



MAI 2019

LES ENJEUX ET IMPACTS LIÉS À LA MISE EN PLACE D'UN TRANSPORT ÉLECTRIQUE AUTONOME AU QUÉBEC

RAPPORT DE RECHERCHE

KHEOPS

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



LES ENJEUX ET IMPACTS LIÉS À LA MISE EN PLACE D'UN TRANSPORT ÉLECTRIQUE AUTONOME AU QUÉBEC

MAI 2019

Soumaya Cherkaoui

Nathalie Drouin

Jean-François Bruneau

Amaury Philippe

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

ISBN : 978-2-9818612-0-7

Dépôt légal : 2020

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Bibliothèque et Archives Canada

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

NOTES SUR LES AUTEURS

Soumaya Cherkaoui | Université de Sherbrooke

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

Nathalie Drouin | Directrice exécutive KHEOPS

Nathalie Drouin est directrice exécutive de KHEOPS - Consortium international de recherche sur la gouvernance des grands projets d'infrastructure. Elle est professeure à l'École des Sciences de la gestion de l'Université du Québec à Montréal depuis plus de 15 ans et professeure adjointe à l'Université des technologies de Sydney, en Australie, où elle a également été reçue professeure éminente invitée (*Distinguished Visiting Scholar*). Aussi membre du comité d'audit de Parc Canada et rédactrice en chef de *l'International Journal of Managing Project in Business*, ses activités de recherche se concentrent sur la gestion organisationnelle de projet et sur le leadership au sein des projets.

Jean-François Bruneau | IVADO

Jean-François Bruno, conseiller aux partenariats (CIRRELT) chez IVADO, est titulaire d'une maîtrise en géographie et détenteur d'un doctorat en génie civil (Ph.D.). Il cumule 23 années de recherche dans le domaine du transport et a dirigé, dans les secteurs académiques (professeur en géomatique) et privés, des mandats gouvernementaux et municipaux liés notamment à la sécurité routière, la mobilité active et le transport collectif. Il s'intéresse aux véhicules connectés et autonomes, aux interactions entre véhicules et usagers vulnérables, ainsi qu'au transfert modal.

Amaury Philippe | Polytechnique Montréal

Amaury Philippe est étudiant au doctorat en Gestion des Opérations et de la Logistique, à HEC Montréal. Il travaille sur les enjeux logistiques humanitaires, plus particulièrement sur la gestion des réponses aux catastrophes naturelles. Au moment de la rédaction du rapport, Amaury était étudiant à Polytechnique Montréal. Aujourd'hui, Il détient un double diplôme en génie Industriel Option Logistique, de l'École Polytechnique Montréal (M. Ing.) et de l'École Nationale Supérieure des Mines de Douai (diplôme d'ingénieur). Ses recherches portent principalement sur la logistique des transports, les évolutions technologiques de ces derniers et l'optimisation des réseaux.

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Ce rapport étudie les enjeux et impacts liés à la mise en place d'un transport électrique autonome au Québec. L'accent sera principalement porté sur les milieux urbains.

Un état d'avancement de cette technologie sera d'abord exposé. Les différents enjeux et impacts liés au déploiement des véhicules autonomes seront ensuite successivement traités. Ces enjeux et impacts englobent de nombreuses notions, dépassant largement le simple cadre technologique.

Les enjeux seront d'abord divisés en deux grands types : les enjeux sociaux et les enjeux de transition. Les enjeux sociaux sont centrés autour des notions d'acceptation et d'acceptabilité des véhicules autonomes par les individus, ainsi que des notions de sécurité et d'éthique. Pour les enjeux de transition, il est considéré que les véhicules ont été acceptés socialement, et la réflexion est axée sur les mesures à prendre dans ce cas pour intégrer les véhicules autonomes sur les routes. Trois grands thèmes s'y dégagent : les infrastructures à mettre en place, la cohabitation et la légalisation.

Dans un second temps, les impacts du transport autonome seront analysés. Le but est de déterminer les conséquences induites par l'introduction des véhicules autonomes dans la flotte. Quatre grandes catégories d'impacts ont été établies : l'évolution de la mobilité, le réaménagement du territoire, la portée économique et l'empreinte environnementale.

Cette étude amène à la conclusion que la mise en place d'un transport électrique autonome au Québec peut être potentiellement bénéfique, mais qu'une réflexion et une planification en amont des autorités municipales et de transport sur divers thèmes divers s'avèrent nécessaires afin d'en récolter les bénéfices.

TABLE DES MATIÈRES

NOTES SUR LES AUTEURS.....	iii
SOMMAIRE EXÉCUTIF.....	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
1. INTRODUCTION	1
2. MÉTHODOLOGIE	2
3. ÉTAT D'AVANCEMENT DES VÉHICULES AUTONOMES.....	3
3.1 Présentation de l'état actuel	4
3.2 Évolutions à venir	5
4. LES ENJEUX DU TRANSPORT ÉLECTRIQUE AUTONOME	7
4.1 Les enjeux sociaux	7
4.1.1 Acceptation et acceptabilité.....	7
4.1.1 Sécurité routière.....	9
4.1.1 Sécurité des données	12
4.1.2 Éthique	13
4.2 Les enjeux de transition	15
4.2.1 Infrastructures à mettre en place.....	15
4.2.2 Cohabitation et impact sur le trafic.....	18
4.2.3 Légalisation.....	20
5. LES IMPACTS DU TRANSPORT ÉLECTRIQUE AUTONOME.....	23
5.1 Évolution de la mobilité	23
5.1.1 Nouvelle mobilité	23
5.1.2 Développement du partage	24
5.1.3 Interactions avec le transport public.....	26

5.2	Réaménagement du territoire	27
5.2.1	Démographie et évolution spatiale des villes.....	27
5.2.2	Réorganisation des stationnements.....	28
5.3	Portée économique.....	29
5.3.1	Coûts pour les individus	29
5.3.2	Coûts liés aux dépenses des gouvernements.....	30
5.3.3	Impacts sur le marché du travail	31
5.4	Empreinte environnementale	32
5.4.1	Impacts sur les émissions	32
5.4.2	Le cas des véhicules électriques	33
6.	CONCLUSION.....	35
	RÉFÉRENCES.....	36

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Classification internationale des niveaux d'automatisation SAE [3]	3
Figure 2 : Navette autonome électrique NAVYA à Candiac, Québec [14]	5
Figure 3 : Concept EASCY développé par l'entreprise PwC [3]	5
Figure 4 : Exemple de dilemmes moraux [27]	14
Figure 5 : Concept de platooning [62]	19
Figure 6 : Interaction entre l'autonomie et le partage [3]	24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Différents facteurs d'acceptation et acceptabilité	8
Tableau 2 : Enjeux, risques et solutions reliés à la sécurité routière	10
Tableau 3 : Enjeux, risques et solutions reliés à la sécurité des données	12
Tableau 4 : Enjeux et contraintes éthiques	13
Tableau 5 : Enjeux et opportunités en rapport avec les infrastructures	16
Tableau 6 : Enjeux, risques et solutions pour la cohabitation	18
Tableau 7 : Enjeux, risques, solutions et opportunités relevant de la légalisation	20
Tableau 8 : Opportunités de nouvelle mobilité	23
Tableau 9 : Intérêt, risque et opportunités du partage de véhicules	25
Tableau 10 : Risques et solution des interactions avec le transport public	26
Tableau 11 : Risques et opportunités des évolutions démographiques et spatiales	27
Tableau 12 : Risque et opportunités de la réorganisation des stationnements	28
Tableau 13 : Risque et opportunités des coûts pour les individus	29
Tableau 14 : Risques et opportunités vis-à-vis des coûts gérés par les gouvernements	30
Tableau 15 : Risques et opportunités liés au marché du travail	31
Tableau 16 : Risque, solution et opportunités engendrés par la notion d'émission	32
Tableau 17 : Risque et opportunités reliés aux véhicules électriques	33

1. INTRODUCTION

Le transport autonome est souvent considéré comme la prochaine grande rupture technologique. À l’image du développement d’Internet et des téléphones intelligents ces dernières années, le transport autonome va changer drastiquement les comportements de mobilité terrestre. Et puisque les routes et rues permettent plus de 90% des déplacements des personnes et des biens [1], l’impact sur la société sera conséquent. Si les véhicules autonomes ne sont pas encore prêts aujourd’hui à se déployer sur les routes, les progrès s’effectuent rapidement. Afin de tirer profit des avantages potentiels du transport autonome et encadrer son impact négatif de façon cohérente, il convient aux gouvernements et aux autorités municipales et de transport d’anticiper cette évolution pour adapter au mieux leurs directions politiques et de planification. Pour cela, il est nécessaire de comprendre dans quelle mesure les véhicules autonomes vont impacter chaque aspect de la vie quotidienne. La présente étude se situe ce contexte et se propose de répertorier les divers enjeux et impacts soulevés par le transport autonome.

Les enjeux relevés sont très vastes et touchent plusieurs aspects dont l’acceptation et l’acceptabilité sociale, la sécurité routière et de données, ainsi que des aspects éthiques. D’autres enjeux relèvent de la transition vers l’introduction du transport autonome en milieu urbain. Il s’agit notamment des besoins en nouvelles infrastructures à mettre en place, de la cohabitation avec le transport non autonome, et des aspects de légalisation.

Les impacts du transport électrique autonome se feront sentir grandement dans l’évolution de la mobilité des citoyens et dans les nouveaux réaménagements du territoire à prévoir. Cette nouvelle technologie aura également des portées économiques et environnementales. Ces thèmes serviront de base à l’analyse des impacts du transport autonome et à l’évaluation des opportunités et défis auxquels feront face les autorités municipales et de transport dans les prochaines années, particulièrement la Ville de Montréal et l’ARTM.

2. MÉTHODOLOGIE

L'objectif de l'étude est de répertorier les différents enjeux et impacts que pourrait avoir le déploiement des véhicules complètement autonomes sur les routes. Le transport autonome sera souvent considéré comme électrique dans ce rapport, ce qui en est le développement le plus probable techniquement. Une revue de littérature a été effectuée. Les références sont présentées à la fin de ce rapport. La structure utilisée est une étude des différents aspects de la problématique. Dans le corps du texte, plusieurs articles seront mis en avant, par lien numérique avec la liste de références finale, pour tenter d'amener le plus d'exhaustivité et de points de vue complémentaires provenant des différents chercheurs.

3. ÉTAT D'AVANCEMENT DES VÉHICULES AUTONOMES

Les véhicules autonomes vont constituer la grande rupture technologique de la prochaine décennie, à l'image des téléphones cellulaires il y a quelques années [2]. Les développements sont déjà avancés et l'autonomie totale de véhicules pourrait devenir réalité autour de 2030, pour dominer l'industrie automobile et devenir la norme dans les années 2050 [2].

La notion d'autonomie de véhicule a été définie précisément par la Society of Automotive Engineers (SAE) en 2014. Cette norme est internationale, elle est couramment utilisée par toutes les parties prenantes du domaine. Elle sera donc également utilisée tout au long de ce rapport. Comme le montre l'illustration ci-dessous [3], un véhicule peut être classé en six catégories d'autonomie, du niveau 0 au niveau 5. Plus le niveau augmente, plus le niveau d'autonomie est grand, et moins l'apport d'un conducteur humain est nécessaire. Ainsi, un véhicule de niveau 0 (que nous appellerons SAE-0 dans la suite pour simplifier) est un véhicule manuel traditionnel, tandis qu'un véhicule de niveau 5 (SAE-5) est complètement autonome. Un SAE-5 n'a donc même pas besoin de conducteur et peut se déplacer seul.

