeurs routiers, des conducteurs de bus par exemple. Un véritable débat sociétal, répercuté sur tout un secteur est lancé.
- vii. **Équité dans les transports** : l'équité permise par le développement de la mobilité automatisée en rendant la mobilité accessible à des catégories de personnes qui aujourd'hui n'y ont pas accès est un défi majeur qui prône en faveur de l'automatisation. En revanche, la mobilité automatisée individuelle ne sera réservée qu'à une catégorie de personnes aisées dans un premier temps, en raison des forts coûts qui lui sont applicables.

### Transport et santé publique

L'augmentation des transports en milieu urbain est à l'origine d'un certain nombre de conséquences de santé publique. La littérature a identifié **14 conséquences des transports sur la santé**, représentés dans le graphique ci-dessous.

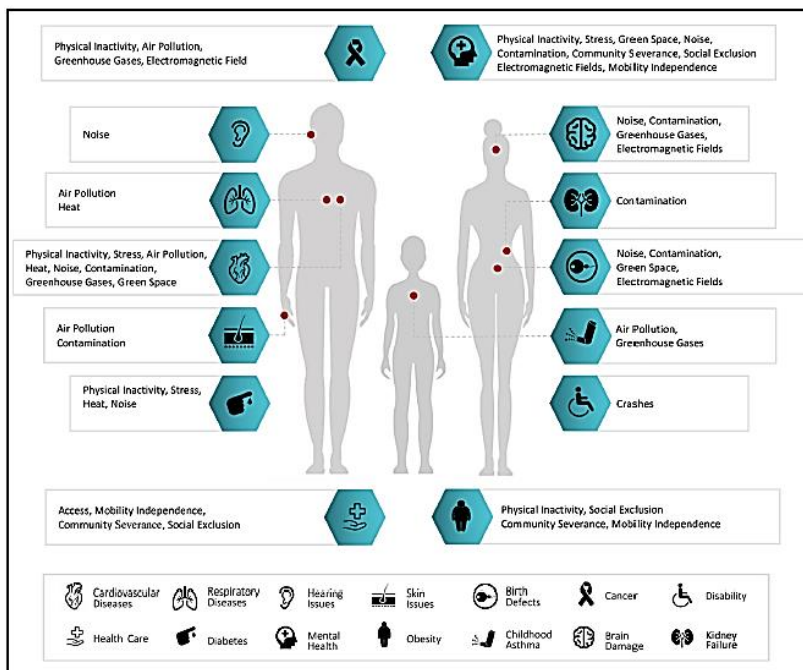


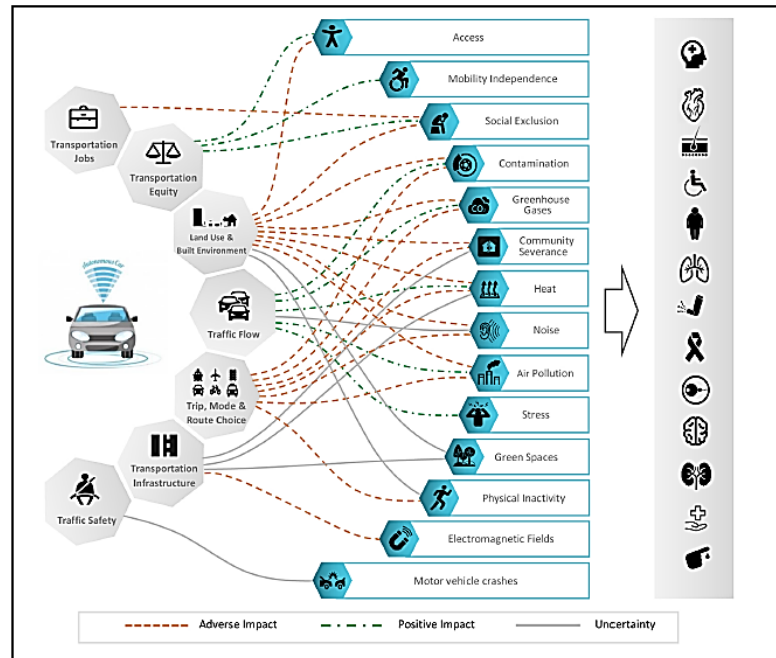
Figure 8 : Graphique présentant les 14 conséquences des transports sur la santé

### Impacts des véhicules automatisés sur la santé publique

Dans cette partie, des liens ont été effectués entre les 7 conséquences de l'automatisation sur le secteur des transports et les 14 impacts des transports sur la santé, en faisant apparaître les **externalités positives et négatives attendues des véhicules automatisés**. Les conséquences incertaines figurent aussi sur le graphique ci-dessous.

Les travaux illustrés ici tendent à faire ressortir un certain nombre d'impacts négatifs du déploiement des véhicules automatisés. Ce modèle abouti à la **construction de 32 externalités du déploiement des véhicules automatisés, dont 17 seraient négatives, 8 plutôt positives et 7 incertaines en termes de conséquences sur la santé**. Ces résultats sont basés sur des estimations et des changements anticipés des transports avec l'arrivée des véhicules automatisés.

Figure 9 : Impacts du déploiement des véhicules totalement automatisés sur la santé. Les impacts sont catégorisés selon qu'ils sont positifs, négatifs ou incertains



Enfin, l'article propose des recommandations politiques pour limiter les conséquences négatives du développement de l'automatisation. Par exemple pour limiter l'étalement urbain et ses conséquences négatives, des politiques de contrôle de la demande peuvent être déployées (dont une tarification des routes) ainsi qu'une limitation du développement urbain. Le contrôle du transfert modal, de la demande de transport induite et de la demande de stationnement sont des stratégies potentielles qui peuvent prévenir les augmentations du trafic et, par conséquent, contribuer à atténuer les conséquences négatives. De plus, l'encouragement du report modal et l'abandon progressif de la voiture personnelles et individuelle peuvent être des solutions pour limiter le trafic induit et limiter l'effet rebond (voies réservées au covoiturage, prix des parking). Le passage au véhicule électrique afin de faire du véhicule automatisé un véhicule électrique plus efficace que le véhicule électrique seul serait un levier pour limiter les externalités négatives. Concernant la perte des emplois du secteur des transports en raison de l'automatisation croissante, une transition plus douce permettrait de rendre acceptable ce passage inévitable. Le développement de nouvelles compétences et la requalification doit permettre d'accompagner les actifs touchés. Enfin, la sécurité restant primordiale quand il s'agit d'innovation, les études et les démonstrations de sécurité doivent permettre de limiter les effets des accidents non évitables.

Cette étude s'est concentrée sur le milieu urbain en considérant qu'en 2050, la majeure partie de la population vivra en ville ou en milieu urbanisé. En ne considérant pas le déploiement en milieu rural, une des conséquences positives les plus irréfutables est de désenclaver les territoires ruraux, où l'accessibilité est un enjeu de taille. De plus, cette étude ne se concentre que sur les impacts des véhicules totalement automatisés et non des véhicules partiellement et hautement automatisés, dont les implications en termes de modifications du système de transport seraient plus limitées (notamment concernant la réduction de la consommation d'énergie, l'augmentation des capacités, contribuant à l'étalement urbain). L'ensemble de ce travail est donc à considérer avec recul dans la mesure où les véhicules totalement automatisés ne concernent pas le quotidien des populations. Puis cette étude est limitée aux impacts sur une modification du système de transport et non à des conséquences indirectes de l'automatisation comme par exemple la possibilité que les véhicules soient équipés de dispositifs de soins médicaux. Enfin, cette étude a été construite sur une hypothèse d'équité et d'égalité vis-à-vis de la mobilité et de l'accès aux véhicules automatisés, ce qui, dans la réalité, ne sera jamais totalement vrai.

# 1. Analyse du cycle de vie

« *Deep decarbonization from electrified autonomous taxi fleets: Life cycle assessment and case study in Austin, TX* », James H. Gawron, Gregory A. Keoleian, Robert D. De Kleine, Timothy J. Wallington, Hyung Chul Kim <sup>22</sup>, *Transportation Research Part D*, 73 (2019)

L'étude présente **une analyse du cycle de vie** en incorporant à la fois les **effets directs et indirects d'une flotte de taxis autonomes aux niveaux du sous-système, du véhicule et du service de mobilité**. Les effets directs sont l'éco-conduite et la connectivité aux intersections tandis que les effets indirects incluent les kilomètres parcourus à vide, les phases de stationnement, l'infrastructure de recharge, le redimensionnement du groupe motopropulseur, l'adoption des véhicules électriques, le covoiturage et les taux de rotation du parc automobile.

Le cas d'étude est situé à Austin au Texas sur la période de 2020 à 2050 avec une demande de transport supposée constante. L'objectif est ainsi d'estimer les **effets directs et indirects d'une flotte de taxis autonomes sur les émissions de GES**.

## Méthodologie

Le cadre méthodologique de l'étude consiste en quatre étapes et six composants principaux. Tout d'abord, les objectifs ainsi que le champ d'application sont définis afin de contraindre l'analyse. Dans cette étape est définie l'unité fonctionnelle à laquelle vont être allouées des exigences de performance, des indicateurs d'impacts et les limites du système. Puis les caractéristiques de la flotte permettant de répondre à l'unité fonctionnelle (profil de la demande de transport, temps d'attente et durée des scénarios) sont décrits. Ensuite, le calcul des caractéristiques pertinentes des véhicules dont par exemple les émissions de GES, est réalisé. L'indicateur d'impact par unité de distance est aussi souhaité. Enfin, la simulation de la flotte sur la durée du scénario, en tenant compte de la rotation du parc, des améliorations annuelles de la consommation de carburant des véhicules et de la décarbonation du réseau électrique en cas d'utilisation de véhicules électriques est réalisée.

Le champ de l'étude comprend une **analyse comparative entre la base de référence actuelle des véhicules conventionnels à Austin, trois scénarios modifiés de véhicules à propulsion humaine et les cinq scénarios de flotte de taxis autonomes** contenus dans Chen et al. (2016). Les scénarios font varier l'autonomie, le groupe motopropulseur, le type de changement et la durée de vie du véhicule. Le schéma ci-dessous présente les neuf scénarios obtenus à partir des combinaisons des cinq paramètres.

Key		
Parameters	Options	Description
Autonomy	HV	Human-driven vehicle (Personal ownership)
	AT	Autonomous taxi (Shared fleet)
Powertrain	IC	Internal combustion engine vehicle (Compact car)
	EV	Battery electric vehicle (Compact car)
Range	SR	Short range (24 kWh, 137 km)
	LR	Long range (68 kWh, 322 km)
Charger	II	Level II charging
	DC	DC fast charging
Lifetime	257	257,495 km (U.S. DOT)
	321	321,869 km (NYC cab fleet)
	643	643,738 km (Sensitivity)

Scenarios		
Internal Combustion Engine	Short Range Electric	Long Range Electric
1: Baseline	4: HV-EV_SR-II (257)	7: HV-EV_LR-II (257)
2: HV-IC (257)	5: AT-EV_SR-II (321)	8: AT-EV_LR-II (321)
3: AT-IC (321)	6: AT-EV_SR-DC (321)	9: AT-EV_LR-DC (321)

Figure 10 : Neufs scénarios obtenus en combinant les cinq paramètres initiaux

<sup>22</sup> Les auteurs appartiennent au Centre des systèmes durables de l'université du Michigan et au Centre de recherche et d'innovations de Dearborn, Etats-Unis.



L'unité fonctionnelle consiste ici à desservir 10 % de la demande de transport d'Austin avec moins de 10 minutes d'attente en moyenne sur la période de 2020 à 2050. De plus, dans cette étude, la demande de transport est considérée constante et les implications des véhicules automatisés sur la congestion n'ont pas été pris en compte. **Les indicateurs d'impact sur l'environnement sélectionnés sont la consommation d'énergie en mégajoules [MJ] et les émissions de gaz à effet de serre en kilogrammes d'équivalent dioxyde de carbone [kg CO<sub>2</sub>-eq] sur la base d'un potentiel de réchauffement planétaire de 100 ans.**

La flotte de véhicules a été générée par rapport à la flotte de véhicules en circulation aux Etats-Unis, constituée de 47 % de véhicules légers (VL), 42 % de SUV et 11 % de poids lourdes (PL). L'article contient tous les détails des émissions des véhicules pour chacun des scénarios considérés ainsi que les hypothèses d'évolution au cours de 30 années. Le graphe ci-dessous reprend les principaux résultats.

	1: Baseline	2: HV-IC (257)	3: AT-IC (321)	4: HV- EV_SR-II (257)	5: AT-EV_SR- II (321)	6: AT-EV_SR- DC (321)	7: HV- EV_LR-II (257)	8: AT-EV_LR- II (321)	9: AT-EV_LR- DC (321)
<i>Life-Cycle Energy (MJ/km)</i>									
Materials & Manufacturing	0.445	0.393	0.337	0.541	0.455	0.455	0.874	0.722	0.722
Use	4.886	3.718	4.402	1.615	1.923	1.923	1.944	2.205	2.205
End of Life	0.016	0.016	0.012	0.016	0.012	0.012	0.021	0.017	0.017
Total	5.347	4.129	4.751	2.172	2.390	2.390	2.839	2.943	2.943
<i>Life-Cycle GHG Emissions (kg CO<sub>2</sub>eq/km)</i>									
Materials & Manufacturing	0.033	0.028	0.024	0.039	0.033	0.033	0.063	0.052	0.052
Use	0.355	0.269	0.318	0.116	0.138	0.138	0.140	0.158	0.158
End of Life	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Total	0.389	0.298	0.342	0.157	0.171	0.171	0.204	0.212	0.212

Figure 11 : Énergie du cycle de vie des véhicules et émissions de GES par km en 2020 pour chacun des neuf scénarios de la flotte de taxis automatisés inclus dans l'étude de cas.

Les émissions de GES et la charge d'énergie représentées par une place de parking ont aussi été prises en compte et ajustées au nombre et à la taille des parkings rencontrés dans la zone considérée. De même, les émissions induites par la charge des véhicules de la flotte ont été pris en compte. Enfin, l'évolution de la flotte et son renouvellement ont aussi été considérés dans la mesure où la durée de vie des véhicules de la modélisation est inférieure à 30 ans (plutôt 13 ans).

## Résultats

Le graphe ci-dessous présente les **émissions mensuelles de GES des flottes de taxis autonomes sur la période de 30 ans**. Les **émissions de production et de fin de vie sont amorties sur la durée de vie du véhicule**, tandis que les émissions de la phase d'utilisation sont attribuées au moment de la production. Les changements d'échelon sont dus à la rotation de la flotte, car les véhicules de remplacement ont des taux de consommation de carburant et une consommation d'énergie digitale réduits selon le scénario. La fréquence des changements d'échelon pour les flottes de véhicules automatisés est beaucoup plus élevée que pour les scénarios de véhicules conventionnels, en raison des taux d'utilisation plus élevés et des durées de vie plus courtes correspondantes. La diminution graduelle évidente dans les scénarios de véhicules électriques à batteries est une fonction de la décarbonisation prudente du réseau électrique pour Austin. Il convient également de noter que les scénarios de taxis autonomes présentent initialement des **émissions mensuelles de GES plus élevées dans la période 2020-2026 en raison de la forte consommation d'énergie informatique du sous-système VAC**. Toutefois, ces niveaux d'émissions tombent en dessous de ceux des scénarios de véhicules à moteur thermique après 2026 en raison d'une plus grande efficacité énergétique de l'informatique.

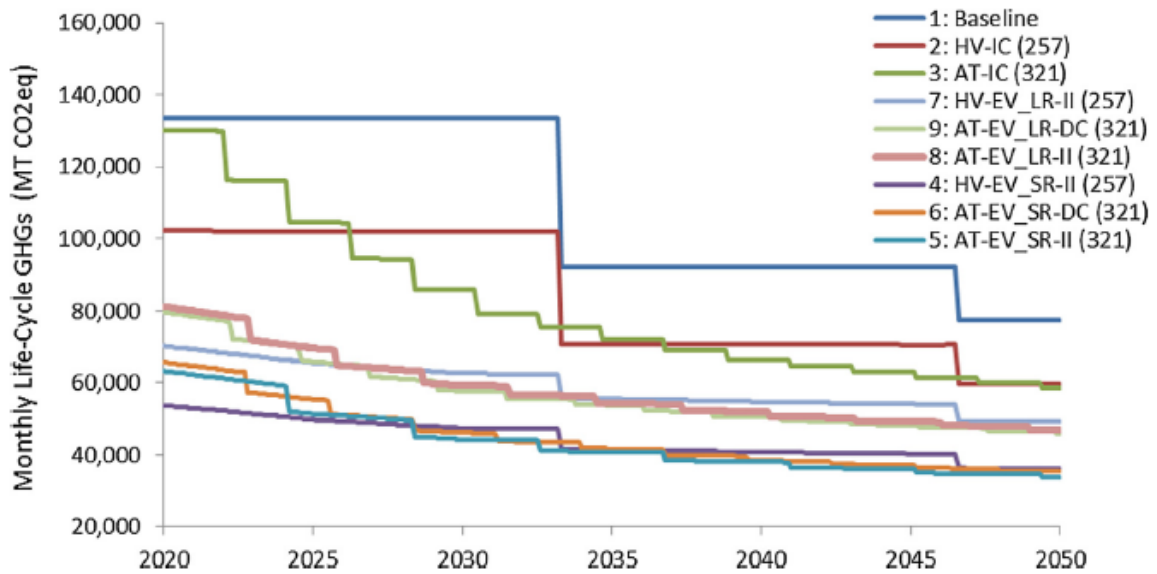


Figure 12 : Emissions mensuelles de GES pour chacun des scénarios sur la période de 30 ans. La légende est listée dans l'ordre décroissant des émissions.