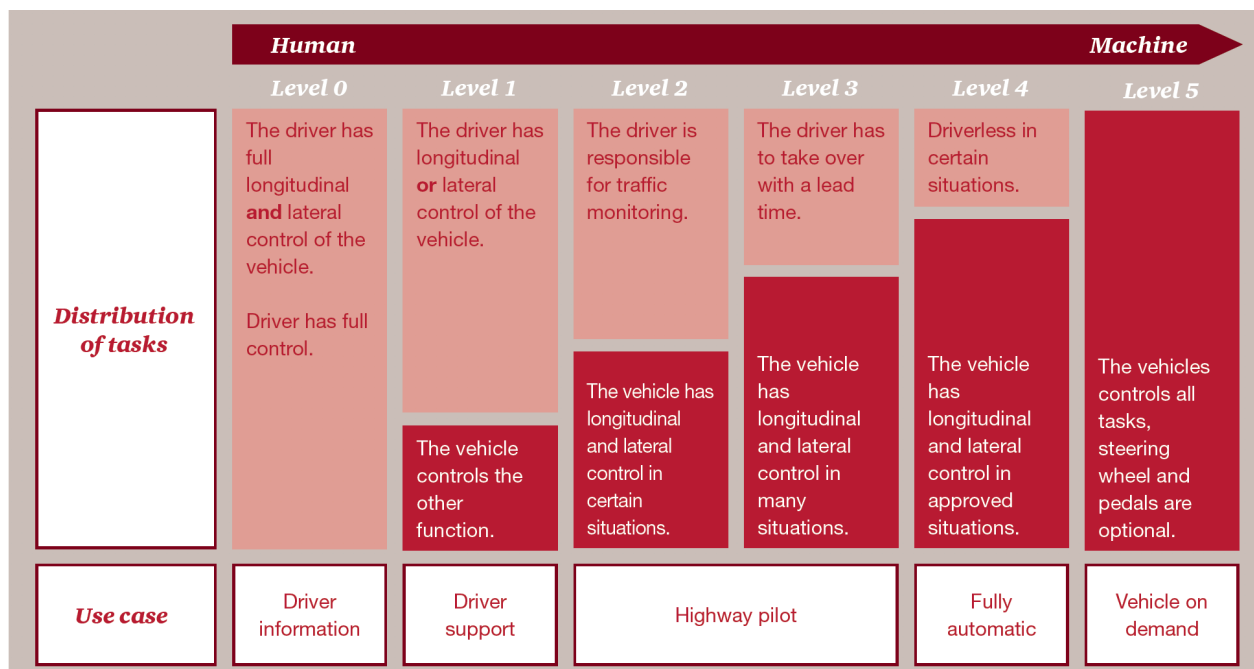


Figure 1 : Classification internationale des niveaux d'automatisation SAE [3]

3.1 PRÉSENTATION DE L'ÉTAT ACTUEL

En repartant de la classification SAE ci-dessus, il est à noter que seuls des modèles de niveau SAE-3 (ou moins) sont disponibles au public pour le moment. Audi en propose notamment. Pour un SAE-3, la présence d'un conducteur est toujours indispensable, même si certaines tâches sont déléguées à la machine. D'autres constructeurs développent des niveaux 3 et 4 qui devraient bientôt être disponibles [4,5]. Les technologies qui permettent aux véhicules autonomes d'évoluer sont principalement les capteurs et les technologies de communication entre machines (V2V pour « Vehicle to Vehicle ») et de communication avec l'infrastructure (V2I pour « Vehicle to Infrastructure ») [2]. Nissan et Volvo espèrent avoir des fonctionnalités de conduite automatique dans plusieurs véhicules commercialisés autour de 2020 [6,7]. De nouveaux joueurs de l'industrie automobile, tels Google, Apple et Uber, visent à développer un prototype de véhicule complètement autonome sur le même horizon, c'est-à-dire dans la décennie des années 2020 [6,8]. Plus de quarante entreprises dans le monde sont en train de développer des véhicules autonomes [9]. En fait, la majorité de la recherche actuelle se fait sur les développements technologiques [6]. Mais même si ces développements avancent rapidement, de nombreux autres enjeux subsistent et sont à régler avant l'intégration des véhicules autonomes au marché qui est prévue dans les années 2030, 2040, voire 2050 [1,6]. Ces différents enjeux seront approfondis dans la partie ultérieure.

Une fois que les véhicules autonomes commenceront à s'intégrer dans la flotte mondiale, un enjeu majeur est leur taux d'implantation [5]. Il y a une incertitude considérable pour prévoir ce taux de pénétration dans le marché : par exemple, certains experts considèrent que la transition sera effectuée dans les années 2030 [10], tandis que d'autres pensent que les véhicules complètement autonomes fiables ne seront pas disponibles commercialement avant 2030/2040.

Au Canada, la situation évolue rapidement également. En Ontario, des essais avec des véhicules sans conducteur ont été acceptés en cohabitation avec les véhicules classiques. Dans le même temps, des navettes autonomes ont été mises en place au Québec, en Alberta et en Colombie-Britannique [11]. Au Québec, une navette autonome a été mise en service dans la ville de Candiac, en 2018, en collaboration avec Keolis Canada. Ce minibus sans chauffeur suit un tracé de deux kilomètres entre le stationnement incitatif de Candiac et l'intersection des boulevards Marie-Victorin et Montcalm Nord, avec plusieurs arrêts desservis sur le trajet [12,13]. Keolis Canada précise d'ailleurs que « la navette franchit l'intersection en complète autonomie, grâce aux feux de signalisation intelligents et connectés au véhicule » [12]. Ce projet est le « premier projet de démonstration longue durée de navette autonome 100% sur voie publique en sol canadien » [13]. Le service de la navette a été interrompu durant l'hiver 2019 pour étudier l'impact des hivers québécois : l'impact météorologique est en effet supposé important sur le fonctionnement des véhicules autonomes. Le véhicule a une capacité de 15 passagers et une vitesse d'exploitation de 25 km/h. Ses objectifs principaux sont de faciliter l'accessibilité et les déplacements de chacun, grâce à l'optimisation du temps de trajet, aussi bien pour les usagers du transport en commun que pour les circulations sur un site privé [13].



Figure 2 : Navette autonome électrique NAVYA à Candiag, Québec [14]

Par ailleurs, cette navette autonome NAVYA est actuellement développée dans 17 pays à travers 25 projets, preuve que le monde entier se prépare à la transition autonome et électrique. En effet, les évolutions à venir sont censées être importantes, et ce à l'échelle mondiale.

3.2 ÉVOLUTIONS À VENIR

PwC présente le concept « EASCY » pour décrire le futur de l'industrie automobile. C'est un acronyme décrivant les cinq principales caractéristiques de la mobilité des prochaines années : Électrique, Autonome, Partagé, Connecté et Mis à jour Annuellement [3]. La mobilité sera également plus facile, plus flexible, et à la demande.

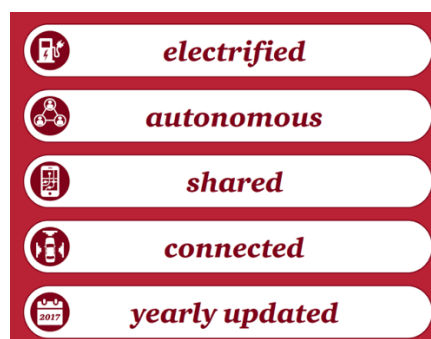


Figure 3 : Concept EASCY développé par l'entreprise PwC [3]

Il faut remarquer que ces notions sont certes complémentaires, mais indépendantes. Un véhicule autonome n'est pas forcément électrique, tout comme il n'est pas forcément connecté. Toutefois, ces notions sont censées se développer en harmonie. Elles seront développées dans la suite du rapport, l'accent principal de l'étude étant mis sur le volet d'autonomie.

Les gouvernements commencent déjà à s'adapter pour s'équiper en véhicules électriques autonomes. Par exemple, en France, un projet du gouvernement mis en place en janvier 2019 vise un parc de 2,4 millions de véhicules hybrides et électriques rechargeables pour 2023. Un autre objectif a également été établi : la multiplication par cinq de la vente de véhicules 100% électriques d'ici fin 2022, et la volonté de déployer 100 000 bornes de recharge pour la même échéance [1]. PwC expose de son côté trois statistiques marquantes. Plus de 55% des nouveaux véhicules achetés pourraient être complètement électriques en 2030. L'inventaire des véhicules devrait baisser de 22% aux États-Unis et 28% en Europe d'ici 2030, mais les véhicules auront une durée de vie plus courte, car ils seront plus utilisés et sur de plus longues distances. Enfin, 40% du kilométrage européen pourraient être couverts par des véhicules autonomes en 2030 (SAE-3 et SAE-4) [3].

4. LES ENJEUX DU TRANSPORT ÉLECTRIQUE AUTONOME

Les enjeux liés à une intégration des véhicules autonomes sur les routes sont nombreux. On peut les décomposer en deux catégories principales : les enjeux sociaux concernant les rôles humains, et les enjeux de transition concernant l'accompagnement de l'introduction ces nouvelles technologies.

4.1 LES ENJEUX SOCIAUX

4.1.1 ACCEPTATION ET ACCEPTABILITÉ

Les opinions publiques vont jouer un rôle crucial dans le développement des véhicules autonomes [15]. Les notions d'acceptation et d'acceptabilité sont déterminantes dans le sens où elles influent directement sur le taux d'implémentation des véhicules autonomes sur le marché [16]. Ces deux notions sont distinctes : il convient de les définir. L'Office québécois de la langue française en propose les définitions suivantes. L'acceptabilité sociale est l'« ensemble des caractéristiques qui font que l'exploitation d'une ressource est jugée comme étant potentiellement acceptable par une communauté ». Quant à elle, l'acceptation est l'« action d'approuver quelque chose ; autrement dit, manifestation de volonté par laquelle une personne donne son accord à quelque chose. » C'est le « résultat de cette action ». Pour les véhicules autonomes, l'acceptabilité est donc le caractère de savoir s'ils sont potentiellement acceptables ou non, tandis que l'acceptation est le fait de l'accepter en pratique et de se procurer un véhicule autonome par exemple.

Plusieurs experts s'accordent pour dire que le critère-clé pour améliorer ces deux notions, vis-à-vis du véhicule autonome, est la confiance envers la machine [2,17,18]. Or cela n'est pas gagné puisque, dépendamment des individus, certaines personnes peuvent craindre de mettre leur vie « entre les mains » d'une machine. Ce constat est le plus fort chez les occupants seuls et les cyclistes [19]. D'autres personnes sont réticentes à partager leurs données personnelles, ou alors ont peur des cyberattaques [5,17]. Les plus forts soutiens aux véhicules autonomes peuvent notamment être trouvés parmi les fervents de technologies, les défenseurs de l'environnement et les personnes à mobilité réduite. Les revendications des autres usagers de la route (piétons, cyclistes, véhicules non autonomes) doivent également être prises en compte [5].

Voici un tableau résumant les principaux facteurs affectant l'acceptation et l'acceptabilité des individus.

Tableau 1 : Différents facteurs d'acceptation et acceptabilité

Facteurs d'acceptation		Facteurs d'acceptabilité	
Positifs	Négatifs	Positifs	Négatifs
• Réutilisation temps trajet [4][20] • Nouvelle accessibilité [15][21][22][23][24] • Plus forte exposition aux technologies [22][25]	• Coûts (acquisition, maintenance) [18][21][22][23][24][26] • Perte du plaisir de conduire [2] • Perte de contrôle, sécurité [15]	• Plus forte exposition aux technologies [22][25] • Hausse de la sécurité [6][27][28][29] • Grandes attentes [23] • Régulations claires [23][29][30]	• Changements de métiers, tensions sociales (conflit actuel taxis/Uber) [5][6] • Danger usagers vulnérables [31][32][33] • Difficultés pour les conducteurs classiques [34]

Une étude [23] montre que la plupart des répondants ont à priori une opinion positive et de grandes attentes au sujet des véhicules autonomes. Cependant, chez la plupart des individus, beaucoup d'éléments viennent perturber cette excitation initiale. Les facteurs d'acceptation et d'acceptabilité sont multiples et plusieurs études ont été réalisées sur le sujet.

Un des principaux facteurs d'acceptation est la notion de volonté de payer, qui est directement reliée aux prix des technologies [19,21,22,23,24]. La volonté de payer pour la technologie impacte directement le nombre d'achats de véhicules, donc la pénétration de ces derniers au sein du parc automobile total. Si la volonté de payer n'augmente pas chez la plupart des gens, il est improbable que les véhicules autonomes soient aussi répandus que les véhicules classiques aux États-Unis, en 2045. Une autre étude [35] a estimé le prix qu'un ménage moyen est prêt à payer pour l'automatisation. Un ménage serait prêt à payer en moyenne 3500\$ pour une automatisation partielle et 4900\$ pour une automatisation totale. Cependant, la même étude montre qu'il y a une forte hétérogénéité entre les ménages.

Un autre facteur qui influence l'acceptabilité est la perte du plaisir de conduite manuelle qui peut déranger les usagers [2]. Le genre a également une influence non négligeable, aussi bien pour la notion de prix que pour celle de sécurité perçue. Ainsi, les femmes sont moins enclines à investir de l'argent dans les véhicules autonomes que les hommes [23,25]. De même, des études [34,36] trouvent que les hommes et la jeune population ont un degré d'acceptation supérieur, tout comme les citadins et les personnes avec un "degré d'innovation" élevé [36].

Certaines études [25] considèrent que cette acceptation inférieure provient de réactions affectives plus marquées à l'anxiété. Afin d'encourager l'acceptation de véhicules autonomes, il est recommandé de

promouvoir des campagnes pour mettre en valeur les bienfaits sécuritaires de ces nouvelles technologies, ainsi que mettre en place des essais publics de véhicules autonomes [25]. En effet, les personnes qui ont déjà été en contact avec des véhicules autonomes sont plus rassurées : elles voient leurs acceptation et acceptabilité augmenter [22,25,37].

Il est à noter, néanmoins, que seule la perception de la protection des données n'est vraisemblablement pas influencée par l'exposition aux technologies [37]. Les campagnes de valorisation de la sécurité sont censées avoir plus d'effets sur les évolutions d'opinions des jeunes que sur celles des personnes âgées [25].

Les régulations mises en place sont également importantes [30]. Le rôle joué par une personne dans la situation donnée est important : par exemple, une étude [34] explique qu'un véhicule autonome est perçu comme plus dangereux par une personne passagère, que piétonne. Surtout, l'acceptabilité publique sera critique pour les cas de sécurité et d'accidents reliés à des véhicules autonomes [23,29].

Le modèle utilisé par certaines études [2] met en valeur trois grands axes : l'attente de performance, l'attente de réduction d'effort et l'influence sociale. L'attente de performance y est prédominante, l'influence sociale arrive en second. Autrement dit, c'est avant tout une machine efficace, fiable et sécuritaire qui est recherchée. Et une barrière psychologique réelle existe à cet effet, comme dans la plupart des innovations brutales d'ailleurs [17]. Même si les individus savent que la sécurité augmente par rapport à un véhicule classique, le pourcentage intéressé par l'achat d'un véhicule reste faible [38]. L'éthique et la sûreté sont également en première ligne [2,5,6,17].

Ces notions d'acceptation et d'acceptabilité sont donc difficiles à appréhender puisqu'elles dépendent d'un grand nombre de facteurs, très différents les uns des autres. Le déploiement des véhicules autonomes ne sera pas possible tant que ces problématiques n'auront pas été réglées. Ces facteurs doivent donc être adressés convenablement afin de favoriser l'acceptation et l'acceptabilité du transport autonome [15].

4.1.1 SÉCURITÉ ROUTIÈRE

La sécurité est un élément critique pour l'introduction des véhicules autonomes, notamment pour l'acceptation et l'acceptabilité auprès des individus, comme vu précédemment. La sécurité et le confort des humains doivent en tout temps être assurés, quelle que soit l'efficacité opérationnelle visée. Il est à noter que le nombre de morts sur les routes a déjà diminué ces dernières années dans les pays développés grâce aux améliorations technologiques des véhicules et aux mesures des organes d'administration. Cependant, le constat est contraire dans les pays en développement comme l'Inde. Dans l'ensemble cependant, le nombre de morts sur les routes est toujours non négligeable [5]. Voici un tableau résumant les enjeux, risques et solutions principaux liés à la sécurité routière.

Tableau 2 : Enjeux, risques et solutions reliés à la sécurité routière

Enjeux	Risques	Solutions
• Minimiser les accidents Environ 90% des accidents de la route proviennent d'erreurs humaines. Les véhicules autonomes sont censés grandement réduire cela. [6][27][28][29] Même si tout le monde n'est pas n'en est pas non plus convaincu. [39] • Interactions avec les usagers vulnérables Les piétons, motocyclistes et surtout cyclistes sont plus difficiles à appréhender pour les véhicules autonomes [32] • Prise en compte de la météo Ce qui nous paraît évident comme la détection de verglas ne l'est pas pour un véhicule autonome	• Excès de confiance en la machine Les conducteurs pourraient ne plus mettre leur ceinture, les piétons pourraient traverser n'importe où sans regarder. [5] • Tous les accidents ne sont pas évitables Environnement réel complexe, hardware (capteurs) et software (algorithmes) ne suffisent pas.	• Fort taux de pénétration des véhicules SAE-5 • Gestion coopérative des informations [2][5] Communications V2V et V2I, voire V2B avec les bicyclettes [33]

Les statistiques montrent qu'environ 90% des accidents de la route proviennent d'erreurs humaines : l'autonomie peut ainsi devenir un remède pour les réduire au minimum [5,6,27,28,29]. Cependant, il est important de souligner que même un environnement de véhicules coopératifs autonomes ne sera pas capable d'éviter tous les accidents [39]. Cela s'explique par les incertitudes des dynamiques réelles comprenant notamment les comportements des véhicules autonomes, des véhicules contrôlés par des humains, des bicyclettes et des piétons [29,40]. Un exemple marquant de l'actualité a eu lieu avec la mort d'Élaine Herzberg, percutée par un véhicule autonome d'Uber, le 18 mars 2018 en Arizona [41]. Le véhicule a détecté la piétonne, mais n'a ni freiné, ni averti le conducteur qui n'a pas eu le temps d'intervenir. À la suite de cela, les tests de véhicules autonomes ont été suspendus dans l'Arizona. Dès lors, on peut voir que les notions de sécurité et de fiabilité sont bien plus complexes que la seule gestion du matériel (comme les capteurs) et du logiciel de base (comme les algorithmes de contrôle). La paramétrisation du véhicule autonome doit prendre en compte tout l'environnement réel global, et doit pouvoir s'adapter à n'importe quelle situation, même si la machine n'a jamais expérimenté l'environnement en question auparavant [18]. De plus, la prise en compte des conditions météorologiques doit être assurée, et cela n'est pas forcément simple technologiquement. Ce qui nous paraît évident à l'œil nu, comme la détection de verglas sur la chaussée par exemple, ne l'est pas pour un véhicule autonome.

Pour assurer la sécurité routière, des études considèrent que deux conditions principales doivent être vérifiées [5,42] : tout d'abord, le taux de pénétration des véhicules totalement autonomes (SAE-5) doit être

élevé. En effet, les résultats suivants d'études ont estimé que [42]: les conflits sécuritaires seront réduits de 12 à 47% pour un taux de pénétration de 25%, de 50 à 80% pour un taux de 50%, de 82 à 92% pour un taux de 75%, et de 90 à 94% pour une pénétration de 100%. Ensuite, la gestion de circulation doit être coopérative [2,5]. Cela sera rendu possible avec du partage de données grâce aux communications V2V, V2I incluant le V2R (Vehicle to Road), voire V2B (Vehicle to Bicycle), une notion proposée par [33]. L'acronyme V2X résume tous ces concepts technologiques de communication, pour Vehicle to Everything [43]. L'idée du V2B vient de la problématique sécuritaire de la relation directe des véhicules autonomes avec les autres usagers de la route. Ceux-ci peuvent être les véhicules traditionnels, mais aussi les « usagers vulnérables » : les piétons, les cyclistes ou les motocyclistes. Ces relations sont primordiales, notamment pour la sécurité de chacun et la fluidité des mouvements. Une étude [31] analyse cette thématique en utilisant la théorie des jeux pour analyser l'interaction piétons/véhicules autonomes, en particulier au niveau des passages piétons. Sa conclusion est que, puisque les véhicules autonomes seront sûrement paramétrés pour bannir tout risque sécuritaire, les piétons pourront se comporter de manière très libre et orienter les centres urbains vers un caractère piéton marqué. Cependant, les véhicules autonomes risquent d'être pénalisés sur la rapidité de leur trafic s'ils sont trop permissifs avec les piétons. Ensuite, la détection des bicyclettes est ce qui pose le plus de problèmes aux concepteurs technologiques des véhicules autonomes [32]. Ils sont en effet petits, rapides et hétérogènes. Un test effectué en 2017 ne détectait que 74% des bicyclettes, ce qui est moins précis que pour les piétons ou même les écureuils. Les trajectoires des bicyclettes sont bien moins prédictibles que celles des automobiles, car plus soudaines. De même, l'appréhension des pistes cyclables, aux intersections par exemple, est délicate. C'est pourquoi des études [33] proposent la solution d'une communication V2B. Le problème inhérent est que les bicyclettes seraient obligées de s'équiper technologiquement en conséquence, alors qu'on cherche à ce que les véhicules autonomes puissent fonctionner indépendamment des autres usagers [33].

Les nouvelles accessibilités, la réutilisation possible du temps de trajet et la possibilité pour les véhicules de se déplacer seuls pourraient entraîner une hausse du kilométrage [3,4,20]. Il faut donc faire attention à ce que l'augmentation du nombre de véhicules-kilomètres n'augmente pas le nombre d'accidents. De plus, il pourrait y avoir de nouveaux genres de risques sécuritaires créés par une confiance démesurée placée en les véhicules autonomes, tels que : des passagers qui, trop confiants en la machine, ne mettraient plus leur ceinture de sécurité, ou encore des piétons qui traverseraient de manière inadéquate aux passages piétons en supposant que les véhicules autonomes vont s'arrêter pour eux [5]. Une étude [44] montre, également, que sur 48 participants, les conducteurs répondent moins bien et plus lentement aux situations d'urgence dans des véhicules partiellement autonomes que dans des véhicules complètement manuels. Cela est valable pour les temps de réaction, ainsi que pour les durées et temps utilisés pour les changements de lignes. Il faut donc réévaluer les variables utilisées pour définir la performance d'un conducteur de véhicules qui seraient partiellement autonomes : ce ne sont pas nécessairement les mêmes que pour les conducteurs classiques [44].

La perception de la sécurité amenée par les véhicules autonomes est également centrale pour l'acceptation et l'acceptabilité : même si les véhicules autonomes sont parfaitement paramétrés, l'humain n'est pas nécessairement prêt à leur laisser tout le contrôle. Dans une étude réalisée [15], 70% des participants qui ont eu une interaction avec les véhicules autonomes n'ont pas distingué de différence significative avec un conducteur humain, mais les 30% restants ont constaté des différences susceptibles de les effrayer. Surtout,

seulement 6% des répondants perçoivent les véhicules autonomes comme plus sûrs que les conducteurs humains [15].

4.1.1 SÉCURITÉ DES DONNÉES

Les véhicules hautement technologiques et les nouvelles infrastructures de communication vont inévitablement générer un grand nombre de données. La sécurité des données devient ainsi un enjeu social central du déploiement des véhicules autonomes. Ci-après se trouve un tableau résumant les enjeux, risques et solutions liés à la sécurité des données.