La prochaine figure donne les **émissions cumulées pour chacun des scénarios sur les 30 années**. Les résultats sont représentés par **phase du cycle de vie ainsi qu'avec les contributions des infrastructures de stationnement et de recharge**. Les scénarios à véhicules à moteur thermique (groupe A) ont une charge de production inférieure à celle des scénarios à véhicules électriques à batteries (groupes B-E), principalement en raison de l'ajout de la batterie. Cependant, la charge de la phase d'utilisation des véhicules à combustion interne est nettement plus élevée, car la technologie du groupe motopropulseur des batteries électriques est plus efficace sur le plan énergétique. La charge de stationnement est réduite lors de la transition des véhicules à conduite manuelle vers les scénarios du véhicule automatisé, en raison de la taille réduite du parc. La charge de l'infrastructure de recharge ne concerne que les scénarios à véhicules électriques à batteries, elle est négligeable et à peine perceptible sur la figure. Dans l'ensemble, **les émissions cumulées de GES diminuent de 60 % lors de la transition du scénario de référence au scénario 5, qui représente un service de taxi électrifié, à courte distance et autonome avec une charge de niveau 2**.

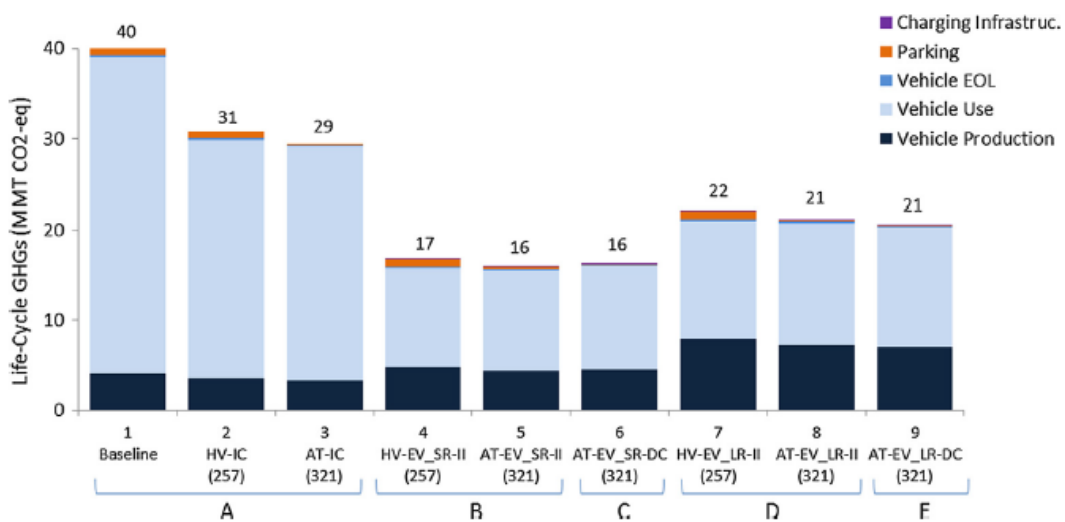


Figure 13 : Emissions cumulées de GES pour chacun des scénarios sur la période de 30 ans

Pour conclure, **le passage d'un scénario de référence avec le parc actuel de véhicules conventionnels thermiques à un scénario avec un parc de véhicules électriques entraîne une réduction de 60 % des émissions de GES**. Cette réduction est principalement due à l'électrification (diminution de 57 % par rapport au scénario de référence) et à la diminution du stationnement (diminution de 2 %). D'autres scénarios ont été modélisés pour obtenir une réduction supplémentaire allant jusqu'à 87 % par rapport au scénario de référence. Les scénarios comprennent une **décarbonation accélérée du réseau électrique de 92 % d'ici 2050** (diminution de 48 % par rapport au scénario de base), le **covoiturage dynamique pour réduire les véhicules kilomètres parcourus jusqu'à 22 %** (diminution de 27 %), une **durée de vie plus longue des taxis autonomes jusqu'à 643 738 km** (diminution de 5 %), des rendements opérationnels élevés de 19 % dus aux effets directs des VAC (diminution de 5 %), des **réductions plus importantes du taux de consommation de carburant** des véhicules neufs pour les véhicules électriques à batteries jusqu'à 2 % (diminution de 4 %), une consommation d'énergie optimiste des ordinateurs des sous-systèmes des véhicules automatisés (diminution de 2 %) et des sous-systèmes des VAC de petite taille (diminution de 1 %).

*« Life cycle greenhouse gas impacts of a connected and automated SUV and van », Nicholas J. Kemp, Gregory A. Keoleian, Xiaoyi He, Akshat Kasliwal <sup>23</sup>, Transportation Research Part D, 83 (2020)*

L'article s'intéresse à une **analyse de cycle de vie pour des véhicules automatisés de niveau 4**. Elle consiste en **l'analyse des composants du sous-système intégrés dans les véhicules électriques à batteries et dans les véhicules conventionnels**. La durée de vie des véhicules a été modélisée sur la base d'un déploiement de **taxis autonomes**.

#### **Cadre de l'étude**

Cette étude s'intéresse aux **effets directs produits par les véhicules automatisés aux niveaux véhicule et sous-système** : l'éco-conduite, le platooning, la connectivité aux intersections et des vitesses sur autoroute plus élevées. Les effets indirects de niveau système et réseau ne sont pas pris en compte dans l'analyse. L'objectif de cette étude est **d'estimer l'énergie primaire et les émissions de GES sur le cycle de vie, au niveau véhicule pour un SUV autonome et une fourgonnette utilisée comme flotte de taxis automatisés** et de comprendre comment les impacts des sous-systèmes automatisés sur un SUV ou une fourgonnette se comparent à ceux d'une berline. L'analyse comprend les effets directs des véhicules automatisés ainsi que les besoins énergétiques et les émissions de GES associés à la production, à l'utilisation et à la gestion de la fin de vie des composants des sous-systèmes.

**L'unité fonctionnelle est ici un véhicule d'une flotte de taxis de cinq passagers**, avec une durée de vie de 322000 km (conversion des 200000 miles) soit d'une durée de vie de trois ans. Le véhicule est équipé des composants suivants : caméra, radar, lidar courte et longue portée, système de navigation intégré, système de communication avec l'infrastructure (DSRC), ordinateur.

Le premier indicateur étudié est la **consommation d'énergie primaire sur le cycle de vie**, exprimée en mégajoules [MJ]. Les **émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie** constituent le deuxième indicateur et sont exprimées en kilogrammes d'équivalent dioxyde de carbone [kg CO<sub>2</sub>-e] sur la base d'un potentiel de réchauffement planétaire (PRP) sur 100 ans.

Le tableau ci-dessous présente les descriptions et les inventaires des composants du sous-système. Les méthodes d'estimation des flux d'inventaire pour chacune des phases du cycle de vie sont fournies.

---

<sup>23</sup> Les auteurs appartiennent au centre des systèmes durables de l'université du Michigan, Etats-Unis.

Figure 14 : Modèle, poids, demande d'énergie et émissions de GES pour chaque phase respective du cycle de vie associé aux composants du sous-système

Category	Camera	Radar	Large LiDAR	Small LiDAR	GPS_INS	DSRC	Computer
Model	Point Grey Dragonfly 2 <sup>a</sup>	Bosch LRR3 <sup>b</sup>	Velodyne <sup>c</sup>	Velodyne Alpha Puck <sup>d</sup>	NovAtel PwrPak7-E1 <sup>e</sup>	Savari SW-1000 <sup>f</sup>	NVIDIA Drive Xavier <sup>g</sup>
Quantity	8	5	1	4	1	1	4
Total Mass (kg)	0.4	1.4	12.3	14.0	0.6	2.7	35.7
Total Power (W)	16.8	20.0	60.0	120.0	2.0	6.0	885.0
Materials/Manufacturing Burden (kg CO <sub>2</sub> -e)	24.7	119.35	132.1	234.8	23.4	83.4	432.1
Use Phase Burden (kg CO <sub>2</sub> -e)	39.3	46.8	140.3	280.6	4.7	14.2	2728.0
EOL Burden (kg CO <sub>2</sub> -e)	0.03	0.10	0.90	1.0	0.05	0.19	2.6
Total Burden (kg CO <sub>2</sub> -e)	64.0	166.22	273.3	516.4	28.2	97.8	3162.7

<sup>a</sup> Autonomous Vehicle Uses Dragonfly and Firefly MV Cameras for Vision (2016), Dragonfly2 Technical Reference Manual Revision 2 (2016).

<sup>b</sup> LRR3: 3rd generation Long-Range Radar Sensor (2019).

<sup>c</sup> HDL 64E (2019).

<sup>d</sup> Velodyne Lidar Alpha Puck (2019).

<sup>e</sup> Enclosures PWRPak7-E1 Version 0B (2019).

<sup>f</sup> DSRC Spring Mounted Mobile Antennas 5.9 GHz (2016).

<sup>g</sup> NVIDIA Drive AGX (2019).

L'article explique de manière plus détaillée toutes les hypothèses faites pour la simulation ainsi que les répercussions de ces décisions sur les résultats obtenus.

## Résultats

La figure ci-dessous présente les **émissions de GES pour chaque composant du sous-système** du véhicule électrique à batteries.

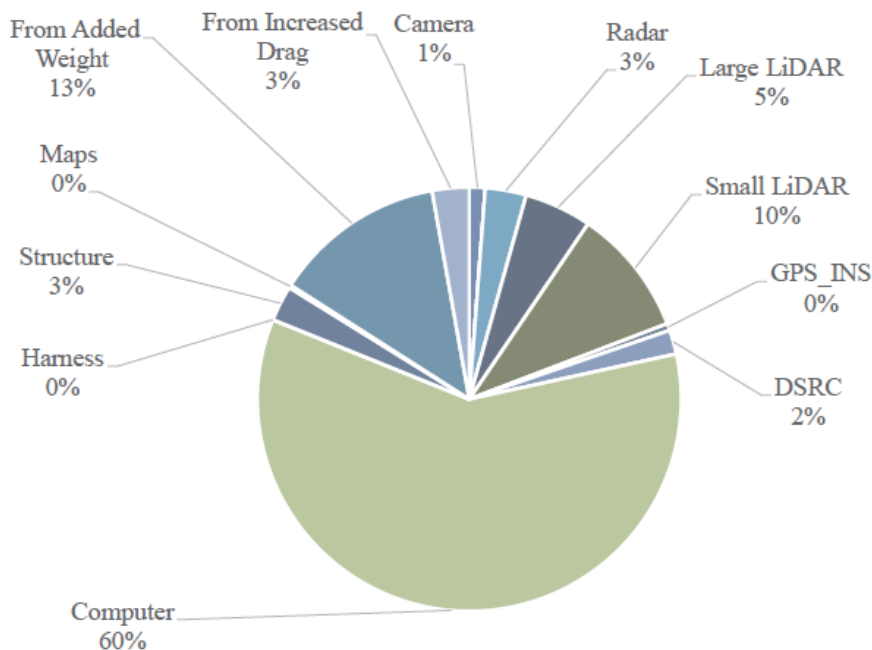
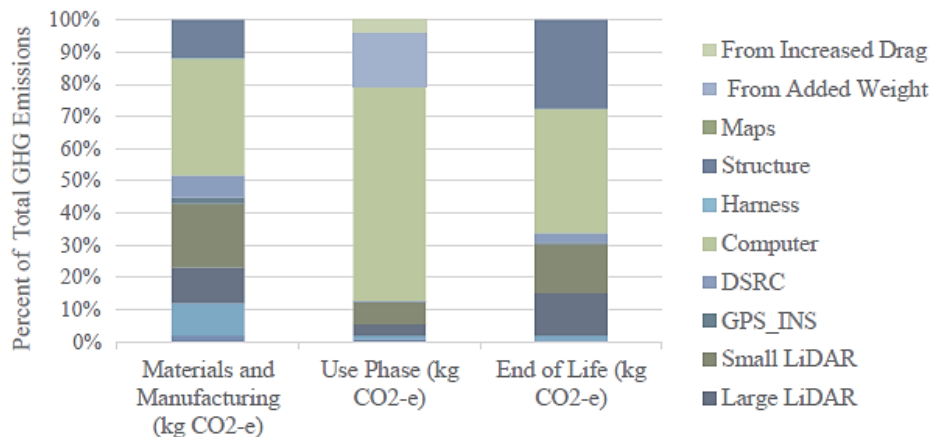


Figure 15 : Emissions de GES pour chaque composant du véhicule électrique considéré

La figure suivante représente la **répartition des consommations de GES pour chacune des phases du cycle de vie**. Les principaux contributeurs aux **émissions de la phase des matériaux et de la fabrication** sont le **système informatique (36 %)** et les **petites unités LiDAR (20 %)**. Le système informatique avec le mode veille est le principal responsable des émissions de la phase d'utilisation, avec 66 % (2 700 kg d'équivalent CO<sub>2</sub>), en raison de ses besoins élevés en énergie. La **structure**, en raison du poids des matériaux supplémentaires nécessaires au montage des capteurs, est le **principal responsable des émissions de la phase de fin de vie, soit 28 %**.

Figure 16 : Répartition des consommations en GES des composants du véhicule pendant les différentes phases du cycle de vie



Les émissions modélisées du sous-système de conduite automatisé sont combinées aux émissions de la plateforme du véhicule électrique standard pour permettre de comprendre les émissions nettes de GES sur le cycle de vie, comme le montre la figure ci-dessous. La plateforme électrique émet un total de 42 000 kg de CO2-e sur une durée de vie de 200 000 miles. La **phase d'utilisation est le principal contributeur, représentant 72 % des émissions de GES de la plateforme**. La phase de matériaux et de fabrication représente 27 % des émissions de GES, tandis que la phase de fin de vie représente 1 %. En supposant une **réduction de 14 % de la consommation de carburant due aux avantages des effets directs, une diminution résultante des émissions de 4 200 kg CO2-e** serait constatée. Cette diminution ne compense pas entièrement l'augmentation des émissions du sous-système lui-même, qui s'élèvent à 5 300 kg d'équivalent CO2, soit des émissions nettes de 43 000 kg d'équivalent CO2. Les résultats au **niveau du véhicule indiquent une augmentation nette des émissions de 2,7 %** par rapport à la plateforme électrique standard.

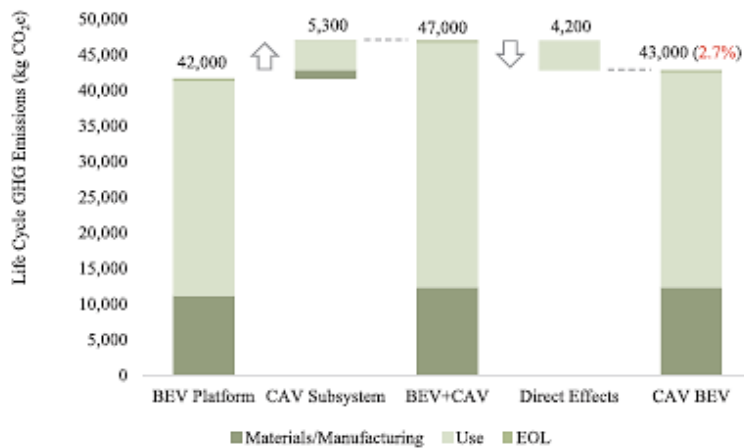


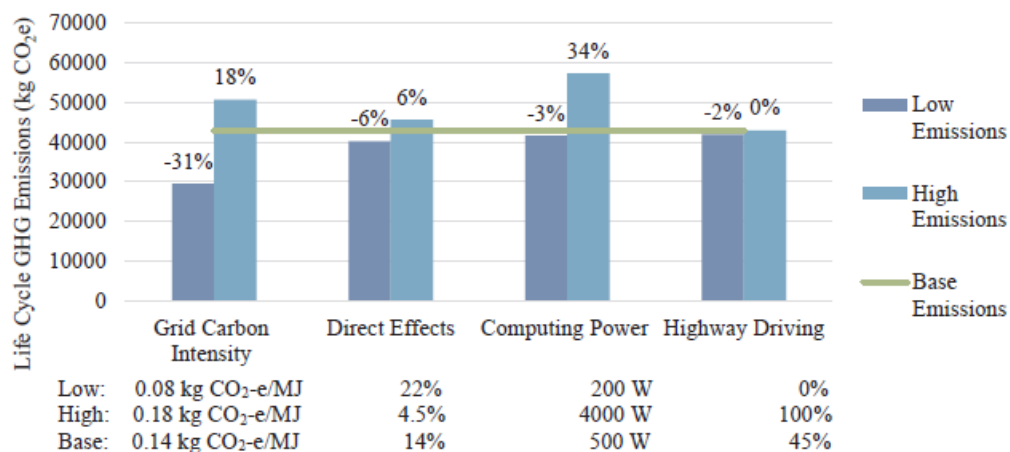
Figure 17 : Emissions du véhicule en GES avec la contribution du sous-système automatisé

Les émissions modélisées du sous-système de conduite automatisé de la fourgonnette à moteur thermique sont combinées aux émissions de la fourgonnette standard de la même manière que précédemment. La plateforme du véhicule à moteur à combustion interne émet au total 96 000 kg d'équivalent CO2 sur une période de 200 000 milles. La phase d'utilisation est le principal contributeur, représentant 92 % des émissions de GES de la plateforme. La phase de matériaux et de fabrication représente 8 % des émissions de GES, tandis que la phase de fin de vie représente moins de 1 %. En supposant une réduction de 14 % de la consommation de carburant due aux avantages des effets directs, une diminution résultante des émissions de 12 000 kg CO2-e est constatée. Cette diminution

ne compense pas entièrement l'augmentation des émissions du sous-système lui-même, qui s'élèvent à 13 000 kg d'équivalent CO<sub>2</sub>, soit des émissions nettes de 97 000 kg d'équivalent CO<sub>2</sub>. Il s'agit d'une **augmentation nette de 1,1 % des émissions de GES sur le cycle de vie de la fourgonnette à moteur thermique automatisée par rapport à la fourgonnette moteur thermique sans automatisation.**

Pour conclure, le graphe ci-dessous présente les résultats des deux scénarios envisagés avec quatre paramètres pour le véhicule électrique, ce qui correspond au scénario faibles émissions et trois paramètres pour le véhicule à moteur thermique, ce qui correspond au scénario fortes émissions.