Tableau 3 : Enjeux, risques et solutions reliés à la sécurité des données

Enjeux	Risques	Solutions
• Gérer le stockage des données Véhicules hautement technologiques : il y aura forcément un grand nombre de données sur les comportements des personnes. • Contrôler le partage des données Le partage est important pour la sécurité et le bon fonctionnement des véhicules. Mais il doit être contrôlé : il faut déterminer qui aura accès à quelles informations et comment.	• Atteinte à la confidentialité La vie privée peut vite être exposée et mise à mal. [17][45][46] • Hacking et terrorisme Des virus pourraient être injectés, ou les véhicules pourraient être utilisés pour foncer dans les foules. [6]. Mais même si la possibilité de se faire pirater subsiste, le contrôle devrait pouvoir être repris rapidement. [5]	• Organes de contrôle de sécurité des données [47]

Deux enjeux principaux apparaissent. Il faut savoir gérer le stockage de toutes les données, et surtout contrôler leur partage. En effet, un grand nombre d'informations sera disponible sur les comportements des véhicules et des personnes. Ces renseignements peuvent être sensibles, tels que les lieux de domicile et de travail, les habitudes de déplacement, le numéro de téléphone, le genre, etc. [48]. Le partage des données est certes important pour la sécurité et le bon fonctionnement des véhicules. Mais toutes ces informations sensibles doivent être maîtrisées : il faut déterminer qui aura accès à quelles informations, et de quelle manière. Il faut par exemple déterminer si elles peuvent être accessibles aux entreprises pour de la publicité, aux particuliers pour le partage, etc. Cette régulation est capitale, car toute fuite ou maladresse peut avoir des conséquences dramatiques : les véhicules seront des cibles pour les cyberpirates et les terroristes. Des virus pourraient être injectés dans les réseaux [17,45,46]. Cela peut conduire à des

problèmes de sécurité, ou à une vie privée exposée et mise à mal. Les véhicules autonomes vides pourraient aussi être utilisés par des terroristes pour foncer dans des lieux publics [6]. Les gouvernements analysent donc ces problématiques et cherchent à mettre en place des systèmes résilients à ce type d'attaques [47]. Même si la probabilité de se faire pirater subsiste, il devrait être possible de récupérer le contrôle rapidement [5]. Enfin, la bonne gestion des données est également indispensable pour le fonctionnement technologique optimal du véhicule, et pour satisfaire la sécurité. Dès lors, la sécurité des équipements électroniques du véhicule est en tête des problématiques technologiques à résoudre [2]. Une solution envisageable pourrait être de mettre en place des organes de contrôle de la sécurité de ces données [47].

4.1.2 ÉTHIQUE

Le principal sujet de controverse vis-à-vis de l'éthique concerne le processus de prise de décision du véhicule autonome [5]. En cas de danger, la réponse du véhicule ne découle plus de réponses morales et instinctives d'individus, qui sont acceptées, car elles proviennent d'une conscience, mais elle doit être basée sur des réponses algorithmiques programmées au préalable. Cela pose de grandes questions éthiques, voire philosophiques [27,49]. Les enjeux et contraintes correspondantes sont importants. Ils sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Enjeux et contraintes éthiques

Enjeux	Contraintes
• Comment paramétrer les véhicules ? [43][79] Les réactions humaines sont acceptées car instinctives. Mais dans le cadre de véhicules autonomes, elles doivent être paramétrées à l'avance. • Qui en a la légitimité ? [43][79] Les gouvernements, les fabricants ? Que faire lorsque les pays sont distincts ? • Le conducteur peut-il reparamétrer ? [43][79]	• Un individu est lui-même contradictoire Les individus préfèrent protéger le plus grand bien [7], à part s'ils sont eux-mêmes dans le véhicule. Dans ce cas, ils préfèrent se protéger eux-mêmes aux dépens des autres. [9] • Différences culturelles marquées Selon les pays, les réponses aux mêmes dilemmes moraux peuvent être très différentes. Au Japon, la majorité des personnes préfèrent sauver une personne âgée à un bébé. Au Canada, c'est l'inverse. [5][67] • Étape très limitante pour la légalisation Aucun véhicule autonome SAE-5 ne pourra être commercialisé avant que ces problématiques ne soient explicitées dans les lois. <i>Et cela peut prendre beaucoup de temps.</i>

Tout d'abord, qui a la légitimité de paramétrer le véhicule? Il faut déterminer si ce sont les gouvernements, les fabricants, ou autres. Que faire lorsque les pays sont distincts, avec des lois différentes ? Le conducteur

peut-il modifier les réglages à sa guise ? [29,47] Dans l'ensemble, les chercheurs s'accordent à dire que les comportements de programmes des véhicules autonomes doivent reproduire ceux des humains. Certains postulats peuvent paraître universels : par exemple, la protection de la vie est la priorité principale [47]. Entre un blessé et un mort, on choisira le blessé. Mais que faire dans des cas plus ambigus : choisir entre protéger la vie du piéton ou du conducteur par exemple? Il subsiste de nombreux dilemmes moraux pour lesquels programmer l'action adéquate est très délicat [5]. Les dilemmes moraux correspondent à des situations où l'on est forcé de choisir entre deux conséquences défavorables, en essayant d'opter pour la moins néfaste [27]. Un des dilemmes principaux est de savoir si un véhicule autonome doit protéger ses passagers par-dessus tout, ou sacrifier ses passagers pour un plus grand bien [29].

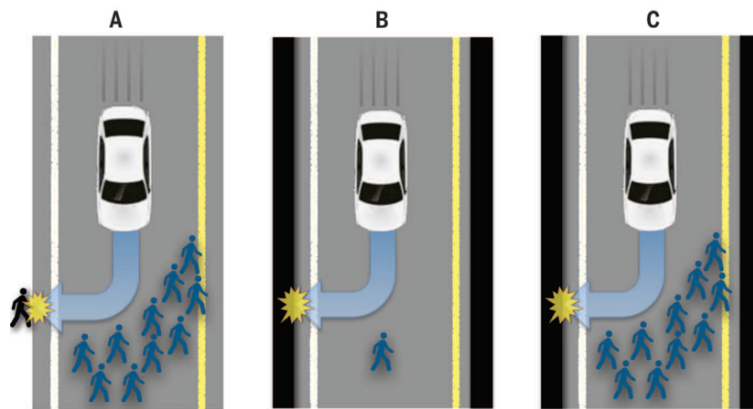


Figure 4 : Exemple de dilemmes moraux [27]

Le premier dilemme moral a été décrit dans la littérature par Philippa Foot en 1967, sous le nom de « trolley dilemme » [51]. Plusieurs variantes existent, mais l'idée principale est de déterminer qui le tramway doit sauver dans quelle situation. Les études montrent que les individus ont tendance à préférer des véhicules prenant les choix qui protègent le plus grand bien, sans pour autant déclarer vouloir posséder de tels véhicules [29]. Cependant, s'ils sont eux-mêmes dans le véhicule, les individus semblent prioriser la protection de leur propre vie de conducteur aux dépens des autres [6]. On voit donc que même si l'on veut copier les réponses des humains, ceux-ci se contredisent eux-mêmes selon les situations. De plus, des différences culturelles marquées existent [50]. Selon les pays, les réponses aux mêmes dilemmes moraux peuvent être très différentes. Au Japon, la majorité des personnes préfère sauver une personne âgée à un bébé. Dans les pays occidentaux, c'est l'inverse [50,52]. Même des pays aux cultures similaires comme l'Australie et la Nouvelle-Zélande ont des comportements de réponses différents [53]. Cela devient encore plus complexe quand on remarque que, même si l'on arrive à déterminer l'action la plus "moralement acceptable" en moyenne, par exemple foncer dans une personne plutôt que dix, il peut survenir des cas particuliers où cette action soit la pire (par exemple, on tue la personne alors qu'on aurait blessé quatre personnes en fonçant dans les dix). Des études [29] proposent la solution suivante lorsque c'est possible : privilégier les règles par défaut, car cela demande moins d'informations et procure un plus haut degré de contrôle. Par exemple, rester sur sa ligne si un piéton arrive plutôt que de faire un virage sec qui donne des résultats beaucoup plus aléatoires, car imprévisibles. La règle par défaut étant de rester sur sa ligne, le

piéton sait lui aussi comment réagir même si évidemment, cela peut lui être fatal dans certains cas. En tout cas, les multiples sources d'incertitude et la difficulté d'avoir des réponses unanimes illustrent la complexité d'établir des standards de comportements pour un véhicule autonome dans son environnement réel [28]. Cette étape est pourtant primordiale, pour que les manufacturiers et gouvernements puissent définir les cadres légaux des véhicules autonomes, tout en respectant les droits fondamentaux des citoyens [2]. Pour adresser ce problème, des experts arrivent aux trois conclusions suivantes [40]: les véhicules autonomes vont quasiment certainement provoquer des accidents, les décisions qu'ils auront à prendre avant ces accidents auront une portée morale, et il n'y a pas de manière évidente pour coder les valeurs morales complexes des humains au sein d'algorithmes. Une méthodologie en trois parties est ensuite proposée pour implémenter des algorithmes éthiques : 1) la première phase est rationnelle : on y exprime les principes universellement reconnus (par exemple, on préfère des blessés à des morts). 2) la seconde phase est de l'apprentissage machine à partir d'un échantillon de tests sur des humains confrontés à de telles situations réelles ou simulées. 3) la troisième phase concerne la gestion du « langage naturel » de la machine, qui est à priori très difficilement appréhendable par un humain.

En conclusion, on peut constater que la gestion de l'enjeu éthique est extrêmement complexe, car subjective. Pourtant, aucun véhicule autonome SAE-5 ne pourra être commercialisé avant que les problématiques liées à l'éthique ne soient pas explicitées dans les lois. Or cela peut prendre beaucoup de temps.

4.2 LES ENJEUX DE TRANSITION

4.2.1 INFRASTRUCTURES À METTRE EN PLACE

Il est raisonnable de penser qu'à court terme, c'est le véhicule autonome qui devra s'adapter aux infrastructures existantes. Cependant, la route et les équipements installés devront inévitablement commencer à s'adapter avec une numérisation graduelle, pour ne pas devenir un frein aux évolutions sur les moyens et longs termes [1]. Un résumé des réflexions sur le développement des infrastructures est présenté dans le tableau ci-dessous, avant d'être détaillé dans la suite.

Tableau 5 : Enjeux et opportunités en rapport avec les infrastructures

Enjeux	Opportunités
• Gestion des infrastructures de communication Pour les communications V2V et V2I • Travail en collaboration avec les administrations étrangères pour la continuité des systèmes de communications [5] • Gestion des infrastructures routières Lignes prioritaires et réservées, pour ne pas gêner la circulation des véhicules classiques. [54][55][56] • Mise à jour des équipements routiers Feux de signalisation, panneaux, etc... pour faciliter la circulation mixte et la cohabitation [1] • Mise en place de l'électrification Bornes de rechargement adaptées, en bonne quantité et aux bons endroits pour fluidifier le trafic [57]	• Amélioration des réseaux de télécommunications Deux tendances principales suivies dans le monde : le sans-fil standard 802.11p et les réseaux mobiles, notamment le 5G [5] • Fluidification de la circulation • Transition écologique

Un premier enjeu de transition est la gestion des infrastructures technologiques de communication. Les technologies V2V et V2I doivent être en place pour que le déploiement des véhicules autonomes ait lieu. Un travail local de collaboration au niveau des autorités municipales, ainsi que plus largement entre les administrations de différentes provinces, à l'échelle canadienne, et de différents pays, à l'échelle mondiale, sont nécessaires à ce sujet [5]. Un second enjeu est ce qui concerne plus précisément les infrastructures routières. Des voies de circulation prioritaires et réservées aux véhicules autonomes sont souvent envisagées, pour ne pas gêner la circulation des véhicules classiques [54,55,56]. Cela réduirait cependant le nombre de voies accessibles aux véhicules classiques. Une étude [58] propose donc des « voies de circulation dynamiques ». Les voies s'adapteraient en tout temps et à chaque endroit, en fonction du trafic et de la part relative des véhicules autonomes par rapport aux classiques. Ces voies auraient en continu le choix entre être ouvertes à tout le monde, ou être réservées aux véhicules autonomes. Les infrastructures devront alors s'adapter pour communiquer efficacement les informations en temps réel aux conducteurs humains d'une part, et aux algorithmes des véhicules autonomes d'autre part.

Un sujet relié aux voies réservées est la limitation de vitesse. Une étude [59] a analysé l'impact des limitations de vitesse sur l'autoroute. Il y est supposé que les véhicules autonomes seront limités à une faible vitesse par sécurité. Or, une différence trop importante de limitations de vitesse entre les différentes lignes pourrait entraîner une augmentation nécessaire des changements de ligne des véhicules traditionnels, ce qui n'est pas forcément agréable pour un conducteur. Des algorithmes de régulation de

vitesse en trafic mixte sont donc proposés pour chercher à réduire les différences de limitations de vitesse entre les voies. Cela pourrait être possible en répartissant les véhicules autonomes sur chaque voie, pour forcer les véhicules traditionnels à s'adapter [59]. Une autre étude [56] considère que la performance de voies dédiées aux véhicules connectés autonomes peut être améliorée en augmentant sa limite de vitesse par rapport aux voies traditionnelles. Le taux de pénétration ainsi que le niveau de performance des véhicules sont des facteurs significatifs du succès des lignes dédiées ou non. L'efficacité est maximale pour un taux de pénétration moyen et un haut niveau de performance. Les taux de pénétration faibles et élevés sont moins adaptés [56]. Une étude montre également que les lignes dédiées n'assureront pas nécessairement d'augmenter la capacité des autoroutes [60]: il faut d'abord optimiser les distances de séparation entre véhicules autonomes avant de tirer des conclusions.

L'influence des véhicules autonomes sur la fluidité du trafic varie également selon si les véhicules autonomes sont connectés ou non connectés [55]. Les véhicules connectés et autonomes peuvent améliorer la stabilité des voies, et l'autonomie est plus efficace que la connectivité pour éviter les embouteillages. Concernant les rendements des routes, donc l'optimisation de leur capacité, ils augmentent avec le taux de pénétration des véhicules connectés autonomes. Les améliorations sont même très significatives pour certains taux de pénétration. Là encore, à taux de pénétration égal, l'autonomie est plus influente que la connectivité.

À part les infrastructures de connectivité, un autre volet des infrastructures routières à mettre à jour concerne les équipements routiers, tels que les feux tricolores, les feux de signalisation, les panneaux, etc. Ils doivent pouvoir être adaptés à l'interaction avec les véhicules autonomes, voire reconnus par ces derniers à l'aide des technologies V2V et V2I. Cela permet de faciliter la circulation mixte et la cohabitation [1].

Enfin, le cas particulier des véhicules électriques déboucherait lui aussi sur de nouvelles infrastructures à installer. Cela comporte notamment la mise en place de bornes de recharge adaptées, aux bons endroits pour faciliter le trafic [57]. Plus de détails seront donnés à ce sujet dans une section ultérieure.

Des mises à niveau d'infrastructures sont donc nécessaires engendrant des coûts. Cependant, ces mises à jour peuvent aussi constituer des opportunités. Cela peut par exemple permettre de faire évoluer les réseaux de télécommunications utilisés. Deux tendances principales se dégagent dans le monde : le sans-fil standard 802.11p ou les réseaux mobiles, notamment le 5G [5,43]. Le renouvellement d'infrastructures peut aussi permettre de fluidifier le trafic si les infrastructures sont optimisées pour l'évolution de la mobilité. Enfin, cela peut servir de levier à une transition écologique en réduisant la congestion et la pollution.

4.2.2 COHABITATION ET IMPACT SUR LE TRAFIC

Si l'on considère que l'avènement des véhicules autonomes est inévitable, il faut réussir à gérer leur cohabitation avec les autres usagers de la route lors de la phase de transition.

Tableau 6 : Enjeux, risques et solutions pour la cohabitation

Enjeux	Risques	Solutions
• Comment intégrer les véhicules sur les routes Quels types de véhicules sur quels types de routes, à quelle vitesse augmenter le taux de pénétration • Gérer la sécurité de la cohabitation avec les véhicules classiques	• Sécurité La sécurité des conducteurs pourrait empirer au début [39] • Incompréhension des conducteurs pouvant augmenter la congestion Exemple des véhicules autonomes quittant un <i>platoon</i> sur l'autoroute, comportement difficile à prévoir • Mélange des différents niveaux d'automatisation difficile à contrôler	• Stratégies de circulation adaptées au trafic mixte • Adaptations de ces stratégies avec l'augmentation progressive du taux des véhicules autonomes • Intégration graduelle et contrôlée prônée Préférable à un changement brutal de flotte [5][18]

Il est donc nécessaire de déterminer comment intégrer les véhicules autonomes, sur quels types de routes, et idéalement gérer à quelle vitesse devra augmenter leur taux de pénétration. La cohabitation avec les véhicules non autonomes et les autres usagers de la route (deux roues, camions de marchandises, piétons, etc.) doit être la plus optimale possible, aussi bien au niveau de la sécurité que de la fluidité du trafic. Ainsi, les stratégies de circulations doivent être pensées pour gérer un environnement de trafic mixte, et ensuite s'adapter avec l'augmentation progressive du pourcentage de véhicules autonomes sur les routes [5]. Il faut être très prudent avec la sécurité : des études considèrent notamment que la sécurité des véhicules conventionnels pourrait empirer durant la période de cohabitation [39]. En fait, même si les véhicules autonomes étaient immédiatement disponibles à la vente, leur pénétration serait sans doute graduelle. Le prix élevé initial impliquerait une première adhésion de la part de foyers aux revenus élevés et de la part d'adeptes de nouvelles technologies. Ensuite, le marché s'étendrait petit à petit aux autres classes sociodémographiques [26]. Cette pénétration graduelle pourrait même être souhaitable. En effet, des études suggèrent qu'il serait intéressant de mettre en circulation les véhicules complètement autonomes (SAE-5), même si l'on sait qu'ils ne sont pas encore parfaits, pour pouvoir les tester puis les améliorer a posteriori. Un déploiement précoce de ces derniers permettrait de sauver beaucoup de vies [15,61]. Une première étape d'implantation utilisable peut être le *platooning* sur les autoroutes [5] et/ou dans les villes.

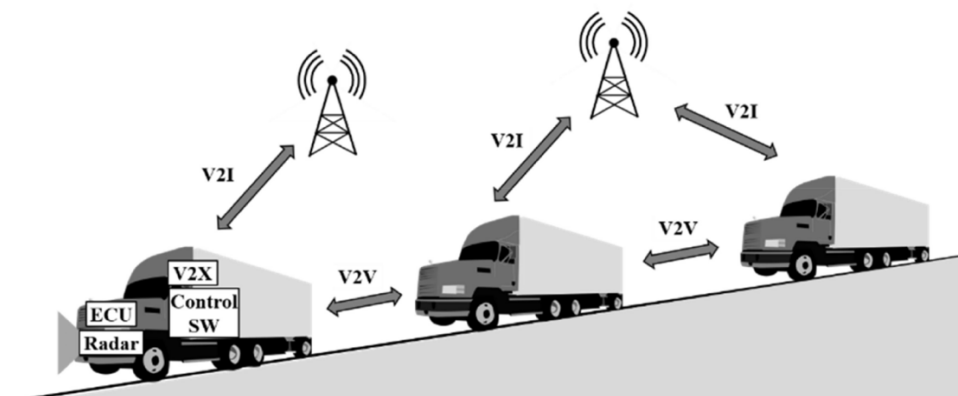


Figure 5 : Concept de platooning [62]

Le *platooning* consiste à faire rouler plusieurs véhicules autonomes en peloton, à grande vitesse, avec de très faibles distances de séparation entre eux [62]. Ces distances peuvent être grandement réduites par rapport aux distances de sécurité nécessaires pour satisfaire au temps de réaction des humains. Le *platooning* permettrait ainsi d'augmenter la capacité des autoroutes, de diminuer les temps de trajet, de réduire les consommations d'essence et les émissions de gaz à effet de serre. Des études de cas montrent que cela changerait aussi les comportements de mobilité [63] : les personnes et véhicules seraient plus attirés par les grands axes d'autoroute, quitte à augmenter la distance parcourue, pour réduire les temps de trajet. Ces derniers sont supposés diminuer jusqu'à 20% pour un taux de pénétration des véhicules autonomes de 90% [63]. Comme illustré ci-dessus, le système de *platooning* opérerait grâce aux technologies de communication V2V et V2I. Enfin, il est à noter que le *platooning* peut aussi bien être appliqué sur les autoroutes (ex. : cortèges de marchandises), que dans les villes (ex. : redistribution en *platooning* de véhicules partagés).

Certaines études proposent un modèle en trois étapes pour l'introduction, la transition et la régulation des véhicules autonomes au sein de la circulation [18]. La première étape est la phase de test initial. C'est une phase exploratoire, elle cherche les points à approfondir dans les phases suivantes, ainsi que les sources potentielles de problèmes. L'idée est ici d'utiliser une démarche empirique pour tenter d'appréhender les événements qui n'étaient pas prévisibles à priori (routes fermées, contraintes météorologiques, etc..). La seconde étape est le test transitionnel où on commence à déployer le véhicule dans les conditions réelles. On commence avec des scénarii idéaux avant de les complexifier petit à petit. Un problème éthique se pose ici : on implique nécessairement les autres conducteurs de la route, alors qu'ils n'auront pas donné leur accord pour cette "expérience". Enfin vient le test décisif où l'on rassemble les résultats et données obtenus sur le comportement du véhicule dans l'ensemble de l'environnement. On peut alors en informer les différents acteurs et en déduire des mesures d'amélioration adaptées [18]. Le processus de formation de ces pelotons (*platoons*) doit aussi être précisément défini, car il peut présenter des problématiques, notamment sécuritaires. En effet, les conducteurs de véhicules traditionnels pourraient être gênés, par rapport à la visibilité ou l'appréciation des trajectoires des véhicules de pelotons, si les fonctionnements ne sont pas clairement établis. Pour cela, on propose que les véhicules des pelotons échangent leurs informations en temps réel, et se forment successivement en plusieurs itérations [64]. Un autre enjeu à

considérer est le mélange de types de véhicules et de niveaux d'automatisation. La cohabitation ne sera pas dichotomique entre véhicules traditionnels et véhicules complètement autonomes : elle sera beaucoup plus complexe avec des véhicules variés et différemment développés. Des camionnettes SAE-3 pourraient aussi bien rencontrer des véhicules privés SAE-2 que des camions SAE-4 par exemple. Dans l'ensemble, les différents acteurs de l'automatisation s'accordent pour dire que l'intégration des véhicules autonomes dans la flotte devrait être graduelle et contrôlée. Cette méthode est considérée comme préférable par rapport à un changement brutal de flotte [5,18].

4.2.3 LÉGALISATION

Les principaux enjeux, risques, solutions et opportunités en lien avec la notion de légalisation du transport autonome sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Enjeux, risques, solutions et opportunités relevant de la légalisation

Enjeux	Risques	Solutions/ Opportunités
• Condition sine qua non pour l'apparition de véhicules autonomes Les aspects légaux vont bien plus retarder l'implémentation que les aspects technologiques. [5] • Tout est à faire Les SAE-3 et SAE-4 sont légalisés dans certains pays, mais rien n'est prêt pour les SAE-5. [2] • Question de responsabilité - Selon le type de véhicule (voitures, vans, camions, ...) - Selon le degré d'automatisation pour définir à quel point le conducteur est responsable en cas d'accident - Pour les SAE-5, le fabricant doit-il être le seul responsable ? Puisque le conducteur n'est pas censé intervenir • Règlementation des assurances [5] • Différents permis de conduire pour chaque niveau d'autonomie	• Retardement du déploiement des SAE-5 Si trop de responsabilité légale pour les fabricants [5] [18][65] • Incompatibilités des lois entre les provinces • Vices de procédure possibles si le cadre légal n'est pas assez précis	• Mesures incitatives/coercitives pour le partage et les réductions d'émissions • Taxes • Mise en place d'une entité régulatoire indépendante pour encadrer Elle doit être digne de confiance et réfléchie [18]

Si tant est que les véhicules autonomes soient prêts à pénétrer le marché, rien ne sera possible avant la définition de cadres légaux précis. La légalisation est une condition sine qua non pour l'apparition de ces véhicules sur les routes. Ces aspects sont d'ailleurs censés retarder bien plus l'introduction des véhicules autonomes que les aspects technologiques [5]. En effet, les aspects légaux et de responsabilité sont souvent

considérés comme les plus grandes barrières à l'implantation des véhicules autonomes. Ils sont même plus critiques que l'acceptation sociale, selon l'étude d'Underwood sur 217 experts, menée en 2014 [15,66].