Figure 18 : Résultats des analyses pour les deux scénarios par rapport au scénario de base



Le premier paramètre analysé est **l'intensité carbone du réseau** (kg CO<sub>2</sub>-e MJ<sup>-1</sup>). Elle a été évaluée pour la phase d'utilisation uniquement. Cette étude a pris en compte deux réseaux régionaux américains en plus du réseau moyen des États-Unis. Le premier réseau (à faibles émissions) est celui de la Californie, dont l'intensité carbonique est de 0,08 kg CO<sub>2</sub>-e MJ<sup>-1</sup>. Il en résulte des émissions de GES sur le cycle de vie inférieures de 31 % à celles du scénario de base. Le deuxième réseau (émissions élevées) est celui de la Midwest Reliability Organization avec une intensité de carbone de 0,18 kg CO<sub>2</sub>-e MJ<sup>-1</sup>, ce qui entraîne une augmentation de 18 % des émissions de GES sur le cycle de vie par rapport au scénario de base.

Le deuxième paramètre examiné est celui des **effets directs**. Il est important de noter que ces efficacités opérationnelles dépendent fortement du taux de pénétration des véhicules automatisés dans la circulation. Le scénario d'émissions élevées examine la limite inférieure de l'impact des effets directs à 4,5 %. Il en résulte une augmentation de 6 % des émissions de GES sur le cycle de vie par rapport au scénario de base. L'analyse du scénario à faibles émissions (limite supérieure de l'impact des effets directs à 22 %) montre une diminution de 6 % des émissions sur le cycle de vie. Il est essentiel de favoriser un fort taux de pénétration des VA pour obtenir un impact maximal des effets directs et une atténuation des émissions de GES sur le cycle de vie.

Le troisième paramètre est centré sur les **besoins en puissance de calcul**. Une **demande d'énergie totale de 7080 W** (4000 + 4000 × 0,77, d'après les sources du rapport) **fait augmenter les émissions de GES du cycle de vie de 31 % par rapport au scénario de référence**. Cela implique l'importance de contrôler les besoins en puissance de calcul pour réduire les émissions du véhicule automatisé électrique.

Le dernier paramètre est la **part modale de la conduite sur autoroute**. Dans cette analyse, il a été supposé que les effets opérationnels directs du platooning, de l'augmentation de la vitesse sur autoroute et des changements éventuels de la puissance de calcul n'avaient pas d'impact différentiel. Il en résulte une **diminution de 2 % des émissions de GES sur le cycle de vie par rapport au scénario**

de référence. Un véhicule électrique automatisé qui se déplace exclusivement sur l'autoroute entraîne un changement négligeable des émissions de GES sur le cycle de vie.

« *Use-stage life cycle greenhouse gas emissions of the transition to an autonomous vehicle fleet: A System Dynamics approach* », Peter Stasinopoulos, Nirajan Shiwakoti, Marvin Beining<sup>24</sup>, *Journal of Cleaner Production*, 278 (2021)

L'étude s'intéresse aux **impacts des véhicules automatisés et connectés sur les émissions de GES sur la phase d'usage** sur la base des véhicules légers (VL) en Australie. Les véhicules standards sont considérés avec moteur thermique et un niveau d'automatisation 1 tandis que les **véhicules automatisés de l'étude sont soit électriques soit à moteur thermique avec des niveaux d'automatisation entre 3 et 5.**

L'étude s'intéresse ainsi à la **dynamique d'intégration des véhicules automatisés dans le trafic**, des simulations dynamiques de trafic sont réalisées avec différents taux de pénétration en fonction de l'adoption par les usagers. La simulation se déroule sur **une période de 90 ans** de 2010 à 2100, avec une introduction des véhicules automatisés à partir de 2030.

Le modèle utilisé est construit autour de **trois sous-modèles : l'adoption, la flotte et les émissions.** Chacun de ces trois modèles est développé dans le corps de l'article plus en détails. Les valeurs d'intensité des émissions de GES sont tirées de l'étude de Stasinopoulos et al. (2016) et ont été extrapolées de 2050 à la fin de la période de simulation.

## Test

Plusieurs hypothèses de scénarios sont prises pour simuler l'intensité des émissions des GES à l'étape de l'utilisation du véhicule léger. Dans le scénario de référence, le parc automobile reste rempli de véhicules conventionnels (VC) ; il n'y a pas de véhicules automatisés. Le scénario fort comprend la combinaison qui conduit à l'intensité de GES la plus élevée. Le scénario faible comprend la combinaison qui conduit à l'intensité de GES la plus faible. Dans ces deux derniers scénarios, le choix de la propriété n'a pas d'importance, car il est supposé qu'un changement dans la propriété des véhicules automatisés est contrebalancé par un changement dans l'intensité de l'utilisation des véhicules automatisés.

Scenario	Adoption	Induction	Fleet	Ownership	Vehicle	Supply
Baseline	None	None	Turnover	Private	Neutral	ICEV BAU
Adoption slow	Slow	None	Turnover	Private	Neutral	ICEV BAU
Adoption fast	Fast	None	Turnover	Private	Neutral	ICEV BAU
Induction some	Slow	Some	Turnover	Private	Neutral	ICEV BAU
Fleet retirement	Slow	None	Retirement	Private	Neutral	ICEV BAU
Ownership shared	Slow	None	Turnover	Shared	Neutral	ICEV BAU
Vehicle low	Slow	None	Turnover	Private	Low	ICEV BAU
Vehicle high	Slow	None	Turnover	Private	High	ICEV BAU
Supply EV BAU	Slow	None	Turnover	Private	Neutral	EV BAU
Supply moderate	Slow	None	Turnover	Private	Neutral	Moderate
Supply ambitious	Slow	None	Turnover	Private	Neutral	Ambitious
Highest	Slow	Some	Turnover	Private <sup>a</sup>	High	ICEV BAU
Lowest	Fast	None	Retirement	Shared <sup>a</sup>	Low	Ambitious

<sup>a</sup> Inconsequential.

Figure 19 : Combinaison des scénarios simulés

## Résultats

Les figures 20 et 21 montrent les résultats de la simulation pour les différents scénarios. Dans les figures, les estimations quantitatives sont incertaines en raison des simplifications et des hypothèses du modèle, et de la longueur de la période future considérée. Par conséquent, **les formes et les différences relatives des courbes sont plus importantes que les valeurs absolues.**

<sup>24</sup> Les auteurs appartiennent à l'université de Melbourne, au RMIT (Institut royal de technologies de Melbourne), en Australie.

La figure 20 montre la croissance en forme de S du nombre d'utilisateurs des véhicules automatisés et du nombre de véhicules automatisés dans la flotte. Les résultats du scénario « Induction some » sont identiques aux résultats du scénario « Highest » (qui ne figure pas sur le graphe), et les résultats du scénario « Adoption slow » sont identiques aux résultats des autres scénarios omis sur le graphe. Dans les scénarios qui appliquent les hypothèses de changement du parc, **la flotte est en retard sur les consommateurs qui ont adopté le véhicule automatisé en raison de l'inertie du système** - les VC existants doivent être retirés avant que les VA puissent les remplacer. Dans certains scénarios, la flotte totale change de taille. Dans le scénario « Induction some », le parc de VA devient plus important que le parc de VC initial parce que certains non-automobilistes deviennent des adeptes des VA. Dans les scénarios de propriété partagée et de propriété la plus faible, **le parc de VA devient plus petit que le parc de VC initial** parce que l'utilisateur moyen de VA possède moins de véhicules que l'utilisateur moyen de VC ne possède de véhicules.

La figure 21 montre les **émissions de GES de la flotte et l'intensité des GES à l'étape d'utilisation du véhicule léger**. Les résultats du scénario de référence sont identiques aux résultats « Adoption slow », « Adoption fast » et « Ownership shared ».

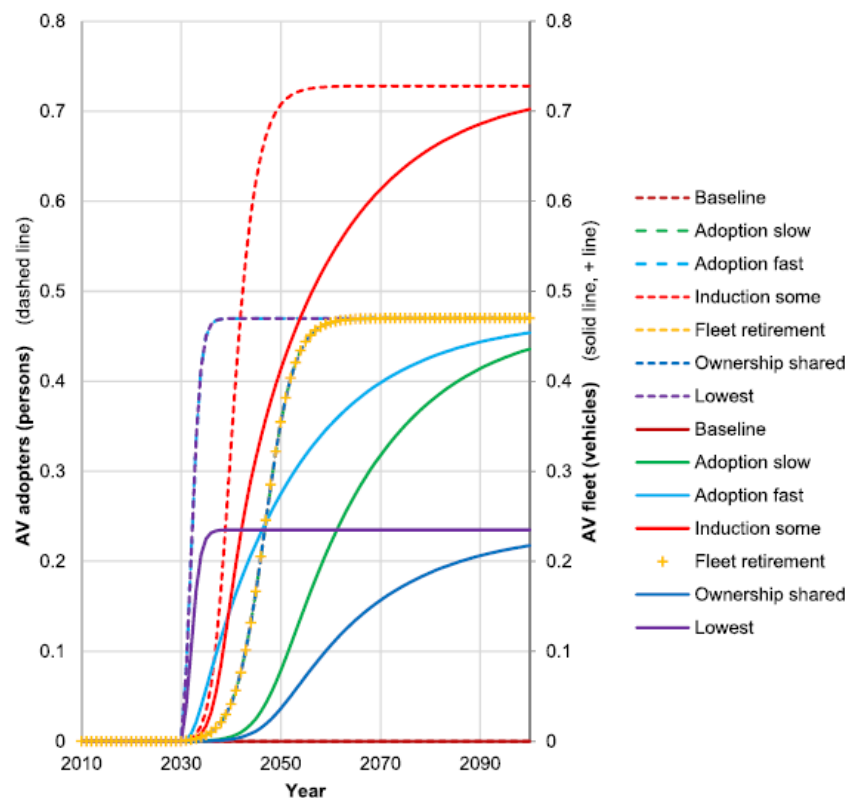


Figure 20 : Nombres d'adoptant des VA en pointillés et nombres de VA en circulation en traits pleins d'après les simulations



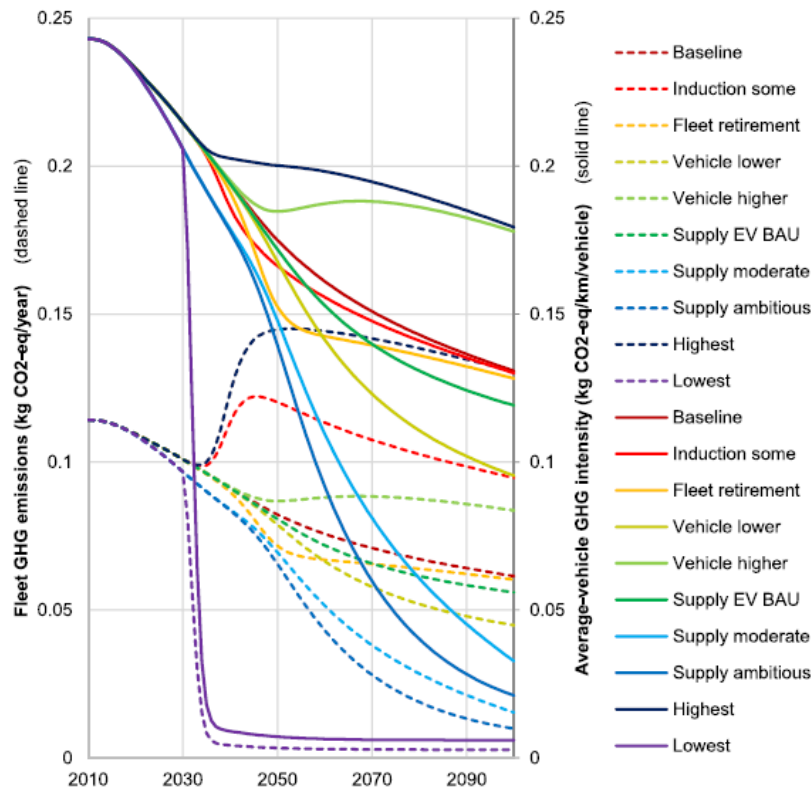


Figure 21 : Emissions de GES de la flotte et émissions de GES lors de la phase d'usage pour un véhicule léger

Les résultats indiquent que émissions de GES de l'alimentation des véhicules thermiques et des véhicules électriques ont la plus grande influence sur la réduction des émissions de GES, mais que les avantages peuvent être annulés par des véhicules automatisés inefficaces.

Sur la base de ces résultats, les **recommandations aux constructeurs** consistent à minimiser la consommation d'énergie et à adopter des technologies de véhicules à faibles émissions de GES.

Les **recommandations aux gouvernements** comprennent la gestion des vitesses de déplacement des véhicules, l'incitation au covoiturage et le soutien continu de l'approvisionnement en électricité renouvelable.

Les **recommandations communes** incluent la **co-planification et l'anticipation de la collecte de données** par les véhicules automatisés eux-mêmes, afin de faciliter la transition vers des véhicules à faibles émissions de GES.

Les travaux futurs suggérés pourraient se concentrer sur le développement du modèle, éventuellement en conjonction avec d'autres méthodes et outils, afin de soutenir une exploration plus approfondie d'autres processus émetteurs de GES. Le modèle pourrait être étendu pour prendre en compte le **cycle de vie des véhicules et d'autres impacts, ce qui permettrait de réaliser des ACV**. Il pourrait également être élargi pour prendre en compte l'influence du marché des véhicules d'occasion, des transports publics et des réactions comportementales des gens face aux véhicules automatisés.

« *The effect of digitalization in the energy consumption of passenger transport: an analysis of future scenarios for Europe* », Michel Noussan, Simone Tagliapietra <sup>25</sup>, Elsevier, 2020

Cet article se place à la marge des articles présentés dans cette revue car **il ne se focalise pas directement sur le véhicule automatisé ou sur le système de transport constitué de véhicules automatisés**. Il s'intéresse particulièrement aux **technologies de connectivité et à la digitalisation du secteur des transports**.

Les auteurs proposent une évaluation à l'échelle européenne des effets potentiels de la digitalisation des mobilités, **de la consommation d'énergie et des émissions de CO2** associées à partir d'hypothèses. Deux scénarios sont étudiés : l'un dans lequel c'est l'utilité collective qui définit la politique de digitalisation mise en place et le second dans lequel la digitalisation est perçue individuellement pour maximiser l'utilité de l'utilisateur. Les résultats sont présentés sur la période 2030-2050.

### **Méthodologie**

Dans cette partie sont décrites toutes les hypothèses prises et la construction du modèle de mobilité à travers les scénarios envisagés. Ce document ne s'intéresse qu'aux hypothèses majeures de construction du modèle dans l'établissement des résultats.

Le modèle conçu est déterministe et permet de calculer **l'ensemble des impacts du transport à partir de la demande de transport affectée**. Les indicateurs calculés sont ici les **émissions de CO2, les consommations d'énergie finale et primaire, la part d'énergie renouvelable** et d'autres émissions de polluants. La demande étant une entrée du modèle, son évolution a été prédite en fonction des tendances historiques des statistiques européennes (l'analyse se basant sur le territoire européen). La demande peut être désagrégée en catégorie en distinguant par exemple l'année d'étude, le mode de transport et la source d'énergie utilisée. Les catégories définies contiennent des paramètres, combinés les uns par rapport aux autres afin d'obtenir différents scénarios. La demande de déplacement est évaluée par mode et par types de carburants. Les paramètres du modèle dont par exemple les niveaux de consommation de chacun des modes par type de carburant ne sont pas détaillés ici et reposent sur les statistiques fournies par l'UE.

La version actuelle du modèle a pour but de **fournir une évaluation générale de la consommation d'énergie du transport de passagers dans l'UE**, en considérant des valeurs moyennes pour un certain nombre de paramètres. Pour fournir des résultats synthétiques et agrégés sur une région aussi vaste et hétérogène, le modèle n'est pas capable de saisir la complexité significative du secteur (impacts locaux, congestion, planification urbaine, distribution géographique des flux de trafic).

Dans la mesure où cette étude cherche à estimer les impacts de la digitalisation des transports sur l'environnement et le réseau de transport européen, tous les modes sont étudiés, non seulement la mobilité routière. Dans ce résumé, le focus est fait sur la mobilité routière en termes d'évolutions et de choix paramétriques, mais des choix similaires ont été réalisés sur les autres modes.

Trois scénarios ont été définis pour évaluer les effets de la digitalisation :

- Un **scénario de référence** en extrapolant les tendances des 20 dernières années de la demande de transport ainsi que l'évolution de la répartition des modes : dans ce scénario, l'évolution significative de la part modale représentée par l'aviation fait perdre de la part modale à la voiture. **La part modale des transports effectués en voiture représentera 68 % en 2050 contre prêt de 72 % aujourd'hui, ce qui représente une demande totale de l'automobile de 40 % d'ici à 2050**. Dans ce scénario la part modale des différents carburants est estimée sur la base de **l'augmentation progressive et rapide de l'électrification du parc** contre une diminution de

---

<sup>25</sup> Les auteurs appartiennent au Programme de l'énergie du futur de la fondation Eni Enrico Mattei de Milan et à l'université John Hopkins de Bologne, Italie.

la part de véhicules thermique (diesel). Les parts respectives demeurent cependant incertaines étant donné que les prédictions dépendent beaucoup des politiques mises en œuvre en Europe. Dans l'étude, une approche conservatrice a été choisie en estimant la part de véhicules électriques à 22 % en 2030 et à plus de 45 % en 2050. Enfin pour estimer l'augmentation de l'efficacité des véhicules à l'horizon 2050, le **remplacement de la flotte a été estimé à 5,6 %**.