D'un point de vue légal, les véhicules de niveau SAE-3 et SAE-4 sont intéressants pour poser les bases de légalisation, car ils comprennent toujours une intervention du conducteur. Ces types de véhicules sont légalisés dans certains pays, mais pas encore les véhicules complètement autonomes (SAE-5) [2]. Des enjeux éthiques rentrent également en compte, comme présenté dans une section précédente. Deux grandes problématiques restent en particulier à résoudre : A) Comment un véhicule autonome doit-il réagir en cas d'accident inévitable lorsqu'il doit choisir quel usager de la route blesser ? B) Les conducteurs pourront-ils définir leurs propres préférences éthiques ? Ou, il y aura-t-il le même paramétrage pour tous [2] ?

Le sujet légal le plus controversé est vraisemblablement la question de responsabilité en cas d'accident [5]. Différents niveaux d'automatisation vont cohabiter, ce qui devrait impliquer différents niveaux de régulation. En prenant l'exemple du concept de *platooning* sur les autoroutes, il sera nécessaire notamment de définir le type de véhicules concernés (voitures, vans, camions ...), leur degré d'automatisation (pour savoir à quel point le conducteur peut être considéré comme responsable), l'écart moyen entre les véhicules, la vitesse moyenne, le nombre maximal de voitures par peloton, et comment et quand les véhicules doivent joindre et quitter les pelotons [5]. Cela s'imbrique avec les relations envers les véhicules traditionnels, en considérant les lignes et routes partagées et dédiées notamment [5]. Une voiture d'un peloton qui veut sortir d'une autoroute doit pouvoir le faire sans mettre en danger les autres véhicules. De même, un véhicule traditionnel ne doit pas être gêné par un peloton de huit véhicules autonomes qui l'empêcheraient de sortir à temps.

La légalisation doit également être effectuée sur la régulation des licences de conducteurs : un véhicule SAE-2 ne requiert pas les mêmes aptitudes de conduite qu'un SAE-3. Est-ce qu'un véhicule SAE-5 n'aura aucun requis de permis de conducteur ? Les lois ne seront pas forcément les mêmes pour chaque pays. Dès lors, comment faire si un véhicule autonome traverse une frontière ? Les lois suivies doivent-elles être celles du fabricant ou de l'acheteur ? On peut penser que le fabricant d'un véhicule SAE-5 doit être responsable en cas d'accident, puisque la présence du conducteur n'est même pas obligatoire. Pourtant, selon une étude [5], cette hypothèse est non seulement injuste, mais elle pourrait surtout empêcher les véhicules totalement autonomes de pénétrer le marché, les fabricants étant réticents à tant de responsabilités. Or, cela est dommageable puisque les véhicules autonomes sont censés réduire le nombre de morts de manière globale [65]. Une étude rajoute la notion de « devoir d'intervenir » dans cette réflexion [65]. Le conducteur devrait être tenu pour responsable s'il avait une chance d'anticiper et d'intervenir pour éviter l'accident. Cela pourrait être un bon compromis pour enlever de la pression aux constructeurs. Cette situation d'« intervenir » s'est d'ailleurs déjà présentée avec l'accident du 18 mars 2018 où un véhicule autonome d'Uber a provoqué la mort d'une femme de 49 ans [41]. Le conducteur aurait pu intervenir, mais il n'a pas été averti par la machine, il n'était pas très attentif et l'obscurité était forte. Il faut aussi constater que la possibilité d'appliquer le « devoir d'intervenir » n'est viable que pour les véhicules partiellement autonomes où les conducteurs peuvent encore intervenir, ce qui n'est plus le cas pour les véhicules SAE-5. En cas d'accidents dus à une non-intervention du conducteur [65] propose une amende financière, même si cela ne semble pas régler totalement le problème.

Ces questions de responsabilité impactent également directement les assurances. Plus le degré d'autonomie est grand, plus les assurances seront vraisemblablement dispendieuses pour les fabricants et

concepteurs des systèmes technologiques, et par conséquent moins elles seront chères pour les propriétaires des véhicules [5].

Une autre problématique concerne l'exhaustivité et la précision du cadre légal. Une multitude d'incidents différents pourrait arriver du fait de la complexité des interactions. Le cadre légal doit donc être suffisamment clair pour éviter que tout vice de procédure ne puisse survenir. Enfin, au Canada, la question d'harmonisation entre les provinces doit être soulevée. Les gouvernements provinciaux et fédéraux devraient travailler en collaboration. Pour le moment, les véhicules autonomes sont la responsabilité conjointe des deux gouvernements. Les gouvernements provinciaux sont chargés de l'attribution des permis, de la validation des tests et de l'exploitation sécuritaire [11]. Dans l'idéal, l'harmonie devrait même être mondiale. En guise de solution pour encadrer tout cela et faire le lien entre les différents acteurs [18] propose la mise en place d'une entité régulatrice indépendante et digne de confiance. Pour finir, une fois les lois mises en place, tous les problèmes ne seront pas encore réglés puisque des tensions sociales subsisteront sûrement : des personnes pourraient s'opposer aux nouvelles législations. Par exemple, le directeur de la San Francisco Bicycle Coalition s'oppose aux tests accordés trop rapidement à Uber et ses véhicules autonomes, car à l'état actuel, ils mettent en danger les cyclistes. Il recommande une transition plus douce [32]. Il y a tout de même des points positifs à la thématique de légalisation puisque les gouvernements peuvent y saisir des opportunités. Par exemple, ils peuvent mettre en place des mesures incitatives, voire coercitives, pour prôner le partage des véhicules et réduire les émissions. Des taxes peuvent aussi être instaurées avec le même objectif. Ces notions seront approfondies dans la section 5.3 de ce document.

5. LES IMPACTS DU TRANSPORT ÉLECTRIQUE AUTONOME

5.1 ÉVOLUTION DE LA MOBILITÉ

5.1.1 NOUVELLE MOBILITÉ

Les véhicules autonomes engendrent plusieurs opportunités, dont beaucoup de bénéfices sociaux potentiels. Les principaux sont présentés ci-après.

Tableau 8 : Opportunités de nouvelle mobilité

Opportunités
• Mobilité offerte à de toutes nouvelles classes de personnes Les personnes âgées, les enfants, les personnes handicapées, aveugles et à mobilité réduite ... [2][6][26][67] Or les personnes âgées compteront pour au moins 30% de la population mondiale en 2050. [68] • Déplacements plus flexibles Les véhicules pouvant se déplacer seuls, on peut faire l'aller en voiture et le retour en transport en commun par exemple. [54] • Perte du besoin de possession d'un véhicule Grâce à la mobilité partagée et à la demande, même si cela peut incommoder ceux attachés à leur automobile, ou ceux qui ne souhaitent pas avoir des interactions avec des inconnus. [6] • Accessibilité universelle à la mobilité Un véhicule autonome peut aller chercher n'importe qui n'importe où : l'isolation sera révolue.

Les véhicules autonomes offrent la mobilité à toute une nouvelle classe de personnes : celles qui ne peuvent pas conduire. Cela comprend notamment les personnes âgées, les enfants, les personnes handicapées, malvoyantes, et à mobilité réduite [2,4,6,26,67]. Il s'agit une part importante de la population, d'autant plus que les personnes âgées compteront pour au moins 30% de la population mondiale en 2050 [68]. La demande induite sera encore renforcée par la réutilisation possible du temps de trajet [2,6,7]. Les conducteurs pourront se consacrer à d'autres activités qui leur conviennent mieux comme manger, lire, etc. [7], ou simplement admirer les paysages [6]. Un autre avantage est l'augmentation de flexibilité des déplacements. Les véhicules autonomes pouvant se déplacer seuls, il sera par exemple possible de faire un

aller en voiture et un retour en transport en commun [54]. Le besoin de possession de véhicule ne sera plus aussi fort grâce à la mobilité partagée à la demande, même si certaines personnes resteront attachées à leur automobile, et certaines autres ne souhaiteront pas avoir d'interactions avec des inconnus [6]. Enfin, l'accessibilité deviendra quasiment universelle : un véhicule autonome pourra aller chercher n'importe qui n'importe où et n'importe quand. Cela permettra de remédier aux problématiques d'isolation dans des zones non desservies par les systèmes de transport actuels.

5.1.2 DÉVELOPPEMENT DU PARTAGE

Le développement du concept de véhicule partagé vient des constats actuels de faible optimisation de l'usage des véhicules. La capacité de mobilité de la flotte mondiale est présentement bien plus grande que son utilisation. En effet, un véhicule est en moyenne stationné 96% du temps, et est utilisé seulement 4% de temps pour des déplacements [20]. De plus, le taux d'occupation moyen d'un véhicule est faible. Aux États-Unis par exemple, ce taux est d'environ 30% avec 1.7 personne par véhicule [69]. Cela provoque des problématiques de congestion et de pollution qui pourraient être optimisées. Dans le même temps, les véhicules autonomes pourraient encore augmenter le kilométrage. Cela est dû entre autres aux nouvelles accessibilités, à la réutilisation possible du temps de trajet et au fait que les véhicules pourront se déplacer seuls. Le partage apparaît alors comme la solution pour contrebalancer ces phénomènes. Un véhicule autonome connecté pourrait permettre de remplacer dix véhicules privés [7]. La collaboration entre l'autonomie et le partage est illustrée par le graphique suivant :

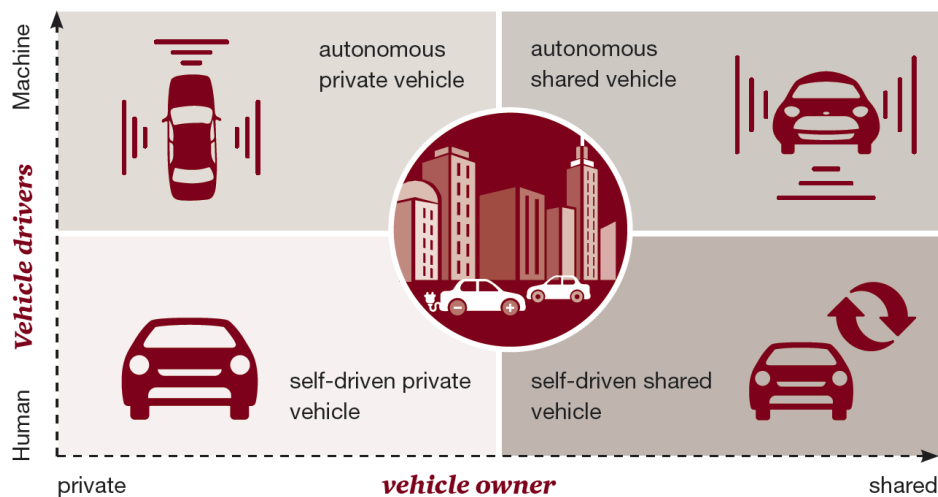


Figure 6 : Interaction entre l'autonomie et le partage [3]

L'intérêt, le risque et des opportunités liées au partage de véhicules sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 9 : Intérêt, risque et opportunités du partage de véhicules

Intérêt	Risque	Opportunités
• Réduction du kilométrage total Les nouvelles accessibilités, la réutilisation du temps de trajet et la possibilité pour les véhicules de se déplacer seuls vont entraîner une hausse du kilométrage [3][4] [20], donc des émissions et de la congestion. Le partage permet de fortement contrebalancer.	• Acceptation de voyager avec des inconnus La cohabitation avec des inconnus dans un véhicule peut être jugée comme inacceptable par certains du fait de l'obligation de parler. Cependant, les études montrent que cela est surtout vrai en présence d'un seul inconnu, mais s'estompe avec deux inconnus ou plus [6].	• Applications à différents types de flottes Pour les véhicules privés, pour les compagnies privées de taxis à véhicules partiellement autonomes, et pour les véhicules complètement autonomes en libre-service • Adapté aux zones urbaines Le partage est surtout impactant dans les centres denses et développés [4] [70]. • Bénéfique à l'échelle du ménage Réduit le nombre de véhicules par ménage : le même véhicule peut accompagner plusieurs personnes successivement en revenant vide à chaque fois [54]

Une étude s'est penchée sur l'impact d'un véhicule autonome sur un ménage [54]. Le véhicule pourrait avoir un mode « retour à la maison » lorsqu'il est vide si un autre membre de la famille en a besoin. Il deviendrait ainsi un véhicule partagé par toute la famille : cela permettrait de réduire significativement le nombre de véhicules par domicile. L'étude évoque une baisse de 2.1 véhicules à 1.2 par ménage, ainsi qu'une hausse de 75% d'utilisation kilométrique par véhicule. Toutes ces raisons, en plus du futur coût élevé des véhicules autonomes [18,26], mettent l'accent sur l'usage partagé des véhicules autonomes. Le nombre de véhicules en circulation est d'ailleurs amené à grandement diminuer dans les prochaines années. La baisse est estimée de 280 à 200 millions de véhicules (-28%) en Europe, et de 270 à 212 millions (-22%) aux Etats-Unis, aux horizons de 2030 [3]. Certaines études proposent que, dans un premier temps, les compagnies de taxis et véhicules à la demande propres prônent le covoiturage, et soient intégrées avec les autres modes de transport public et privé [20]. À terme, ce même principe pourrait s'adapter aux véhicules autonomes en libre-service, puis aux véhicules privés. Il y a l'opportunité d'intégrer tous les types de flottes. De plus, ces services de partage et mobilité à la demande pourraient être accessibles à tous types de clients : les individus, les municipalités, les agences gouvernementales et non-gouvernementales, et même les entreprises [10]. Les enjeux socio-économiques de cette éventuelle évolution sont également à considérer. Les points positifs pour les individus sont principalement l'aspect économique et l'aspect de gain temporel. Les coûts d'acquisition, de maintenance et de stationnement en centre-ville n'existeraient plus. La congestion serait réduite, la recherche de stationnement deviendrait inutile, donc du temps serait économisé [5]. Cependant, l'usage partagé implique la cohabitation avec des inconnus dans le véhicule, ce qui peut être inacceptable pour certains en considérant l'« obligation de parler ». Cette crainte est surtout

vraie en présence d'un inconnu, mais s'estompe avec deux ou trois inconnus dans un même véhicule [6]. Concernant la portée de l'usage partagé, les avis ne sont pas toujours unanimes sur leur importance. Certaines études considèrent ainsi que la plupart des bénéfices des véhicules connectés et autonomes (réduction de la congestion, des émissions, augmentation de l'accessibilité, etc.) dépendent d'une utilisation partagée de ces derniers, plutôt que privée [6]. Cependant, d'autres études nuancent les bénéfices en exposant que tous les aspects de l'usage partagé ne sont pas toujours meilleurs [4]: cela dépend de la taille de la ville et de la demande. McKinsey&Company [70] considère que l'usage partagé aura plus d'impact et réduira plus les coûts dans les centres denses et développés, par rapport aux grandes banlieues. L'usage partagé est donc très adapté à l'échelle d'une ville, comme Montréal. Cependant, les rues très achalandées du centre-ville avec beaucoup de types d'usagers différents peuvent poser un problème pour les véhicules autonomes. Chaque cas a ses spécificités qu'il faut étudier avant d'instaurer l'usage partagé afin de récolter les bénéfices escomptés liés au partage des véhicules autonomes [71].

5.1.3 INTERACTIONS AVEC LE TRANSPORT PUBLIC

Le développement des véhicules autonomes va impacter les réseaux de transport public : il convient d'harmoniser ces interactions.

Tableau 10 : Risques et solution des interactions avec le transport public

Risques	Solution
• Possible impact néfaste sur le transport public Surtout dans les zones peu ou moyennement denses [4][72] • Effets opposés des automatisations des transport public et privé Dans les grandes villes, l'automatisation du transport privé pourrait entraîner un départ des personnes vers les banlieues. C'est l'inverse pour celle du transport public. [73]	• Déploiement des véhicules autonomes doit être fait en harmonie avec le réseau de transport public Il y a même possibilité de stimuler le transport public, avec des politiques de prix conjointes ou alors des véhicules autonomes utilisés pour le « dernier kilomètre »

Un point auquel il convient de dédier une attention particulière, est le fait les véhicules autonomes pourraient avoir une influence néfaste sur les réseaux de transport en commun existants. Cela est particulièrement vrai pour les zones peu ou moyennement denses [4,72]. L'automatisation du transport privé est à distinguer de celle du transport public : [73] considère que les deux auront des effets opposés. Dans les grandes villes, l'automatisation du transport privé pourrait entraîner un départ des personnes vers

les banlieues. Pour l'automatisation du transport public, c'est l'inverse et les individus auraient tendance à être attirés par les centres-villes [73]. Dans l'idéal, le développement des véhicules autonomes devrait donc être pensé en harmonie avec le réseau de transport public. Il y a même possibilité de stimuler ce dernier, avec par exemple des politiques conjointes de prix, ou alors avec l'utilisation des véhicules autonomes en complément pour les premiers ou derniers kilomètres [73].

5.2 RÉAMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

5.2.1 DÉMOGRAPHIE ET ÉVOLUTION SPATIALE DES VILLES

Selon une étude [5], 70% de la population mondiale vivra dans les villes en 2050. Les véhicules autonomes vont avoir une influence non négligeable sur le développement spatial des centres urbains.

Tableau 11 : Risques et opportunités des évolutions démographiques et spatiales

Risques	Opportunités
• Étalement urbain provoqué Engendré par la réutilisation possible du temps de trajet (pour du travail, repos, détente, ...), et par les prix de l'immobilier moins chers en grande banlieue. [6][24][46][67][72][75][76] • Augmentation du kilométrage éventuelle Pourrait amener de la congestion et de la pollution supplémentaires. [3] Mais cette augmentation peut être compensée par le partage des véhicules.	• Concentration des individus dans les grands pôles urbains attractifs La combinaison des automatisations du transport public et privé pourrait provoquer un tel exode aux dépens des villes de plus petite taille et des zones rurales. [73] • Réaménagement du territoire • Nouvelles offres et politiques immobilières

Un étalement urbain pourrait être engendré grâce à des coûts de transport réduits, mais surtout grâce à la possibilité d'utiliser le temps de transport pour d'autres activités productives (travail, repos, détente, etc.) [6,72]. Cette expérience de transport améliorée pourrait inciter les gens à habiter plus loin des centres pour avoir des logements moins chers, puisque les longs temps de trajets seraient moins problématiques [24,46,67,75,76]. Une autre étude montre cependant, que les automatisations des transport public et privé auront des effets opposés [73]. En examinant si cette automatisation mènerait à une croissance ou un déclin des villes, la conclusion de l'étude est que la combinaison des deux effets pourrait aboutir à la concentration des individus dans les plus grands pôles urbains attractifs, aux dépens des villes de plus petite taille et des zones rurales [73]. Pour les gouvernements, ces deux évolutions peuvent être vues comme des risques,

mais aussi comme des opportunités de réaménagement du territoire. De nouvelles politiques immobilières peuvent être lancées, des emplois peuvent être créés, des banlieues peuvent être revalorisées.

5.2.2 RÉORGANISATION DES STATIONNEMENTS

Les changements démographiques et spatiaux évoqués précédemment vont également modifier la structure et la gestion des stationnements.

Tableau 12 : Risque et opportunités de la réorganisation des stationnements

Risque	Opportunités
• Réduction des stationnements en centre-ville Plus nécessaires en centre-ville puisque les véhicules pourront aller se garer seuls en banlieue pour moins cher. Donc pertes de revenus pour les municipalités.	• Possibilité de réaménagement de ces espaces Transformation des stationnements par les municipalités : en parcs, habitations, bureaux, commerces, pistes cyclables ... [26][67][77] • Nouvelles mobilités urbaines Plus de mobilité piétonne en centre-ville, développements des bicyclettes et espaces verts pour les citoyens

La problématique de l'évolution des stationnements est importante : ceux-ci ne seraient plus nécessaires en centre-ville puisque les véhicules autonomes pourront aller se garer dans des stationnements périphériques moins chers [26,67,77]. Cela peut être perçu comme un risque pour les municipalités avec une perte de revenus conséquente. En même temps, cela peut être une opportunité de réutilisation de ces espaces pour d'autres fins : des parcs, des habitations, des commerces, des bureaux, des pistes cyclables, etc. Cela pourrait également être l'occasion de renouveler les types de mobilité, avec une valorisation de déplacements piétons et cyclistes. Des espaces verts permettraient aussi d'améliorer la qualité de vie des citoyens, tout en récoltant des bénéfices environnementaux. Cette évolution dans la réorganisation des stationnements apparaît encore amplifiée lorsqu'on prend en compte un éventuel partage des véhicules. Une étude estime ainsi que jusqu'à 90% de la demande en stationnements peut être supprimée avec un taux de pénétration de véhicules autonomes partagés de 2%, si les stratégies de partage respectent les préférences des clients [77].

5.3 PORTÉE ÉCONOMIQUE

5.3.1 COÛTS POUR LES INDIVIDUS

On commence par présenter un tableau illustrant le risque principal et les opportunités liés aux coûts pour les individus.

Tableau 13 : Risque et opportunités des coûts pour les individus

Risque	Opportunités
• Prix d'acquisition sûrement élevés, surtout au début Du fait de la haute technologie/rareté. Les foyers aux revenus élevés seront donc privilégiés. [26] Baisse des prix ne doit pas être synonyme de baisse de qualité : tous les véhicules étant en interaction, la sécurité globale serait affectée. [18]	• Plusieurs sources d'économies à terme 1. <i>frais de stationnement</i> : véhicules pouvant se garer plus loin pour moins cher 2. <i>frais de carburant</i> : consommation pouvant être optimisée au minimum 3. <i>frais d'achat et maintenance</i> : utilisation de plus en plus partagée • Économies de temps et de productivité, donc d'argent Réutilisation possible du temps de trajet, réduction des temps d'attente [4][20]

Les prix des premiers véhicules autonomes devraient vraisemblablement être élevés, du fait de leur haute technologie et de leur rareté. Certes, les personnes seraient en général disposées à payer plus cher pour un véhicule automatisé que pour un véhicule qui ne l'est pas [53]. Mais ces hauts coûts d'acquisition peuvent avoir plusieurs conséquences. Les foyers aux revenus élevés seront privilégiés par rapport aux autres classes démographiques [26], au moins dans un premier temps.

Cependant, au niveau des individus, les véhicules autonomes pourraient également permettre plusieurs types d'économie sur le long terme. Les frais de stationnement seront réduits puisque les véhicules pourront aller se garer seuls dans des stationnements lointains et moins chers [26,67]. Cela est un facteur attractif pour beaucoup de personnes [19]. De même, la possession de places de stationnements ne serait alors plus rentable économiquement pour les individus, ce qui les pousserait à s'en séparer [26]. On peut supposer que les véhicules autonomes engendreront aussi moins de frais de carburant puisque leur consommation sera optimisée. Différentes mesures et politiques pourraient également être adoptées qui pourraient influencer l'utilisation de stationnements en milieu urbain aux centres urbains ou en banlieue. Une étude prend pour exemple une taxe éventuelle mise en place par la ville de Seattle sur les véhicules quittant la ville pour aller se garer en banlieue [26]. Le stationnement massif en banlieue pourrait en effet provoquer

plus de circulation, plus de congestion et plus d'émissions néfastes à l'environnement, ce qui n'est pas non plus souhaitable. Un équilibre est donc à trouver, en harmonie entre les priorités des municipalités et les besoins des citoyens. Enfin, les frais d'achat et de maintenance devraient grandement diminuer grâce au développement du partage de véhicules aux dépens de la possession privée [5]. Comme vu précédemment, les trajets seront ainsi plus abordables et accessibles à un plus large spectre socio-économique, et même aux touristes [6]. Un autre attrait économique pour les individus apparaît avec la réutilisation possible des temps de trajet et la réduction des temps d'attente. Cela permettrait en effet aux personnes d'être plus productives, ce qui pourrait déboucher sur des bénéfices économiques non négligeables pour eux [4,20].