- Deux **scénarios de digitalisation** qui considèrent des niveaux d'introduction importants des technologies de digitalisation dans le secteur des transports.
  - L'un est défini comme le **scénario « responsable » dans lequel la technologie et la digitalisation sont déployées de manière collective** dans un objectif de maximisation de l'utilité pour le bien commun.
  - L'autre est défini comme le **scénario « égoïste » dans lequel la technologie et les outils de digitalisation sont utilisés dans la recherche de l'utilité individuelle** et de la maximisation des effets à l'échelle de l'utilisateur.

Les **effets de la digitalisation ont été regroupés en trois domaines** : la mobilité en tant que service (MaaS), la mobilité partagée et les **véhicule automatisés**, bien qu'il puisse y avoir des chevauchements entre ces trois catégories. Les effets de chaque type de tendance de digitalisation attendue sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Principales hypothèses sous-jacentes aux trois catégories d'usage des deux scénarios présentés

Main hypotheses underpinning the two digitalization scenarios.

	Responsible Digitalization (RD)	Selfish Digitalization (SD)
Mobility as a Service	Modal shift from private car share to public transport in cities (5% @2030, 15% @2050). Optimized use of urban public transport thanks to AI-driven mobility platforms (+5% load factor @2030, +10% @2050).	Increase of urban demand (+5% @2030, +10% @2050). Shift from urban public transport to single-passenger taxis by 2030 and AVs by 2050 (+5% @2030, +10% @2050).
Shared mobility	Development of private carpooling, thus increasing average passenger/car (1.3 @2030, 1.5 @2050). Car sharing substitutes private car in cities (reaching 10% @2030, 20% @2050). Bike sharing for last mile in cities decreases other modes (1% @2030, 5% @2050).	Car sharing substitutes PT in cities (5% @2030, 15% @2050). Extra-urban carpooling shifts from train and bus to private cars with 3.5 passengers/car (10% @2030, 25% @2050).
Autonomous vehicles	AVs penetration in private cars that increases mileage by 50% (5% @2030, 20% @2050). Car sharing by AVs with optimized operation leads to 3 passenger/car (25% of car sharing @2030, 80% @2050).	AVs penetration in private cars that increases mileage by 50% (5% @2030, 20% @2050). AVs increases the private car demand for additional citizens (+5% @2030, +15% @2050).
Extra-sector digitalization	Decrease of urban demand due to agile working and e-commerce (2% @2030, 10% @2050).	No significant change in passenger transport.

Par ailleurs, et dans la mesure où les résultats du modèle dépendent de variables socio-économiques, technologiques, sociétales et politiques, des **analyses de sensibilité** sur la variation des paramètres de prédiction ont été menées en particulier sur la **production d'électricité bas carbone**, le **taux de pénétration des véhicules automatisés** et **l'efficacité des véhicules aux horizons 2030 et 2050**. Le tableau ci-dessous présente les résultats en considérant des valeurs de référence « pire et meilleur cas » (les valeurs du modèle sont dans la colonne *base*).

Tableau 2 : Hypothèses pour les analyses de sensibilité

Hypotheses for the sensitivity analysis.

	Hypothesis	Year	Low	Base	High
Low-carbon Electricity	Share of low-carbon electricity generation	2030	47%	56%	70%
		2050	55%	70%	87%
EVs penetration	EVs Market share (new cars)	2030	10%	23%	80%
		2050	25%	45%	100%
Vehicle efficiency	Improvement vs 2015 (new cars)	2030	15%	28%	32%
		2050	25%	47%	60%

Les implications sur le modèle sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Effets sur les résultats des hypothèses réalisées sur les paramètres du modèles

Parameters variations for the sensitivity analysis.

	Parameter	Year	Low	Base	High
Low-carbon Electricity	Electricity GHG emission factor (kg <sub>CO2eq</sub> /MJ)	2030	0.120	0.095	0.070
		2050	0.100	0.063	0.030
EVs penetration	EVs in total fleet	2030	4%	9%	29%
		2050	15%	28%	72%
Vehicle efficiency	Average car efficiency in total fleet (improvement vs 2015)	2030	5%	10%	11%
		2050	17%	30%	36%

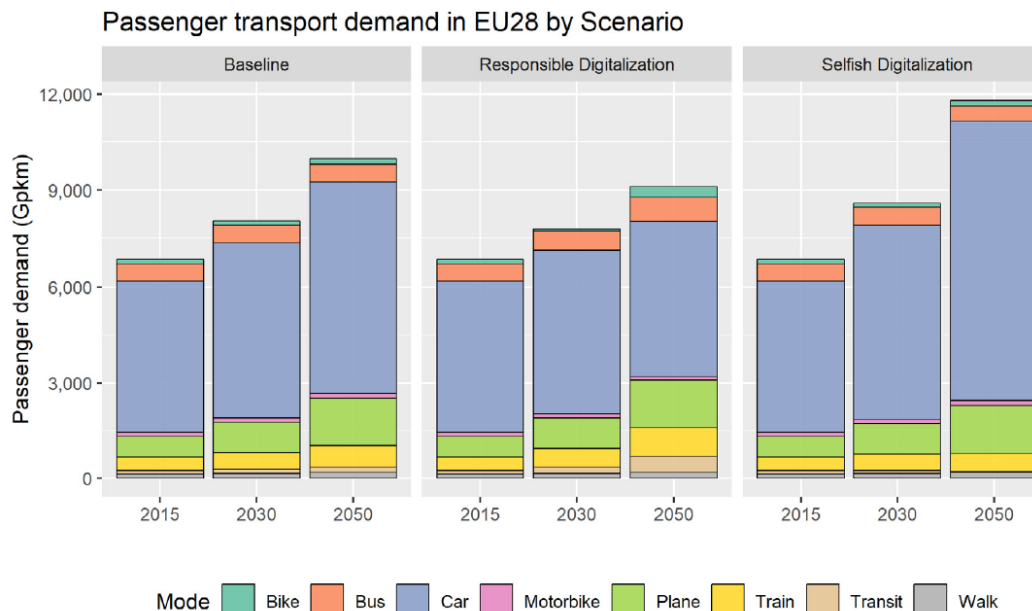
Ainsi, **la part de la production d'électricité bas carbone est directement liée au facteur d'émissions des véhicules électriques**. La plage de valeurs pour la production d'électricité a été définie à partir des tendances actuelles de l'UE. Le taux de pénétration des véhicules électriques est beaucoup plus incertain car en plein essor et fortement dépendant des politiques mises en place. En ce qui concerne l'efficacité des véhicules, et étant donné que ce paramètre est corrélé à de nombreux facteurs (progrès technologiques, comportements des usagers, ...), il s'agit d'un paramètre important et incertain également.

## Résultats

### Evolution de la demande de transport

Le graphique ci-dessous présente les résultats de l'évolution de la demande de transport pour chacun de trois scénarios présentés. La **demande totale augmente dans chacun des scénarios, avec des degrés différents : + 33 % dans le scénario « responsable » contre + 72 % dans le scénario « égoïste » tandis que le scénario de base se situe entre les deux avec une augmentation de 46 % de la demande**. Dans le scénario « responsable », la part modale de la voiture diminue même au profits du train, du bus et du vélo.

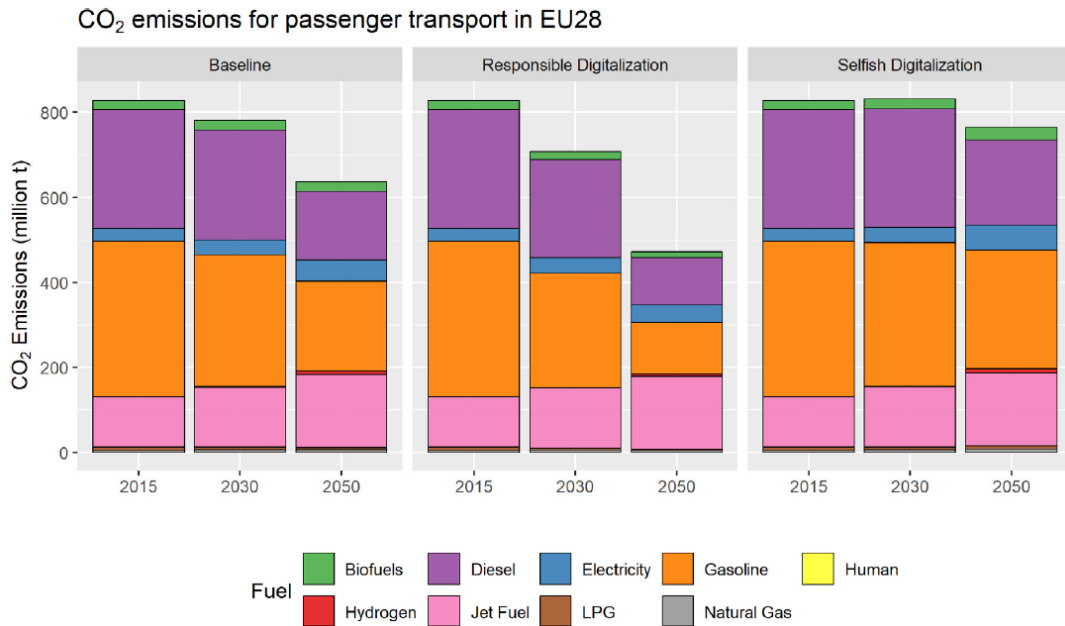
Figure 22 : Comparaison de la demande de transport par modes des différents scénarios



### Consommation d'énergie et émissions de CO2

Les résultats montrent **une stabilisation de la consommation d'énergie finales de 2015 à 2030 avec une diminution à horizon 2050 dans les scénarios de référence et « responsable », tandis que dans le scénario « égoïste », la consommation reste constante**. La diminution de la consommation d'énergie en dépit de l'augmentation de la demande de transport n'est permise que par l'augmentation de la flotte de véhicules électriques dans la flotte totale.

Figure 23 : Comparaison des émissions de CO2 par source pour les différents scénarios



En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, **elles incluent dans cette étude la production, la transmission, la conversion et la distribution des sources d'énergie des véhicules** mais sans tenir compte des impacts des infrastructures et des véhicules eux-mêmes. Pour cette raison, les valeurs obtenues peuvent ne pas être directement comparables avec d'autres statistiques dans le domaine. En lien avec les résultats des consommations globales, à partir d'une valeur d'environ **828 millions de tonnes d'émissions de GES en 2015, le scénario de référence diminue à 637 Mt en 2050, contre 766 Mt pour le scénario égoïste et 472 Mt pour le scénario responsable**. Toutes les sources, à l'exception de l'hydrogène, affichent une diminution généralisée de leurs émissions spécifiques, en raison des diverses améliorations technologiques apportées à la fois aux performances des véhicules et à la chaîne d'approvisionnement de chaque combustible. Les différentes pentes sont liées à la répartition des sources d'énergie entre les différents modes de transport. L'électricité modifie son facteur d'émission de GES également en raison d'un mix de production différent.

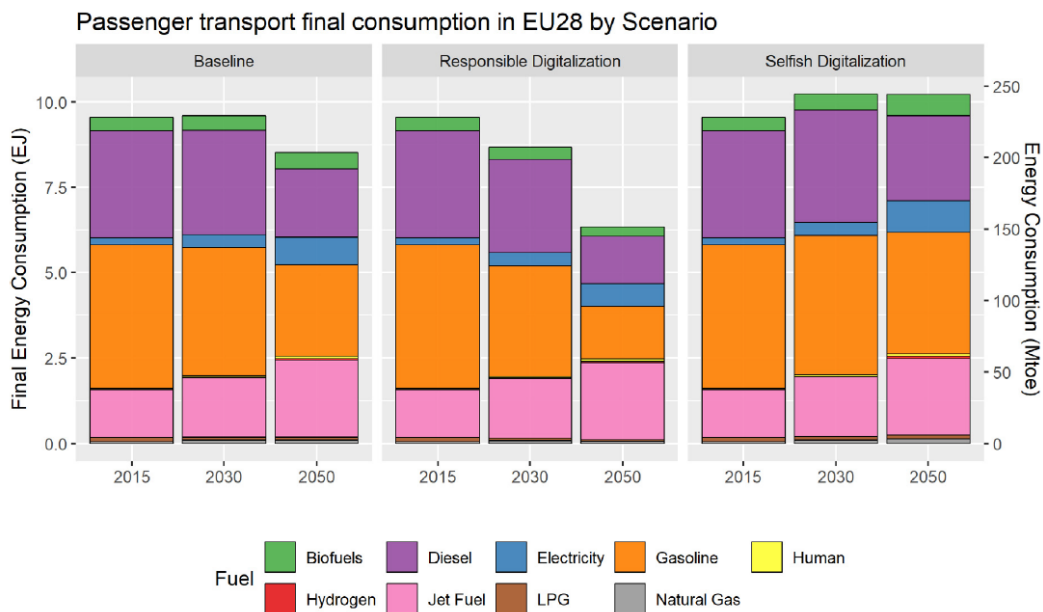
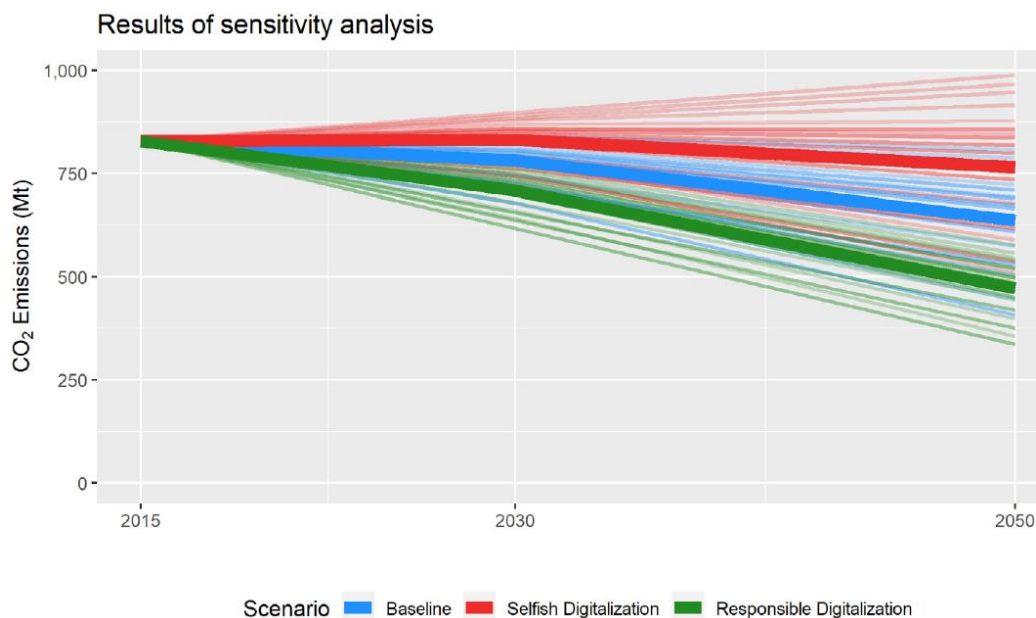


Figure 24 : Comparaison des émissions par source dans les différents scénarios

## Résultats des analyses de sensibilité

Les résultats des analyses de sensibilité sont présentés dans la figure suivante, chaque ligne représente un scénario calculé avec un paramétrage différent, chaque couleur représentant un des trois scénarios initiaux. Le graphique suivant représente les émissions de CO<sub>2</sub>.

Figure 25 : Résultats des analyses de sensibilité



## Conclusion

Les scénarios présentés dans cette étude montrent le potentiel que la digitalisation du secteur des transports peut avoir sur la consommation d'énergie et sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Les deux scénarios ont été choisis afin de montrer **l'impact de la politique de développement de ces technologies numériques sur le système de transport global et en particulier par l'électrification de la flotte**. Bien qu'il ne s'agisse pas directement de quantifier les effets de l'automatisation sur l'environnement, cette étude met en avant l'impact de l'électrification de la flotte, en considérant que l'automatisation des véhicules contribuera à son développement.

Les principaux **effets du scénario « responsable »** sont obtenus principalement en considérant une **augmentation du taux d'occupation des véhicules par un passage de la mobilité individuelle à la mobilité partagée**, ce à quoi les véhicules automatisés peuvent contribuer, par une politique de déploiement efficace. Le **scénario « responsable » conduit à une diminution de la consommation d'énergie finale par rapport au scénario de référence de 9,5 % en 2030 et de 25,4 % en 2050**. Compte tenu des valeurs actuelles, la diminution prévue de la consommation d'énergie atteint 9 % en 2030 et 34 % en 2050, grâce à la combinaison de trois tendances principales : (1) la diminution de la demande grâce aux technologies numériques externes (travail agile, numérisation des services), (2) un système de mobilité plus efficace grâce à l'augmentation des transports publics et des facteurs de charge des véhicules, et (3) l'augmentation de l'efficacité moyenne des véhicules grâce aux améliorations technologiques. Des **diminutions similaires sont obtenues pour les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation d'énergie primaire par rapport au scénario de référence**. En ce qui concerne les **émissions de gaz à effet de serre, dans le scénario « responsable », la valeur actuelle estimée de 830 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>eq est réduite à 710 Mt en 2030 et à 470 Mt en 2050**.

Une figure différente émerge du scénario « égoïste », où les technologies du numériques sont exploitées pour maximiser les avantages individuels par une diminution du coût des véhicules particuliers et des taxis, également soutenue par un fort déploiement des véhicules automatisés. Ces

hypothèses entraînent une **augmentation de la demande de mobilité en voiture** (pour les utilisateurs qui ne sont actuellement pas autorisés à conduire) ainsi qu'un transfert vers d'autres modes, notamment les transports publics. Il en résulte une **augmentation de la consommation d'énergie finale par rapport au scénario de référence, jusqu'à 6,5 % en 2030 et 20,1 % en 2050**. D'autre part, grâce aux améliorations technologiques, la consommation totale d'énergie finale reste stable aux alentours des niveaux de 2015, avec une légère augmentation de 7 % pour 2030 et 2050. Les **émissions totales de gaz à effet de serre restent comparables aux niveaux actuels en 2030 (832 Mt), et diminueront à 766 Mt en 2050 (soit une baisse de 8 % par rapport au niveau de 2015)**.

## 2. Emissions et polluants

« *A review on energy, environmental, and sustainability implications of connected and automated vehicles* », M Taiebat, AL Brown, HR Safford, S Qu, M Xu <sup>26</sup>, *Environmental Science & Technology*, 2018

L'article examine les interactions entre les VAC et l'environnement à quatre niveaux : **niveau système véhicule, niveau système de transport, niveau du système urbain et enfin à un niveau plus global à l'échelle de la société**. Ces quatre niveaux ressemblent aux niveaux définis pour les analyses de cycle de vie, la complexité des interactions et des implications étant croissante avec la vision plus large à l'échelle d'un réseau.

Le **premier niveau est le plus direct et le plus renseigné car il s'agit des effets liés à l'automatisation même à bord du véhicule**. Le **deuxième niveau permet de mesurer les interactions entre les véhicules d'une flotte et les autres véhicules en circulation**, notamment la congestion et les impacts trafic. Le **troisième niveau concerne les interactions avec le réseau physique, les infrastructures à l'échelle urbaine**. Enfin, le **quatrième niveau concerne les usagers et leur appropriation de la technologie**. En outre, ce sont souvent les effets les moins directs et les plus complexes qui ont les impacts les plus notables sur l'environnement.

### Etat de l'art

L'étude dresse un bilan des effets et impacts répertoriés de chacune des catégories sur l'environnement. Il s'appuie sur une large **revue de littérature** pour résumer les impacts des véhicules automatisés et connectés sur l'environnement. Il en ressort que les conséquences sont pour l'instant incertaines et reposent sur de larges hypothèses. Les véhicules automatisés et connectés ont en effet le potentiel d'apporter des conséquences positives sur l'environnement mais le **résultat dépendra essentiellement des stratégies déployées par les pouvoirs publics et les comportements des usagers**. Les impacts les plus notables qui ressortent seraient dus non pas à la technologie autonome elle-même mais aux conséquences indirectes produites sur le réseau et les niveaux systèmes.

Au **niveau du véhicule**, la technologie des VAC pourrait améliorer considérablement l'efficacité. Des économies de carburant et une réduction des émissions pourraient être réalisées grâce à une conception des VAC orientée vers l'efficacité énergétique. **Les études examinées dans l'article font état d'économies de carburant au niveau des véhicules allant de 2 % à 25 % et parfois jusqu'à 40 %**. L'intégration de la technologie des VAC et de l'électrification des véhicules pourraient considérablement améliorer l'économie et l'attrait de la décarbonation des transports. Un taux de pénétration des véhicules automatisés et connectés plus important pourrait atténuer davantage les effets négatifs du transport routier sur l'environnement grâce à l'éco-conduite connectée à grande échelle. **Toutefois, l'effet net de la technologie des VAC sur la consommation d'énergie et les émissions à long terme reste incertain et dépend d'autres niveaux d'interactions avec l'environnement**.

Au **niveau du système de transport**, les avantages environnementaux liés aux VAC découlent de **l'optimisation de l'exploitation du parc automobile, de l'amélioration des comportements dans la circulation**, de l'utilisation plus efficace des véhicules et de la fourniture de services de mobilité partagée. Plus précisément, la mobilité partagée et la technologie des CAV ont d'importants effets de renforcement mutuel.

---

<sup>26</sup> Les auteurs appartiennent à l'université du Michigan (Département de l'ingénierie civile et environnementale et Ecole de l'environnement et du développement durable) et à l'université de Californie (Institut de l'énergie, de l'environnement et d'économie et Département de l'ingénierie civile et environnementale), aux Etats-Unis.



Au **niveau du système urbain**, les VAC pourraient remodeler les villes en modifiant les modes d'occupation des sols et les besoins en infrastructures de transport. Toutefois, les VAC pourraient **encourager l'étalement urbain et le déplacement vers des zones périphériques avec des trajets domicile-travail plus longs**. Les VAC nécessitent également des communications avec des **centres de données à grande échelle, qui sont généralement gourmands en énergie**. Dans le même temps, les VAC pourraient faciliter l'intégration des véhicules électriques et des infrastructures de recharge dans les réseaux électriques. **Ces mécanismes urbains pourraient ne pas apporter d'avantages environnementaux nets significatifs sans un fort taux de pénétration des VAC.**

Si les incidences environnementales nettes à long terme des VAC au niveau des véhicules, des systèmes de transport et des systèmes urbains semblent prometteuses, la baisse du coût des déplacements et la demande induite au niveau de la société sont susceptibles d'encourager une plus grande utilisation des véhicules et un plus grand nombre de véhicules à moteur. La plupart des études présentées dans l'article se fondent sur les modèles de déplacement, les modèles de propriété des véhicules et l'utilisation des véhicules actuels, sans tenir compte des changements de comportement réalistes résultant d'un taux de pénétration accrue des véhicules automatisés et connectés. Les répercussions des VAC au niveau de la société seront sans aucun doute profondes, mais des incertitudes importantes existent quant aux changements de comportement, ce qui rend très difficile la projection des répercussions énergétiques et environnementales réelles.

### **Propositions des auteurs**

Sur la base de la revue de littérature, les auteurs recommandent de suivre quatre principes :

- se tourner dès que possible vers des analyses empiriques afin de vérifier les affirmations sur les impacts environnementaux ;
- améliorer les modèles par des caractérisations plus justes et de meilleures prises en compte des relations entre facteurs ;
- multiplier les efforts sur la compréhension des différents types de VAC et des scénarios de développement en fonction des comportements des usagers ;
- intégrer les analyses et les modèles à plusieurs niveaux du système.

Les recommandations se portent également sur quatre domaines spécifiques de la recherche :

- la conception des VAC et les tests qui caractérisent les impacts directs ainsi que les impacts liés au cycle de vie ;
- les modèles de développement des VAC en fonction de l'évolution de la population, des facteurs économiques, de la demande et des politiques locales par exemple ;
- des études comportementales notamment pour quantifier l'évolution des mobilités des usagers (mobilité partagée VS mobilité individuelle) ;
- les besoins et les opportunités stratégiques et politiques.

*« Quantifying the impacts of dynamic control in connected and automated vehicles on greenhouse gas emissions and urban NO<sub>2</sub> concentrations », R Tu, L Alfaseeh, S Djavadian, B Farooq, M Hatzopoulou <sup>27</sup> – Elsevier – Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019*

Pour tester l'impact du routage distribué pour les véhicules automatisés et connectés, un algorithme de contrôle dynamique de bout en bout, développé par Farooq et Djavadian (2019) a été appliqué au réseau routier du centre-ville de Toronto sous trois niveaux de demande de trafic, et trois taux de

---

<sup>27</sup> Les auteurs appartiennent aux universités de Toronto et de Ryerson, au Canada.

pénétration du marché pour les VAC. De plus, la présence de véhicules automatisés et non connectés a été testée.

**L'étude s'applique ainsi au réseau de transport complet de la ville de Toronto. Les variables étudiées sont les émissions de GES et de NOx.**

### Méthode

Les estimations concernent les **émissions totales du réseau en GES et en NOx ainsi que les émissions produites par segment de la route**. Ces estimations ont ensuite été utilisées dans un **modèle de dispersion de la pollution atmosphérique qui prend en compte les conditions météorologiques, la géométrie de la route et les réactions physicochimiques**. Les impacts de cette simulation sur la concentration en NO2 ainsi que sur les piétons ont été mesurés. Enfin, l'influence de la simulation sur la consommation en électricité a été testée avec des véhicules électriques.

La simulation dynamique ainsi que les hypothèses précises sont décrites dans l'article. Les méthodes de recueil des émissions et des concentrations ainsi que les ajustements de la simulation sont également décrites.

Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des scénarios considérés avec la simulation.

Scenario	Network demand level	E2ECAV market penetration rate (MPR)	On-road vehicle types
1	Low (30% of the base demand)	0%	HDV
2	Low	5%	CAV + HDV
3	Low	100%	CAV
4	Medium (70% of the base demand)	0%	HDV
5	Medium	5%	CAV + HDV
6	Medium	100%	CAV
7	High (100% of the base demand)	0%	HDV
8	High	5%	CAV + HDV
9	High	100%	CAV
10	High	-	AV

HDV: Human-Driven Vehicle; without connectivity and automation.

CAV: Connected and Automated Vehicle; this is an automated vehicle to which we apply the E2E routing algorithm.

AV: Automated Vehicle; it has the same driver parameters as CAV but lacks connectivity. This means in the scenario with only AVs, E2E routing control is not applied.

Base demand: Morning peak traffic demand retrieved from travel survey data.

Figure 26 : Description des scénarios de la simulation

### Résultats

Les résultats montrent une **tendance faible mais croissante pour les 10 scénarios concernant les véhicules kilomètres parcourus avec l'augmentation du nombre de véhicules automatisés et connectés** sur la route. Cette légère augmentation des véhicules kilomètres parcourus résulte du réacheminement des véhicules vers différentes parties du réseau. Dans le cadre d'une demande moyenne, ils sont les plus affectés parmi les trois niveaux de demande (faible, moyenne et forte). En cas de demande faible ou élevée, l'influence des différents taux de pénétration sur les véhicules kilomètres parcourus est moindre. Le scénario de demande élevée avec 100 % de véhicules automatisés, entraîne une légère diminution des véhicules kilomètres parcourus par rapport au cas de référence.

**Les émissions totales de GES dans les niveaux de demande moyen et élevé sont plus sensibles à la modification du taux de pénétration des véhicule automatisés que dans le cas d'une faible demande.**

Dans le cas d'une demande faible, la plupart des segments sont en écoulement libre, et l'influence de l'ajout de véhicules automatisés au réseau n'est donc pas aussi importante que celle observée pour les deux autres niveaux de demande. En général, un **taux de pénétration plus élevé entraîne une diminution des émissions totales de GES, quel que soit le niveau de la demande de trafic, et l'impact est plus important lorsque la demande de trafic est plus forte**. En outre, le scénario de demande

élevée avec 100 % de véhicules automatisés et connectés produit moins d'émissions totales de GES que le scénario demande élevée avec 100 % de véhicules automatisés.

Contrairement à l'évolution des émissions totales de GES, **un taux de pénétration plus élevé n'entraîne pas nécessairement de grands changements dans les émissions de NOx**, surtout lorsque le niveau de demande est faible. Avec une faible demande, le résultat de 100 % de véhicules automatisés est 7 % plus élevé qu'avec aucun véhicule automatisé. Sous une demande élevée, une diminution des émissions de NOx est observée mais certainement plus faible que la diminution des émissions de GES. Le scénario 100 % véhicules automatisés conduit à des émissions de NOx plus faibles que le scénario 100 % véhicules automatisés et connectés, ce qui indique que les cycles de conduite des véhicules automatisés entraînent une réduction des émissions de NOx, mais que le routage par connectivité entraîne une augmentation des émissions. De plus, **les simulations montrent que le taux d'émissions de NOx est plus sensible au comportement de conduite agressif à une gamme de vitesse plus élevée, tandis que les émissions de GES sont plus susceptibles d'être affectées par les stop and go**. Dans ce cas, en raison de la probabilité plus grande de vitesse élevée et de conduite plus agressive, de mouvements de virage plus nombreux entraînant plus d'accélération et de décélération, ainsi que des véhicules kilomètres parcourus plus élevés, de la forte demande, le scénario 100 % de véhicules automatisés et connectés a généré plus de NOx que le scénario 100 % de véhicules automatisés.

En ce qui concerne l'exposition des piétons aux NOx, les quantités ingérées de NO2 par les piétons au niveau des intersections ont été calculées par le modèle. Pendant **les 15 premières minutes, le scénario avec 100 % de VAC conduit à l'absorption la plus élevée de NO2, tout en devenant plus faible que les autres scénarios dans les autres intervalles de 15 minutes**. Parmi les quatre scénarios comparés (0 % de VAC, 5 % de VAC, 100 % de VAC et 100% de VA), le scénario avec 0 % de VAC entraîne la plus grande masse totale d'absorption de NO2, sur les deux heures.

Enfin, concernant le scénario avec des véhicules électriques, **lorsque tous les véhicules sont électriques, l'application du VAC n'entraîne pas d'économies d'énergie significatives lorsque la demande de trafic est faible (demande faible et moyenne). Lorsque la demande de trafic est élevée, le taux de pénétration plus élevé des VAC entraîne des économies d'énergie**.

*Energy saving potentials of connected and automated vehicles », Ardalan Vahidi <sup>28</sup>, Antonio Sciarretta <sup>29</sup>, 2018*

**Objectifs** : L'article s'intéresse aux opportunités pour une conduite plus économe en énergie permises par une conduite automatisée et connectée. Par ailleurs, des effets secondaires de la connectivité et de l'automatisation comme l'augmentation des kilomètres parcourus ou l'allègement du poids des véhicules ne sont pas étudiés.

**Objets de l'étude tournés sur la connectivité des véhicules et de leur infrastructure :**

- **Véhicule connecté** : véhicule qui utilise les technologies de la communication telles que les unités de bord de route, la communication cellulaire ou le Wifi pour la communication V2V, V2I et V2C.
- **Véhicule totalement automatisé** : la conduite du véhicule est réalisée sans intervention directe du conducteur pour contrôler la direction, l'accélération et le freinage et conçue sans une surveillance attendue du conducteur lorsque le fonctionnement du véhicule est en mode autonome (définition de la NHTSA).

---

<sup>28</sup> Département d'ingénierie mécanique, Université de Clemson, USA.

<sup>29</sup> Technologie, informatique et mathématiques appliquées, IFPEN, France.

Les **discussions de cet article sont valables pour des véhicules de niveau 2 ou 3** comme ils se réfèrent à des fonctionnalités telles que le contrôle de la vitesse et de la direction, qui peut être annulé par la reprise en main du conducteur.

Ce sont les **impacts systémiques** et leurs conséquences sur l'anticipation des événements, le trafic et l'efficacité énergétique de certains véhicules qui sont l'objet de l'étude :

- Les auteurs discutent des fondamentaux de l'éco conduite mais également des possibilités d'améliorer le contrôle des signaux de réponse du trafic, le comptage des rampes et d'autres contrôles basés sur l'infrastructure qui pourraient également améliorer l'efficacité énergétique.
- Puis, ils s'intéressent en particulier aux opportunités qui se présentent pour les VAC individuels pour anticiper la pente et la géométrie de la route, l'état macroscopique du trafic, la couleur des feux de signalisation à venir et le mouvement microscopique des véhicules voisins.
- Le taux de pénétration des VAC est discuté ensuite dans l'objectif d'une amélioration de l'efficacité énergétique. En particulier sont étudiés le platooning, le contrôle automatique de la vitesse, le changement de voie automatique et l'insertion ainsi que le contrôle automatique d'intersections pour une flotte de CAV. Les impacts du trafic mixte sont étudiés ici.

**L'utilisation des termes éco-conduite font référence à une conduite économique et non écologique** car elles ne sont pas nécessairement identiques (la réduction de la consommation d'énergie n'équivaut pas à la réduction des émissions).

Il s'agit plutôt d'une projection sur la **phase d'usage** des systèmes techniques.

En partant des considérations physiques de la dynamique (1<sup>er</sup> principe), il apparaît qu'un gain d'énergie peut être réalisé à deux niveaux :

- Distance de la route parcourue ainsi que résistance au roulement -> la connectivité peut permettre d'évaluer plus précisément ce couple.
- Les pertes aérodynamiques dues aux mouvements du véhicule sur la route notamment par sa vitesse.

### **Anticipation de l'état de la route**

L'accès en temps réel aux informations grâce à la connectivité et à l'absence de conducteur humain dans un véhicule électrique intelligent augmente la certitude des prédictions et donc l'efficacité du contrôle prédictif du groupe motopropulseur. L'anticipation de l'état de la route pourrait permettre **une économie d'énergie de 3 % grâce à la prévisualisation d'informations routières statiques** telles que la pente de la route pour les VAC.

### **Anticipation du phasage des signaux**

Les informations fournies par les feux de circulation via le système V2I pourraient permettre d'économiser 10 % d'énergie dans la circulation sur les artères principales en réduisant les phénomènes de stop and go au niveau des intersections et en permettant une conduite plus douce.

Par ailleurs et comme il est peu probable que cette technologie soit mise en œuvre dans tous les véhicules dans un avenir proche, **il est important d'évaluer l'influence des véhicules équipés sur les autres véhicules dans un flux de circulation mixte**. Des études évaluent l'influence de l'éco-conduite ou du contrôle de l'éco-vitesse sur les véhicules voisins immédiats : l'impact des VAC sur le trafic mixte près des intersections signalisées est étudié dans des micro simulations de trafic. Les VAC reçoivent le timing des signaux à l'avance et ajustent leur vitesse pour une arrivée au vert dans les temps. **Il est ainsi démontré que les VAC améliorent non seulement leur efficacité énergétique, mais qu'à mesure que leur taux de pénétration augmente, ils réduisent également la consommation d'énergie des véhicules conventionnels**. Une étude atteint même une économie d'énergie de 26 % pour 100 % de

VAC. Avec l'augmentation des VAC, les autres véhicules conventionnels sont plus susceptibles de suivre un véhicule automatisé qui se déplace de manière plus fluide.

### **Anticipation de la poursuite des véhicules**

Les scénarios sur les modèles de poursuite des véhicules ont pour l'instant un gain d'énergie incertain puisque les résultats des simulations dépendent en grande partie des comportements des conducteurs et non d'une réponse générale. Les résultats traduisent des variations importantes.

**La poursuite coopérative des véhicules notamment permise par le CACC permettrait selon différentes études de gagner entre 5 et 15 % d'énergie.** C'est d'ailleurs un sujet de recherche largement mûri depuis plusieurs décennies. Des travaux autant sur le platooning PL que sur le platooning VL donnent des résultats plutôt prometteurs bien que certains résultats soient parfois mitigés.

### **Anticipation des changements de voies**

Dans un environnement de véhicules connectés et automatisés, davantage d'informations sur les intentions des véhicules voisins peuvent être disponibles via la communication V2V, la vitesse de chaque voie peut être diffusée par des capteurs en bord de route, et les véhicules automatisés peuvent donc changer de voie plus judicieusement et en douceur.

Le peloton de camions pourrait permettre un gain de 7 à 10 % grâce à la réduction de la traînée.

En revanche, la poursuite de véhicules et l'anticipation des changements de voies pour les VL pourraient **avoir des conséquences positives sur les émissions et un gain d'énergie mais encore trop peu de résultats expérimentaux le démontrent.**

### **Harmonisation du trafic**

L'impact harmonisant des VAC sur le trafic, même à de faibles niveaux de pénétration, pourrait se traduire par 20 % d'économies en termes de stop and go.

*« Energy and emissions implications of automated vehicles in the U.S. energy system », Kristen E. Brown, Rebecca Dodder<sup>30</sup>, Elsevier, 2019*

Les auteurs de cet article ont utilisé un **modèle de système énergétique** (MARKet ALlocation) afin d'examiner quatre scénarios déjà publiés qui prennent en compte différents effets de l'automatisation sur son efficacité et la demande. A partir des quatre scénarios, **des résultats clefs ont été appliqués dans un cadre plus large de système énergétique. L'analyse ajoute des informations sur le changement de carburant, les impacts en amont sur les émissions atmosphériques.** Le logiciel MARKAL saisit de manière dynamique les **interactions entre le secteur transport et d'autres secteurs énergétiques** (comme les secteurs électrique et pétrolier). En tenant compte du **système énergétique plus complet** que le simple système transport, les effets amonts sur les marchés d'approvisionnement en carburants en raison des fluctuations de la demande des véhicules légers sont présents. Bien que cette étude soit **centrée sur la mobilité individuelle** et non sur la mobilité collective partagée, les hypothèses et les résultats sont intéressants car intègrent l'ensemble du secteur énergétique.

Une particularité de cette étude est qu'elle considère l'automatisation et ses impacts selon plusieurs **scénarios qui dépendent du niveau d'automatisation choisi.**

### **MARKAL**

MARKAL est un modèle d'optimisation des systèmes énergétiques qui génère des scénarios d'évolution de la technologie énergétique et du mélange de combustibles sur plusieurs décennies. MARKAL utilise

---

<sup>30</sup> Les auteurs appartiennent à l'Agence de l'environnement des Etats-Unis.

des hypothèses sur le coût futur et les paramètres opérationnels des technologies et des sources d'énergie pour déterminer quelles technologies peuvent satisfaire les demandes projetées des consommateurs de la manière la plus rentable. Le modèle MARKAL peut représenter les systèmes énergétiques à l'échelle mondiale, nationale, régionale, étatique/provinciale ou communautaire, et est généralement utilisé avec un horizon à long terme pour la planification énergétique et l'analyse du climat. La plupart des applications du modèle couvrent le système énergétique depuis l'exploitation et l'extraction des combustibles jusqu'aux utilisations finales dans les transports, les bâtiments et l'industrie. Pour **cette analyse, l'accent est mis sur les demandes de déplacement des véhicules légers et lourds, les choix technologiques des véhicules** (par exemple, moteur à combustion interne classique, hybride, hybride rechargeable, électrique à batterie) **et les carburants**.

### Hypothèses

L'étude est réalisée sur le **système d'énergie américain, sur la période de 2005 à 2055**, sur des plages de 5 ans à partir des données développées par l'Agence de la protection environnementale des Etats-Unis. Avec ces données, la caractérisation de la demande, de la technologie et des ressources est générée selon 9 zones géographique du territoire américain.

Les **secteurs clefs de cette analyse sont la mobilité individuelle par véhicules légers et poids lourds, ainsi que les secteurs qui fournissent des carburants pour le transport** : les raffineries de pétrole et de biomasse, la production d'électricité et la production de gaz naturel (y compris le gaz naturel comprimé). La **répartition des véhicules est faite à la fois selon la taille et le carburant**, à partir des données de parc de 2016. Les kilomètres parcourus sont définis proportionnellement à la population présente sur chacune des zones de l'étude. Les **émissions en polluants sont aussi modélisées en fonction des standards d'émissions des véhicules en circulation**.

Dans cet article, les émissions de CO2 sont calculées avec la formule suivante (modèle ASIF) :

$$\text{Emission CO2} = \text{Niveau d'activité} * \text{Part modale} * \text{Intensité énergétique} * \text{Contenu du carburant}$$

La modélisation du système énergétique effectuée ici permet d'étendre l'analyse pour y inclure le contenu en carbone des carburants en permettant au modèle de choisir de manière endogène des carburants alternatifs ou des options de véhicules électriques.

Les quatre scénarios sont les suivants, **considérant le taux de pénétration des véhicules automatisés comme presque total, le niveau d'automatisation des véhicules dépend du scénario considéré** :

- le **scénario nommé « *Have your cake and eat it too* »**, qui est le plus positif avec les meilleurs avantages en termes d'émissions et sans inconvénients : dans ce scénario, la technologie progresse sans heurt, conformément à la politique mise en place avec une réduction significative des accidents et l'engagement nécessaire du conducteur limite l'augmentation de la demande (**automatisation partielle**) ;
- le **scénario nommé « *Stuck in the middle at level 2* »** a des retombées plus faibles dans la mesure où les orientations politiques limitent l'**automatisation à du niveau 2**, ce qui implique une vigilance constante du conducteur : les mécanismes et les retombées sont comparables à celles du scénario de référence actuel ;
- le **scénario nommé « *Strong responses* »** est un scénario dans lequel les bénéfices en termes d'émissions sont comparables au premier (scénario *Cake*), mais dans lequel les choix des consommateurs conduisent à des augmentations d'émissions : la demande augmente considérablement ainsi que l'efficacité, ce qui contribue à augmenter la consommation de carburant ;
- le **scénario « *dystopian nightmare* »** est un scénario représentant l'**automatisation totale**, ce qui induit de profonds changements dans le domaine de transports, qui augmenterait considérablement les émissions : augmentation de la demande due à une diminution des

coûts, véhicules moins efficaces énergétiquement en raison de l'augmentation des vitesses par exemple.

Dans le cadre de cette étude, les auteurs ont voulu tester les impacts de la demande et de l'efficacité énergétique indépendamment dans chacun des scénarios, en plus de la reconstitution combinée. Cela produit donc 12 scénarios pour chacun des deux types de véhicules considérés (VL et PL).

## Résultats

En termes de **source énergétique pour les carburants**, la distinction s'est faite comme suit selon les 4 scénarios de base :

- dans le scénario *Stuck*, l'électrification est très faible et l'utilisation de carburant conventionnels est légèrement plus faible que dans le scénario de référence ;
- dans le scénario *Cake*, le nombre de véhicules à carburants conventionnels est le plus important et c'est le scénario qui utilise le moins d'énergie ;
- dans le scénario *Strong*, les véhicules sont relativement équivalents au scénario *Cake*, si ce n'est que la demande est plus importante et donc la consommation aussi ;
- enfin dans le scénario *Dystopian*, il y a une augmentation des véhicules à carburant alternatif par rapport aux autres scénarios pour répondre au besoin global beaucoup plus important en énergie de transport, mais l'utilisation de l'essence et du diesel reste également élevée.

En termes de comparaison entre les VL et PL, les réponses aux différents scénarios sont plus sensibles pour les PL, dont les émissions sont dépendantes d'une plus grande variété de mécanismes que les VL. La figure ci-dessous montre les résultats pour les VL à horizon 2050 pour les 4 scénarios et pour les 3 distinctions selon les effets sur la demande, l'efficacité énergétique et combinés entre les deux, par rapport au scénario de référence basé sur 2016.

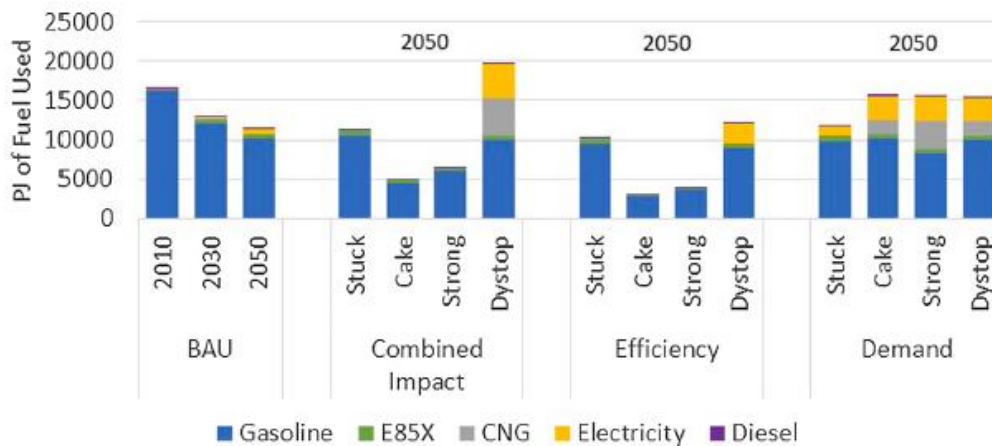


Figure 27 : Utilisation de carburant pour les VL en fonction des 4 scénarios et des effets induits à l'horizon 2050 par rapport au scénario de référence

Ces résultats mettent en évidence la part la plus importante dans le scénario final entre la « demande » et « l'efficacité ». De même, on remarque assez bien que le **scénario dystopique a la plus grosse consommation de carburant par rapport aux 3 autres scénarios et au scénario de référence** (caractérisé par une plus forte demande). Dans ce scénario, le taux d'adoption des véhicules à carburant alternatif est plus important que dans les autres, en raison du prix de l'essence qui augmente fortement.

La figure ci-dessous présente les résultats pour les PL de la même manière que précédemment.

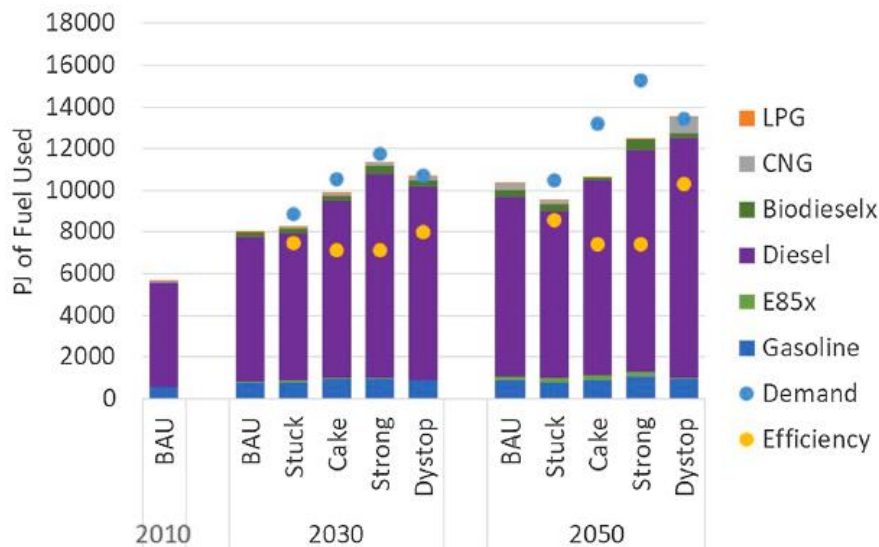


Figure 28: Utilisation de carburant pour les PL en fonction des 4 scénarios et des effets induits à horizons 2030 et 2050 par rapport au scénario de référence – les points représentent les consommations en carburant lorsque soit la demande, soit l'efficacité sont modifiés

La demande totale de carburant varie considérablement d'un scénario à l'autre. Bien que tous les scénarios qui tiennent compte uniquement de l'efficacité présentent une consommation de carburant inférieure à la référence, **Stuck est le seul scénario qui présente une consommation de carburant inférieure en 2050 lorsque l'efficacité et les changements de la demande sont pris en compte**. Tous les scénarios d'impacts combinés ont une consommation de carburant plus élevée que le scénario de référence en 2030. L'efficacité des PL ne change pas par rapport à la référence dans le scénario dystopique. Lorsque la demande est suffisamment importante, le gaz naturel s'octroie une plus grande part de marché, comme on le voit dans le scénario dystopique. Les scénarios *Cake* et *Strong* uniquement présentent une plus grande utilisation du gaz naturel que les autres scénarios.

En termes d'émissions, **les polluants de l'air ne varient pas avec l'efficacité des véhicules car on suppose que les constructeurs suivent les standards d'émissions**, ce qui signifie que l'augmentation de l'efficacité ne réduit pas la consommation au kilomètre. Par ailleurs, la plupart des **émissions de polluants sont corrélées aux kilomètres parcourus** ce qui signifie qu'une augmentation de la demande aura une conséquence directe sur les émissions.

En 2014, les émissions du secteur transport étaient responsables de plus de la moitié des émissions de NOx. Les **variations des émissions de NOx sont le plus fortement influencées par les PL, et notamment par le nombre total de véhicules à moteur diesel**. L'augmentation du nombre de VL non électriques augmente également les émissions de NOx. Ainsi, *Stuck* a les plus faibles émissions de NOx en 2050 parce que ce scénario a la plus faible demande. Pour *Cake* et *Strong*, les scénarios d'effets combinés ont des émissions plus élevées que les scénarios de demande, bien qu'ils utilisent moins de carburant et parcourent la même distance. Une demande élevée sans amélioration de l'efficacité conduit à se détourner du pétrole en raison de la hausse des prix des produits pétroliers raffinés, ce qui réduit les émissions totales de NOx par rapport aux cas d'impact combiné.

Seule une petite fraction des émissions de SO2 provient des transports aujourd'hui. Le changement le plus important dans les émissions totales de SO2 liées à l'énergie par rapport au scénario de référence en 2050 est de 4 %. Les changements de SO2 liés au transport sont dus aux émissions indirectes associées à la production d'électricité pour les véhicules électriques et sont faibles par rapport aux autres sources de SO2.

**Les émissions de CO2 étant directement liées à la consommation de carburant, elles présentent les plus grandes variations entre les scénarios.** Les réductions de CO2 sont dues aux importantes



améliorations de l'efficacité énergétique dans certains scénarios. L'augmentation de la demande entraîne une hausse des émissions en raison de l'augmentation de la consommation de carburant. Plus d'un quart des émissions de GES des États-Unis en 2015 provenaient du transport, de sorte que les changements dans les émissions du transport peuvent être importants pour les niveaux d'émissions globaux.

### Limites et conclusion

Dans ce document, les études ont été réalisées en tenant compte de l'évolution du parc avec les données actuelles et les tendances d'évolution. Ainsi, les résultats ne tiennent pas compte du potentiel développement de la mobilité automatisée électrique : les hypothèses effectuées sur les véhicules automatisés sont les mêmes que pour les véhicules conventionnels.

De plus, dans cet article, la dépendance régionale n'a été que peu exploitée en raison de l'uniformité du territoire américain et de la faible différence entre les neuf régions de l'étude.

Les résultats étaient assez attendus mais certains sont surprenants. **Sans impact fort sur les habitudes de conduite, les impacts de l'automatisation sur l'énergie sont faibles.** Lorsque la demande de déplacements est élevée, les prix des carburants augmentent, ce qui peut atténuer la hausse de la consommation d'énergie en induisant des changements de type de carburant et de véhicule.

Les scénarios *Cake* et *Strong* présentent des résultats contre-intuitifs pour les émissions de polluants principaux : **l'amélioration de l'efficacité augmente les émissions en réduisant l'utilisation de véhicules alternatifs.** Étant donné que la plupart des polluants atmosphériques ne sont déterminés que par le type de véhicule et les kilomètres parcourus (en partant du principe que les véhicules conventionnels émettent aux normes), **les scénarios avec la même demande de déplacements et davantage de véhicules conventionnels présentent des émissions plus élevées.**

Ces travaux permettent de montrer l'importance de la politique de développement et de déploiement mise en œuvre. Cependant, l'article ne donne pas les répercussions des politiques de tarifications ou d'orientation des usagers, qui pourraient affecter l'usage et le parc automobile.

*« Can autonomous vehicle reduce greenhouse gas emissions? A country-level evaluation », F Liu, F Zhao, Z Liu, H Hao<sup>31</sup>, Elsevier, 2019*

L'étude de cet article se déroule sur un territoire en Chine. La modélisation effectuée compare **plusieurs scénarios à partir de différentes évolutions possibles de la part de véhicules automatisés partiellement et totalement automatisés dans la circulation.**

### Hypothèses

Quatre scénarios sont construits dans cette étude.

Dans le scénario (a), **les véhicules partiellement automatisés seront progressivement retirés du marché, et les véhicules totalement automatisés finiront par dominer.**

Dans le scénario (b), **après une croissance relativement lente, les véhicules partiellement automatisés atteindront un développement soutenu et stable lorsque les véhicules totalement automatisés suivront le rythme du scénario (a).**

Dans le troisième scénario (c), **il y aura une croissance rapide des véhicules totalement automatisés.** La part de marché pourrait même atteindre près de 90 %, et les véhicules partiellement automatisés ne représenteraient qu'une petite partie.

Dans le quatrième scénario (d), **aucun véhicule automatisé ne sera introduit sur le marché, qu'ils soient partiellement automatisés ou totalement.**

---

<sup>31</sup> Les auteurs appartiennent à l'université de Tsinghua en Chine.

Les hypothèses sur l'évolution de la flotte de véhicules conventionnels sont prises par rapport à de précédentes études. En effet, le renouvellement du parc sera impacté par l'arrivée des véhicules totalement automatisés par exemple.

De même, concernant les véhicules kilomètres parcourus, les résultats des précédents travaux sont très variables. Les auteurs ont choisi de s'appuyer sur l'étude de Fagnant et al. en considérant que les **véhicules kilomètres parcourus seront croissants linéairement avec une quantité faible de véhicules automatisés sur le marché puis que cette donnée sera décroissante à partir d'un certain seuil.**

Le **comportement des véhicules automatisés est choisi avec une éco-conduite**, dans la mesure où il est plus facile de contrôler le comportement de conduite des véhicules automatisés que des véhicules conventionnels. En ce qui concerne l'augmentation des vitesses de circulation des véhicules et en tenant compte à la fois des études précédentes et de la situation en Chine, une **augmentation de la consommation de carburant de 0 à 3 % pour les véhicules à moteur partiellement automatisés est estimée et de 3 à 10 % pour les véhicules à moteur entièrement automatisés.**

D'autres paramètres comme le platooning, la réduction du niveau d'accidents, l'évolution du poids des véhicules sont détaillés dans cette étude et expliqués par des travaux antérieurs.

## Résultats

La figure de gauche ci-dessous montre la part de marché des véhicules automatisés dans le parc automobile des véhicules légers. Les résultats de la proportion de véhicules automatisés dans **la flotte de véhicules d'ici 2050 montrent que la part de véhicules totalement automatisés pour les scénarios 1 à 3 atteindra 42 %, 53 % et 72 %, respectivement.**

La figure de droite ci-dessous montre l'évolution du nombre total de véhicules-kilomètres parcourus en fonction des hypothèses retenues dans cette étude. Étant donné que les hypothèses de base relatives à la propriété et aux véhicules-kilomètres parcourus ne sont pas agressives dans cette étude, il n'y a pas de différences significatives entre les scénarios.

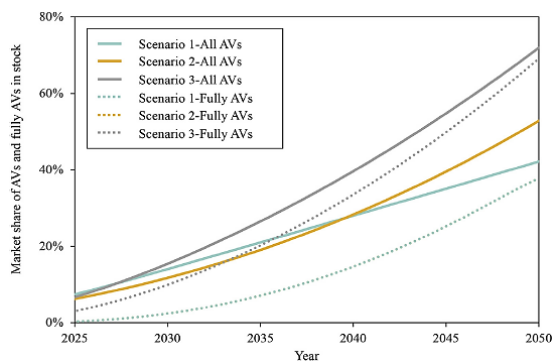


Figure 29 : Part de marché des VA suivant les scénarios considérés

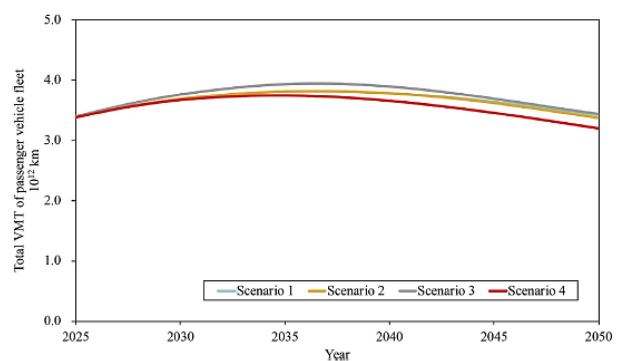


Figure 30 : Total des véhicules-kilomètres parcourus par les flottes de VP dans les différents scénarios

Dans l'ensemble et comme le montre la figure ci-dessous, l'introduction des véhicules automatisés ne **modifiera pas de manière significative les émissions de GES du parc de VP** ; comme l'intégration des véhicules automatisés se produit relativement tard, elle n'aura pas d'influence significative sur l'heure de pointe des émissions de GES du parc de VP.

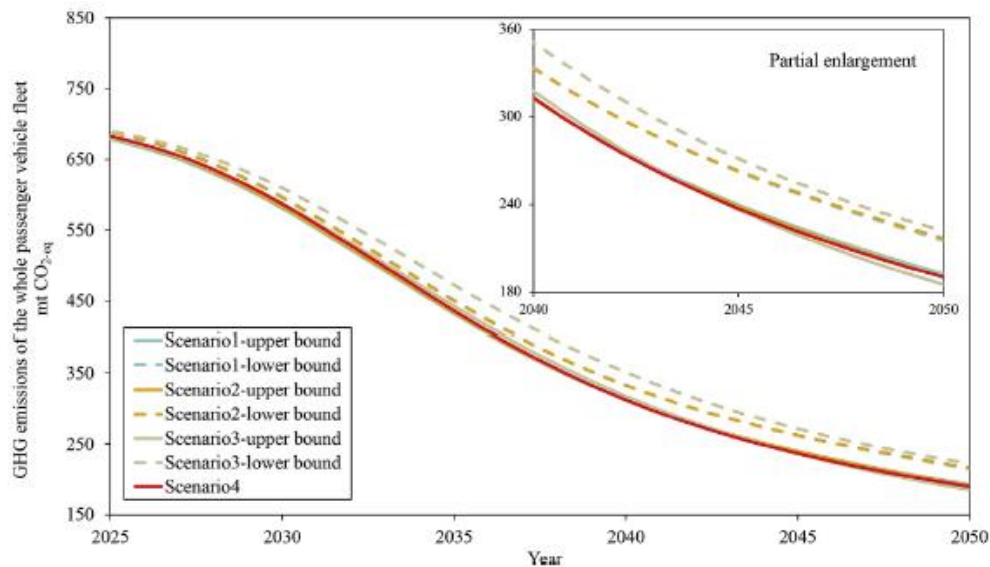


Figure 31 : Émissions de GES de l'ensemble du parc de VP

Il y a peu de différence entre les scénarios 1 et 2, quelles que soient les conditions de limite supérieure ou inférieure de l'économie de carburant. Cette constatation signifie que le **déploiement des véhicules partiellement automatisés n'aura pas un grand impact sur les résultats finaux**. Le scénario 3, qui présente le plus fort taux de pénétration de véhicules totalement automatisés, présente à la fois les meilleures et les pires émissions de GES. En 2045, le scénario 3, qui présente une meilleure économie de carburant, atteint même un résultat inférieur à celui du scénario 4, qui ne prévoit pas de déploiement des véhicules automatisés. Ce résultat signifie que **l'introduction des véhicules automatisés deviendra progressivement un moyen efficace de réduire les émissions de GES des parcs de VP**. Dans les conditions de la limite supérieure, les émissions de GES du scénario 3 sont nettement supérieures à celles de tous les autres scénarios

Dans les conditions de la limite supérieure d'économie de carburant, les courbes des scénarios 1 à 3 se chevauchent presque avec le scénario sans véhicules automatisés. Cette constatation montre que **l'amélioration du taux de consommation de carburant compense l'augmentation de la distance parcourue par le véhicule**. En outre, à mesure que la croissance des véhicules kilomètres parcourus diminue, le taux de pénétration de 100 % de véhicules totalement automatisés commence à montrer ses avantages en matière d'économie de carburant. À mesure que la croissance des véhicules totalement automatisés augmente dans les scénarios 1 et 2, les écarts entre les trois scénarios se réduisent progressivement, ce qui est partiellement dû au déclin de la croissance des véhicules kilomètres parcourus après le pic. Les principales différences sont toujours dues aux variations du taux de consommation de carburant.

La figure ci-dessous montre l'**analyse de sensibilité** des impacts des changements dans les véhicules kilomètres parcourus des véhicules automatisés et les taux de consommation de carburant des véhicules automatisés sur les émissions de GES du parc automobile. Les lignes pleines représentent les sensibilités des véhicules kilomètres parcourus des véhicules entièrement automatisés. Les lignes pointillées représentent les sensibilités de la consommation de carburant des véhicules. Les **changements dans les véhicules kilomètres parcourus et la consommation de carburant des véhicules ont un impact plus important à long terme qu'à court terme**. Les résultats indiquent également que les émissions de GES sont plus sensibles à l'économie de carburant des véhicules automatisés.

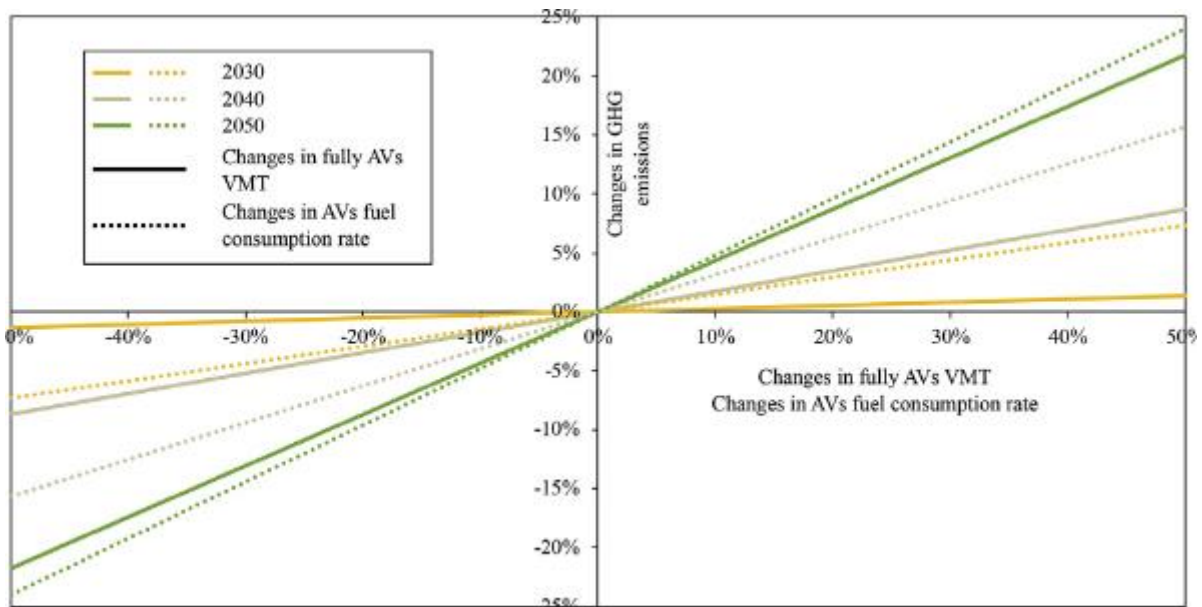


Figure 32 : Analyse de sensibilité des changements dans les véhicules kilomètres parcourus pour les VA totalement automatisés, les taux de consommation de carburant VA et les émissions de GES.

Cependant, les écarts entre les changements causés par les véhicules kilomètres parcourus et l'économie de carburant se réduisent progressivement. Ainsi, **le contrôle des niveaux de consommation d'énergie plus élevés générés par les véhicules automatisés serait un facteur clé**.

### 3. Trafic et congestion

Cette section décrit les implications du développement des véhicules automatisés sur le trafic et la congestion ainsi que sur la performance. Les travaux détaillés ici ont été rédigés par les chercheurs de VEDECOM.

*« Assessing the impacts of shared autonomous vehicles on congestion and curb use: A traffic simulation study in The Hague, Netherlands », I. Overtoom, G. Correia, Y. Huang, A. Verbraeck<sup>32</sup>, Int. J. Transp. Sci. Technol., 2020*

L'institut néerlandais de recherche sur la mobilité s'attend à ce que les véhicules autonomes (VA) et les véhicules autonomes partagés (SAV) remodelent les villes au XXI<sup>e</sup> siècle. Selon sa vision, les véhicules autonomes et à la demande pourraient commencer à répondre à une part croissante de la demande de transport. Cela pourrait conduire à un système sociotechnique hautement efficace et durable, dans lequel des taux de mobilité plus élevés sont atteints avec moins de ressources.

Toutefois, ils présentent également des scénarios moins positifs, où la tolérance à l'égard de l'allongement des temps de trajet entraîne des niveaux élevés de congestion routière et où l'éternelle lutte entre sécurité et efficacité paralyse l'industrie. En outre, peu d'études mentionnent ce que le comportement de conduite des SAV sur les routes peut signifier pour les niveaux de congestion et la circulation en général dans les zones urbaines. Ainsi, l'adaptation et l'intervention précoces des municipalités sont cruciales pour déterminer comment les SAV peuvent affecter le trafic urbain et la mobilité en général. Une chose est sûre : les technologies des véhicules autonomes et partagés sont à un stade de développement avancé et ce n'est qu'une question de temps avant que les SAV n'entrent dans le trafic urbain. Ce que cela signifiera pour le trafic n'est pas encore clair.

#### **Principaux objectifs de recherche :**

- Fournir des informations sur les effets de congestion de différents taux de pénétration des SAV dans le trafic urbain, en se concentrant sur les différences de comportement microscopique par rapport aux voitures conventionnelles, et sur le réseau routier principal urbain.
- Étudier comment la municipalité pourrait intervenir en utilisant des solutions faciles à mettre en œuvre pour faciliter le nouveau mélange de trafic urbain auquel on peut s'attendre à l'avenir.

Les VA et les SAV peuvent potentiellement influencer la congestion du trafic urbain, tant en termes d'intensité du trafic qu'en termes de capacité routière. Les niveaux microscopiques et macroscopiques de l'état du trafic dépendent de la manière dont le marché se développe et donc de l'évolution des taux de pénétration des VA et SAV personnels dans le trafic urbain. Les intensités de trafic sont influencées à un niveau microscopique par ces changements dans la capacité routière et à une échelle macroscopique par les effets de la demande de voyage.

Cette recherche vise à fournir un aperçu des effets de congestion des véhicules autonomes partagés (SAV) sur le trafic urbain. Cette recherche a été effectuée en réalisant une simulation, en utilisant VISSIM et une étude de cas d'un réseau dans la ville de La Haye pendant la pointe du matin en 2040. Plusieurs scénarios de pénétration du marché des SAV ont été testés : 0%, 3%, 25%, 50% et 100% d'utilisation des SAV par les voyageurs. En outre, deux conceptions de réseau ont été mises en œuvre : des voies dédiées aux SAV et des installations de type dépose-minute.

---

<sup>32</sup> Les auteurs sont des chercheurs de l'Université de Technologie (TU) de Delft, aux Pays-Bas.

### **Méthodologie détaillée :**

- Réalisation d'une étude de modélisation : une étude de scénario et une étude de conception.

L'objectif est d'obtenir un aperçu quantitatif de ce qui se passe dans le trafic lorsque des types de véhicules actuellement inexistantes sont introduits. Un réseau d'étude de cas a été choisi dans le centre-ville de La Haye qui contient une route principale urbaine reliant le réseau routier national au réseau routier de niveau inférieur.

#### *Étude de scénario*

Étape 1. Formulation de scénarios réalistes de pénétration du marché, déterminant la présence de véhicules non autonomes, d'AV personnels et de SAV.

Une série d'études de scénarios a donc été réalisée afin d'examiner les effets de différents taux de pénétration des AV personnels et des SAV. En conséquence, 7 scénarios ont été établis.

Étape 2. Formulation d'un modèle conceptuel, esquisse des relations attendues entre les entrées et les sorties du modèle.

- Concept 1 - Une plus grande pénétration des AV personnels augmenterait la capacité de la route et réduirait les variations du flux de trafic. Cela permettrait de réduire les retards et les émissions des véhicules.
- Concept 2 - Une plus grande pénétration des AV personnels réduirait la capacité routière en raison des arrêts en bordure de route, augmenterait l'intensité du trafic et le rapport demande/capacité des feux de signalisation en raison de la circulation (à vide) sur le réseau, et augmenterait les variations du flux de trafic.
- Concept 3 - Tout cela conduisant à une augmentation des retards des véhicules, à une augmentation de la distance parcourue et à une augmentation des émissions.

Étape 3. La configuration de la simulation a été spécifiée : à l'aide du logiciel de simulation de trafic VISSIM. L'adaptation a ensuite été mise en œuvre pour les VA personnels et les SAV.

- Configuration du modèle 1 : Inclure la demande de déplacement en voiture comme facteur externe dans le modèle conceptuel qui pourrait influencer le système en augmentant l'intensité du trafic.
- Configuration du modèle 2 : L'influence de la demande de déplacement en voiture dans le modèle de simulation a toutefois été réduite au minimum afin de fournir une vision claire des effets dus aux différences de comportement de conduite.
- Configuration du modèle 3 : Les comportements décrits des VA personnels et des SAV ont été traduits en classes de véhicules spécifiques dans VISSIM.
- Configuration du modèle 4 : Les caractéristiques de conduite autonome des véhicules sont modélisées en ajustant un ensemble de paramètres des modèles de comportement de conduite intégrés et des distributions.
- Configuration du modèle 5 : Le comportement des SAVs a été modélisé en sélectionnant un certain nombre de VA qui allaient déposer un passager dans le réseau.
- Configuration du modèle 6 : Des instances des classes de véhicules résultantes ont été chargées sur le réseau à différents taux de pénétration en fonction des scénarios.

Étape 4. Réalisation de la vérification du modèle en comparant les mesures d'intensité du trafic et l'animation du comportement des véhicules avec les données d'entrée du modèle telles que définies dans le modèle conceptuel.

Étape 5. La validation du modèle a été effectuée par validation par des experts et par des tests de sensibilité, puisqu'il n'y avait pas de données réelles auxquelles comparer les résultats.

- Six experts de la municipalité de La Haye, de l'université technologique de Delft et d'Arcadis, actifs dans les domaines de la politique des transports, de l'ingénierie du trafic, de la simulation et du transport intelligent ont été interrogés.
- On leur a montré l'animation du modèle et les résultats basés sur 5 passages, et on leur a demandé ce qu'ils pensaient de sa plausibilité. Dans le cadre de l'étude, le modèle et ses résultats ont été jugés plausibles.
- Sur la base des suggestions, une différenciation supplémentaire du comportement des véhicules non autonomes a été créée. Cela a été fait en créant trois ensembles de distributions de vitesse et de fonctions d'accélération/décélération souhaitées : pour les conducteurs défensifs, normaux et sûrs d'eux.

### *Mise en œuvre de l'étude de conception*

Étape 1. Définition d'un ensemble de conceptions de réseau. Il s'agit d'un ensemble de solutions faciles à mettre en œuvre que les municipalités peuvent appliquer pour faciliter l'accès aux nouveaux types de véhicules sans avoir à modifier beaucoup l'infrastructure.

- Pour réduire les effets négatifs attendus des SAV tout en leur permettant d'accéder aux biens immobiliers environnants, deux conceptions faciles à mettre en œuvre ont été définies et leur efficacité a été testée.
  - La première conception consiste à élargir la route principale d'une voie en bordure de trottoir, qui devient alors une voie réservée aux SAV et aux bus.
  - La seconde est une conception dans laquelle des installations de dépose-minute sont construites sur le bord des routes de niveau inférieur, détournant les SAV de la route principale.

### Étape 2. Un modèle conceptuel

- Concept 1 - La conception de la voie réservée peut avoir un effet positif sur le débit du trafic, car la capacité de la route est augmentée et le problème des SAV qui s'arrêtent sur la route, formant des goulots d'étranglement pour les autres véhicules, est résolu.
- Concept 2 - La distance parcourue par les SAV pourrait être réduite, car ils peuvent déposer leurs passagers en un point central du réseau.
- Concept 3 - L'effet négatif peut être une augmentation des mouvements d'entrecroisement sur la route principale et le fait que les SAV utilisent toujours des liaisons à faible capacité pour faire demi-tour sur la route principale.
- Concept 4 - Le concept de dépose-minute devait avoir une influence positive sur la congestion en éloignant les SAV de la route principale, en empêchant l'utilisation des liaisons à faible capacité et en les obligeant à s'arrêter sur le bord de la route.
- Concept 5 - Ce concept devait augmenter la distance parcourue par les SAV, car ils sont envoyés dans des endroits moins centraux.

### Étape 3. Configuration de la simulation

Les concepts ont été mis en œuvre dans les modèles de simulation des quatre scénarios avec différents taux de pénétration des SAVs.

### **Résultats :**

Pour comprendre les effets de la congestion, les résultats ont été extraits du modèle en termes d'indicateurs suivants :

- Retards moyens des véhicules : mesurés en examinant la différence entre le temps de trajet « idéal » de chaque voiture (en flux libre) et le temps de trajet réel sur quatre routes représentatives.

- Distance parcourue : pour tenir compte du fait que les différences de retard peuvent être attribuées à une éventuelle augmentation ou diminution de l'intensité sur le réseau, la distance totale parcourue par tous les véhicules a été rapportée et comparée entre les cas.
- Émissions moyennes : par kilomètre parcouru, elles ont été récupérées à l'aide du module ENVIVER : MODEL TRAFFIC FLOW AND EMISSIONS (EnViVer combine les résultats du logiciel de simulation de trafic avec les modèles d'émissions), un outil d'analyse développé par le TNO. L'idée sous-jacente étant qu'une augmentation de la turbulence du flux de trafic entraîne une augmentation de la consommation d'énergie de tous les véhicules, ce qui peut être mesuré au moyen de la mesure des émissions par kilomètre.

Les résultats ont confirmé l'hypothèse selon laquelle une augmentation du nombre de VA personnels sur la route réduit considérablement la congestion. On peut en conclure que les retards sont faibles dans les scénarios avec VA personnels mais sans SAV, par rapport au scénario sans VA personnels ni SAV. Les valeurs d'émissions dans ce scénario étaient beaucoup plus faibles, ce qui indique une consommation d'énergie plus faible par kilomètre, la distance totale parcourue restant la même. Cela implique que la réduction des retards est réellement un effet du comportement de conduite moins turbulent et plus efficace des AV. La présence de SAV a donné des résultats moins positifs.

Les scénarios avec des quantités réalistes de SAV en plus des AV personnels montrent toujours une réduction du retard par rapport au scénario sans AV personnel et SAV, mais pas autant que les scénarios sans SAV.

Le scénario dans lequel tous les voyageurs utilisent des SAV présente les niveaux de retard les plus élevés. Dans ce scénario, les retards étaient si importants que tous les véhicules n'avaient pas pu entrer dans le modèle à la fin de la période de simulation. En vérifiant les distances et les émissions, pour voir si ces retards étaient dus à une augmentation de l'intensité ou au comportement de conduite sur route des SAV, on a pu constater que la distance totale n'avait pas changé de manière significative entre les scénarios et que les émissions par kilomètre s'étaient considérablement détériorées.

Si les capacités de conduite autonome des SAV contribuent à réduire les embouteillages, ils ont également un effet négatif en s'arrêtant sur le trottoir pour déposer des passagers, en formant des goulets d'étranglement pour les autres usagers de la route et en circulant sur le réseau en utilisant des liaisons à faible capacité.

La conception des voies réservées n'a pas permis de réduire la congestion causée par les VAS.

En revanche, le système de dépose-minute a permis de réduire les retards, mais uniquement pour les taux de pénétration des SAV supérieurs à 25 %.

Ces effets exacts ne sont pas généralisables en raison des limites de la taille du réseau et du logiciel de simulation.

Après avoir mis en œuvre les deux modèles dans quatre scénarios présentant des taux de pénétration variables des SAV, il s'est avéré que le modèle de voies réservées n'a pas permis de réduire les retards et les émissions, même si la distance parcourue par les SAV a été considérablement réduite avec ce modèle. Bien que ce scénario ait impliqué une augmentation de la capacité de la route, l'augmentation des mouvements d'entrecroisement et l'augmentation des demi-tours sur la route principale ont eu un effet négatif sur les retards et les émissions des véhicules, à tel point que les valeurs de ces indicateurs sont restées statistiquement égales pour les véhicules motorisés autres que les VSA. Les retards des bus ont même augmenté avec ce scénario. Cela est dû au fait que les SAV partagent la voie réservée avec le bus, qui peut donc être retardé par l'arrêt des SAV.

En étudiant les simulations de cette conception, on constate que si les routes secondaires sont moins encombrées, les SAV sont plus concentrés sur la route principale, où l'encombrement est accru par les SAV qui ralentissent, se déplacent en zigzag et font demi-tour. Cet encombrement est très indésirable pour la route principale.



Les effets positifs associés à ce scénario peuvent être attribués au fait que les SAV sont éloignés de la route principale, où la circulation est moins entravée et où ils s'arrêtent sur le bord de la route.

**« Congestion Pricing in a World of Self-Driving Vehicles: An Analysis of Different Strategies in Alternative Future Scenarios », Michele D. Simoni, Kara M. Kockelman, Krishna M. Gurumurthy, and Joschka Bischoff, Transportation Research Part C, 2019**

Cette étude examine les effets de différentes stratégies de tarification de la congestion dans des scénarios futurs caractérisés par une forte pénétration du marché des VA et SAV. Les impacts de ces politiques sur le trafic et le bien-être social sont étudiés et comparés aux stratégies classiques : un péage basé sur la distance et un péage fixe basé sur les installations. Afin de refléter les coûts de développement, les capacités et les taux d'adoption incertains de la technologie, ce travail estime deux scénarios distincts d'adoption de la technologie : l'un avec une utilisation privée relativement élevée des VA et l'autre avec une adoption élevée des SAV.

Cette étude cherche à examiner les effets potentiels sur la mobilité, le trafic et l'économie de différents systèmes de tarification de la congestion dans des scénarios futurs alternatifs (l'un caractérisé par une forte adoption des VA, l'autre par une large utilisation des SAV) pour la zone métropolitaine d'Austin, au Texas. Dans les deux scénarios analysés, les véhicules-kilomètres parcourus (VMT) et les retards de circulation augmentent en raison des changements de mode de transport (au détriment du transport en commun traditionnel) et des déplacements à vide des SAV.

Du point de vue de la circulation, tous les programmes de mobilité permettent de réduire considérablement les encombrements. Si les schémas de coût de la congestion ne sont pas nécessairement plus efficaces que les schémas traditionnels en ce qui concerne la demande de déplacements et le trafic, ils apportent des gains économiques plus importants. Plus important encore, les effets des différentes stratégies varient en fonction du scénario. Le système basé sur la distance semble plus efficace dans le scénario axé sur les véhicules à moteur et dans le scénario de base, tandis que le système basé sur les liaisons est plus efficace dans le scénario axé sur les véhicules à moteur. Le schéma basé sur coût marginal et le schéma basé sur le temps de parcours et la congestion sont plus performants dans le scénario orienté SAV que dans le scénario orienté VA. Dans tous les scénarios, c'est le schéma basé sur la congestion des temps de parcours qui apporte la plus grande amélioration du bien-être social.

**« The benefits of autonomous vehicles for community-based trip sharing », M.H. Hasan, P. Van Hentenryck, Transp. Res. Part C, 2021**

Ce travail reconsidère le concept de partage de trajets basé sur la communauté proposée par Hasan et al. (2018) qui tire parti de la structure des habitudes de déplacement et des communautés urbaines pour optimiser le partage de trajets. Il vise à quantifier les avantages des véhicules autonomes pour le partage communautaire de trajets, par rapport à une plateforme de covoiturage où les véhicules sont conduits par leurs propriétaires. Dans le problème considéré, chaque usager spécifie une heure d'arrivée souhaitée pour son trajet entrant (trajet domicile-travail) et une heure de départ pour son trajet sortant (trajet retour). En outre, son temps de trajet ne peut pas trop s'écarter de la durée d'un trajet direct. Des travaux antérieurs motivés par la réduction de la pression de stationnement et de la congestion dans la ville d'Ann Arbor, dans le Michigan, ont montré qu'une plateforme de covoiturage pour le partage communautaire des déplacements pouvait réduire le nombre de véhicules de près de 60 %.

Cette étude étudie les avantages potentiels des véhicules autonomes pour réduire davantage le nombre de véhicules nécessaires pour desservir tous ces trajets quotidiens. Elle reconsidère le concept de partage communautaire des déplacements proposé qui s'appuie sur la structure des schémas de déplacement et des communautés urbaines pour optimiser le partage des déplacements. L'objectif est

de quantifier les avantages des véhicules autonomes pour le partage communautaire des déplacements, par rapport à une plateforme de covoiturage où les véhicules sont conduits par leurs propriétaires.

Elle propose une procédure de génération de colonnes qui génère et assemble des mini-itinéraires pour desservir les déplacements entrants et sortants, en utilisant un objectif lexicographique qui minimise d'abord le nombre de véhicules requis, puis la distance totale de déplacement. L'algorithme d'optimisation est évalué sur un ensemble de données réelles à grande échelle de trajets domicile-travail de la ville d'Ann Arbor, Michigan.

Les résultats de l'optimisation montrent qu'il est possible de tirer parti des véhicules autonomes pour réduire l'utilisation quotidienne des véhicules de 92 %, améliorant ainsi de 34 % les résultats du problème original de partage des trajets domicile-travail, tout en réduisant également les kilomètres parcourus quotidiennement par les véhicules d'environ 30 %. Ces résultats démontrent le potentiel significatif des véhicules autonomes pour le partage des déplacements d'une communauté vers une destination de travail commune.

### **« CoEXIST: Enabling “AutomationReady” Transport Planning », 2020**

Comblent le fossé entre la technologie des véhicules automatisés et la planification des transports et des infrastructures, en renforçant les capacités des autorités à planifier le déploiement des véhicules automatisés est un défi. En conséquence, la planification des transports et des infrastructures dans les villes est une condition préalable essentielle pour tenir les promesses des véhicules automatisés et connectés de réduire la demande d'espace routier et d'améliorer l'efficacité et la sécurité du trafic.

Le projet CoEXist a abordé trois étapes clés de la planification des transports et des infrastructures :

#### *1. Modélisation des transports pour l'automatisation*

Extension validée des outils existants de simulation microscopique des flux de trafic et de modélisation macroscopique des transports pour inclure différents types de VAC (voitures particulières/véhicules utilitaires légers avec différents niveaux d'automatisation).

#### *2. Infrastructure routière prête pour l'automatisation*

Mise au point d'outils permettant d'évaluer l'impact des véhicules automatisés sur l'efficacité de la circulation, la demande d'espace et la sécurité, et de fournir des orientations sur le développement des infrastructures, pour convenir à la fois aux véhicules conventionnels et automatisés.

#### *3. Collectivités locales prêtes pour l'automatisation*

Élaboration de huit cas d'utilisation dans quatre collectivités locales (Göteborg, Helmond, Milton Keynes et Stuttgart), utilisés pour évaluer - avec les outils CoEXist. Pour cinq des cas d'utilisation, un modèle de trafic microscopique est appliqué et pour trois cas d'usage, une approche de modélisation de trafic macroscopique est utilisée.

La spécification de chaque cas d'utilisation comprend :

- la description de l'infrastructure actuelle,
- la demande,
- les modèles de déplacement,
- le contrôle du trafic,
- les conditions de circulation,
- les questions et hypothèses liées à l'introduction des VAC,
- une liste provisoire de mesures potentielles (modifications de l'infrastructure, contrôle du trafic, transports publics, mesures politiques, etc.),
- les modèles et les données disponibles.

Les scénarios décrivent :

- Comment chaque cas d'usage traitera les facteurs d'incertitude liés au développement technologique et les réactions des voyageurs à la nouvelle technologie en termes de niveau d'automatisation, de demande de déplacement et d'adaptation du comportement des voyageurs.
- Dans CoEXist, les scénarios d'un cas d'usage spécifient le niveau d'introduction du véhicule automatisé et connecté, la demande de déplacement et l'adaptation potentielle de l'utilisateur, et dans quelle mesure ces aspects doivent être modifiés dans les simulations.

Le modèle de spécification des scénarios doit décrire comment le cas d'usage traitera trois types de facteurs incertains liés au développement technologique et aux réactions des voyageurs à la nouvelle technologie en termes de :

- niveau d'automatisation,
- demande de déplacement,
- adaptation du comportement du voyageur.

Le retour d'expérience est une matrice dans laquelle chaque ligne définit une expérience, c'est-à-dire une combinaison unique des variables suivantes :

- mesure,
- taux de pénétration,
- ratios des classes VA,
- demande,
- utilisateurs de la route,
- comportement pour les non-VA (cas d'usage microscopique),
- adaptation du voyageur (cas d'usage macroscopique).

*Quels impacts peut-on attendre sur la capacité des routes, les niveaux de congestion et les temps de parcours ?*

L'objectif était ici d'utiliser des méthodes de modélisation pour intégrer les effets des véhicules hautement, mais pas entièrement automatisés, dans les modèles macroscopiques de demande de transport. L'incorporation des effets des VAC sur la performance du trafic se fait en utilisant des facteurs spécifiques d'unité de voiture particulière (UVP) qui dépendent du type de route et des capacités de la classe particulière du VAC. Les facteurs UVP sont déterminés en évaluant les données des simulations microscopiques de flux de trafic. Les facteurs UVP utilisés dans cette étude sont en partie dérivés d'observations sur une piste d'essai à Helmond aux Pays-Bas.

Au stade de l'introduction, les VAC sont moins performants que les véhicules conventionnels (VC) et ne peuvent pas fonctionner de manière automatisée dans les environnements urbains. Au cours de la phase d'établissement, les VAC ont de meilleures performances que les VC, sauf en urbain. Dans la phase de prévalence, les performances des VAC sont meilleures sur tous les types de routes.

*Quel est l'effet de la congestion sur les ronds-points pendant les différents stades des VAC ?*

L'objectif de ce cas d'usage était d'évaluer l'impact sur l'infrastructure existante et future des ronds-points avec l'introduction des VAC. Le comportement des véhicules dans les ronds-points est essentiel, en ce qui concerne le temps d'arrêt et les vitesses d'approche, pour la performance du trafic sur les principales artères de Milton Keynes.

Le temps de parcours moyen pour l'étape d'introduction augmente de manière significative, de même que le retard. L'amélioration du débit dans le réseau est remarquable et le temps de trajet moyen s'améliore de 20%. Dans l'étape établie, le temps de parcours moyen observé diminue de manière significative par rapport au cas de base. Les VC présentent également une nette amélioration du temps de parcours total.

« *The Oslo Study – How autonomous cars may change transport in cities?* », COWI and PTV Group, 2019.

L'objectif de cette étude est de se projeter dans un avenir où les **véhicules automatisés et les services de mobilité servicielle (MaaS) seront les principaux acteurs de l'industrie automobile les systèmes de covoiturage ont remplacé la possession d'une voiture privée.**

L'étude a effectué des calculs pour différents scénarios futuristes pour la région d'Oslo en utilisant un modèle de transport développé pour analyser les conséquences des véhicules automatisés et des systèmes MaaS. L'étude a basé ses calculs sur la demande de transport actuelle. Avec cette connaissance des déplacements à Oslo et Akershus, ils ont **simulé un avenir avec une mise en œuvre complète des véhicules automatisés dans une flotte partagée, avec et sans covoiturage.** Six scénarios différents ont été modélisés dans cette étude. Les scénarios diffèrent dans la façon dont les usagers se déplaceront avec le nouveau concept MaaS.

L'étude a examiné les **effets sur les véhicules-kilomètres, la taille de la flotte et le niveau de service.**

- **Impact sur le réseau** : dans le meilleur des cas, on observe une réduction du trafic de 14 % à 31 % ; dans le pire des cas, le volume du trafic double, entraînant une rupture totale de la circulation.
- Bien que les véhicules automatisés soient capables d'utiliser la capacité routière plus efficacement que les conducteurs humains, **l'infrastructure actuelle ne parviendrait pas à faire face à une telle augmentation.**
- Tous les scénarios montrent une réduction significative du nombre de véhicules nécessaires.
- Un trajet moyen en voiture privée dans le scénario de référence dure 12 minutes et est long de 12 kilomètres, alors qu'un trajet moyen en bus ou en tramway est de 13 kilomètres mais dure 32 minutes.
- Dans le scénario où les utilisateurs de voitures particulières partagent des voitures sans covoiturage, la distance de déplacement ne change pas. Dans le scénario où les utilisateurs de voitures particulières partagent également des trajets, la distance moyenne augmente, et le temps de trajet augmente. Dans les scénarios où les utilisateurs actuels des transports publics passent à une option MaaS, l'étude obtient approximativement les mêmes résultats sur la durée et la distance moyennes des trajets.
- Cependant, **pour les utilisateurs des transports publics, il y aurait une réduction significative du temps de trajet, de 32 minutes à 21 minutes en moyenne.**