5.3.2 COÛTS LIÉS AUX DÉPENSES DES GOUVERNEMENTS

Les gouvernements sont souvent prêts à investir sur des projets de véhicules autonomes électriques. Par exemple, pour la navette autonome électrique de Candiad, Keolis a obtenu une subvention de 350 000\$ provenant du Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation [13]. Pour les gouvernements, cette technologie peut en effet représenter un investissement intéressant dès maintenant au vu des prédictions d'évolution du transport vers l'autonomie. Mais plusieurs points méritent un examen particulier. Les risques et opportunités principales sont les suivants :

Tableau 14 : Risques et opportunités vis-à-vis des coûts gérés par les gouvernements

Risques	Opportunités
• Attention à ne pas délaier le transport public Coopération possible entre les véhicules autonomes et le transport public, avec des politiques de prix conjointes par forfait par exemple. Collaborations possibles aussi entre le transport public et les compagnies de transport privé (Uber, Lyft, Via, ...). [20] • Fluctuation des prix de l'immobilier Notamment dû à l'étalement urbain vu précédemment	• Instauration de taxes Pour réduire la circulation, la congestion, la pollution (ex. : taxe pour les véhicules allant se garer en banlieue, taxe contre l'usage privé pour favoriser le partage, taxe sur les véhicules trop polluants pour favoriser les véhicules électriques respectueux, etc...) [26] • Revalorisation des banlieues Penser l'évolution immobilière en amont et en récupérer des revenus

Un thème important est de ne pas délaier le transport public dans le processus. Le marché de transport des véhicules autonomes peut être optimisé économiquement en le faisant coopérer avec le transport public, avec des politiques de prix conjointes par exemple. En particulier, des collaborations peuvent être instaurées entre les compagnies de transport public et les compagnies de transport privé, telles Uber, Lyft

ou Via [20]. Il faut aussi considérer l'évolution des prix immobiliers, qui pourraient être impactés par l'étalement urbain des villes et la relocalisation des individus, comme vu plus haut.

Dans le même temps, des opportunités se présentent. Le partage de véhicules présente des avantages pour les gouvernements puisqu'un plus grand taux d'occupation des véhicules entraînerait moins de trafic, moins de congestion et moins de pollution. Le partage pourrait donc être incité grâce à des taxes instaurées par les gouvernements [6]. Ces taxes procureraient des bénéfices aux organes administratifs tout en permettant de réduire des aspects négatifs tels que la congestion et la pollution [26]. D'autres exemples de taxes peuvent être : une taxe concernant les véhicules allant se garer en banlieue, une taxe carbone sur les véhicules trop polluants pour favoriser ceux respectueux de l'environnement [78], etc.

Un autre axe d'opportunités est la possibilité de revaloriser les banlieues en repensant les politiques immobilières, pour la génération de nouveaux revenus tout en développant le territoire.

5.3.3 IMPACTS SUR LE MARCHÉ DU TRAVAIL

Le développement des véhicules autonomes risque d'avoir également des répercussions sociales, en particulier sur le marché du travail. En voici quelque risques et opportunités inhérents.

Tableau 15 : Risques et opportunités liés au marché du travail

Risques	Opportunités
• Influences directes sur plusieurs corps de métiers Conducteurs de taxis, chauffeurs de bus et autocars, formateurs de conduite, garagistes traditionnels voués à disparaître. [5][6] Cependant, compétences en informatique et technologies des communications de plus en plus recherchées. • Changements des lieux de travail Les personnes iront travailler plus loin de chez eux s'ils y trouvent un métier plus stimulant et lucratif. [73]	• Hausse potentielle de la productivité Possibilité de transformer le temps de trajet en temps de travail, ainsi que de trouver un travail plus productif plus loin de chez soi [73] • Réaménagement du territoire Peut découler à partir des changements de lieux de travail [79] [80]

Certains corps de métiers seront directement touchés. Les occupations de conducteurs de taxis, chauffeurs de bus et autocars, formateurs de conduite, garagistes traditionnels, entre autres, seront amenées à disparaître [5,6]. Dans le même temps, les compétences en informatique et technologies de communication seront de plus en plus recherchées [5]. Cela peut être une opportunité de réorientation professionnelle. En

plus des changements de métiers, des changements de lieux de travail sont aussi à prévoir du fait de l'acceptation d'un temps de trajet plus important. Ainsi, les gens pourraient aller travailler plus loin, s'ils y trouvent un travail plus stimulant et lucratif [73]. Cette réorganisation du travail peut être perçue comme positive, car elle rendrait chaque individu, et donc la société, plus productive [73]. De plus, un réaménagement optimisé du territoire pourrait être effectué en fonction de ces relocalisations professionnelles [79,80].

5.4 EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE

5.4.1 IMPACTS SUR LES ÉMISSIONS

La plupart des pays se sont engagés à lutter contre le réchauffement climatique lors de la COP21 à Paris en 2015 [81]. Les activités de transport doivent être un terrain central pour la transition énergétique et la réduction des émissions [1].

Tableau 16 : Risque, solution et opportunités engendrés par la notion d'émission

Risque	Solution	Opportunités
• Incertitude sur l'évolution du kilométrage total Flotte de véhicules censée diminuer [3] mais chaque véhicule parcourra plus de distance (partage, déplacements seuls).	• Politiques de régulations d'émissions Elles évoluent, mais pas encore adaptées aux véhicules autonomes [82]	• Optimisation des algorithmes Seulement grâce aux codes, on peut réduire les émissions jusqu'à 10% [82] • Optimisation des sources d'énergie À partir de l'essence, de l'hybride ou de l'électrique [57]

Les véhicules autonomes vont apporter des changements dans la consommation de carburant, même si ces changements ne peuvent pas être parfaitement quantifiés. En effet, cela dépendra d'abord de l'évolution du kilométrage. La flotte de véhicules est censée diminuer comme vu précédemment [3], mais chaque véhicule parcourra vraisemblablement plus de distance : les véhicules seront partagés donc feront plus de voyages, et ils pourront se déplacer seuls.

Ensuite, la pollution de l'environnement et l'utilisation de l'énergie sont actuellement réglementées par des normes d'économie de carburant et d'émissions. Or les tests d'économie de carburant actuels ne sont pas adaptés aux véhicules autonomes [82]. Pour les véhicules autonomes, les décisions de conduite sont prises par le véhicule plutôt que par le conducteur. La procédure actuelle de test d'économie de carburant ne dispose pas d'un mécanisme permettant d'évaluer l'impact de la conduite autonome sur les côtes d'économie de carburant. Selon une étude [82], une potentielle réduction d'émissions de 10% est atteignable si des algorithmes d'économie de carburant sont bien pensés pour les véhicules autonomes, contre une hausse de carburant pouvant aller jusqu'à 3% si les algorithmes ne sont pas bien pensés en amont.

Un autre facteur d'optimisation des émissions est le choix de la source d'énergie utilisée : la combustion interne, l'hybride et l'électrique ont des répercussions différentes selon leur modèle de fonctionnement [57].

5.4.2 LE CAS DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Comme vu en début de rapport, il y a de fortes chances pour que les véhicules autonomes du futur tendent vers l'électrique [3]. Ils sont en effet supposés être globalement plus efficaces, plus fiables, plus rapides et moins polluants [78]. La première navette autonome québécoise à Candiac, par exemple, est électrique [12,13,14]. Par contre, certaines études estiment que l'électrification a une plus grande probabilité de s'installer en milieu urbain pour des trajets courts, alors que l'essence et le diesel pourraient continuer à prévaloir pour les voyages de longue distance [6].

Tableau 17 : Risque et opportunités reliés aux véhicules électriques

Risque	Opportunités								
Pas forcément moins polluants que les véhicules à combustion interne Dépend des procédés de fabrication et systèmes de batterie [6]	Trois facteurs d'efficacité à développer <table> <tr> <th>Facteur</th><th>Solution</th></tr> <tr> <td>Gestion des réseaux électriques</td><td>Les adapter pour l'environnement</td></tr> <tr> <td>Disponibilité de bornes de recharge</td><td>Optimiser la répartition</td></tr> <tr> <td>Type de véhicule</td><td>Véhicules hybrides à explorer</td></tr> </table> Meilleure qualité de l'air, moins de pollution sonore Mais il faut faire attention car le fait d'être silencieux peut être dangereux	Facteur	Solution	Gestion des réseaux électriques	Les adapter pour l'environnement	Disponibilité de bornes de recharge	Optimiser la répartition	Type de véhicule	Véhicules hybrides à explorer
Facteur	Solution								
Gestion des réseaux électriques	Les adapter pour l'environnement								
Disponibilité de bornes de recharge	Optimiser la répartition								
Type de véhicule	Véhicules hybrides à explorer								

Cependant, contrairement aux idées reçues, l'électrification n'a pas forcément que des avantages directs. Les véhicules électriques ont pour l'instant des autonomies assez courtes, et nécessitent de longues recharges [78]. De plus, les véhicules électriques ne produiraient pas forcément moins d'émissions que les véhicules à combustion interne, en considérant leur cycle de vie au complet. Les réductions des émissions électriques dépendent, en particulier, des procédés de fabrication du véhicule et des systèmes de batteries utilisés [6]. Une étude [57] résume les facteurs d'efficacité des véhicules électriques en trois parties : les sources de génération d'électricité utilisées, la disponibilité d'infrastructures de recharge et le type de véhicules. Ces éléments sont indispensables à considérer pour le déploiement et la mise en place des « villes intelligentes » (« smart cities ») [83].

En ce qui a trait aux types de véhicule, ceux-ci peuvent ne pas être forcément totalement à combustion interne ou totalement électriques : ils peuvent être hybrides et fonctionner avec les deux sources d'énergie. Une étude [78] présente par exemple un scénario où les véhicules hybrides sont plus optimaux économiquement que les véhicules totalement électriques.

Pour les bornes de recharge, il faut optimiser leurs placements en fonction des comportements des individus, notamment des lieux et heures de la journée où ils en ont besoin [74]. Deux principaux résultats sont donnés par l'étude effectuée dans [57] : restreindre la recharge des véhicules aux périodes hors pointe augmenterait les émissions, et mettre à disposition des travailleurs la possibilité de recharger leur véhicule à leur lieu de travail entraînerait un taux d'émissions plus faible dans la majorité des cas.

Enfin, les véhicules électriques ont un autre avantage certain pour les villes : ils amélioreraient la qualité de l'air en réduisant le smog. Ils apporteraient également moins de pollution sonore en étant plus silencieux. Le fait d'être silencieux peut néanmoins être dangereux pour la sécurité des usagers vulnérables qui n'entendraient plus le véhicule arriver.

6. CONCLUSION

Les véhicules autonomes s'en viennent progressivement. Ils pourraient être la prochaine rupture technologique et transformer les comportements de mobilité. Les principaux développements actuels se font sur les aspects technologiques, mais beaucoup d'autres problématiques sont à régler avant une éventuelle mise en circulation. Cela nécessitera une réflexion sur un spectre très large d'enjeux qui va demander du temps et de l'investissement.

Comme le montre ce rapport, beaucoup d'enjeux existent, chacun comprenant certes des risques, mais aussi un grand nombre d'opportunités. Une vision globale de ces enjeux serait à considérer dans les planifications stratégiques de l'espace urbain et de transport, afin de profiter pleinement de l'intégration des véhicules autonomes tout en encadrant leurs impacts négatifs possibles, au moment de basculer vers la nouvelle mobilité du futur.

RÉFÉRENCES

- [1] ATEC ITS France et al. (2019), Étude MIRE.
- [2] Adnan, N., Md Nordin, S., bin Bahrudin, M. A., & Ali, M. (2018). How trust can drive forward the user acceptance to the technology? In-vehicle technology for autonomous vehicle. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, 819-836. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.019>
- [3] *Five trends transforming the Automotive Industry*. (s. d.). 48.
- [4] Hidaka, K., & Shiga, T. (2018). Forecasting Travel Demand for New Mobility Services Employing Autonomous Vehicles. *Transportation Research Procedia*, 34, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.11.025>
- [5] Martínez-Díaz, M., & Soriguera, F. (2018). Autonomous vehicles: theoretical and practical challenges. *Transportation Research Procedia*, 33, 275-282. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.103>
- [6] Cohen, S. A., & Hopkins, D. (2019). Autonomous vehicles and the future of urban tourism. *Annals of Tourism Research*, 74, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2018.10.009>
- [7] Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 167-181. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>
- [8] Debbie Hopkins, & Tim Schwanen. (2018). Automated Mobility Transitions: Governing Processes in the UK. *Sustainability*, 10(4), 956. <https://doi.org/10.3390/su10040956>
- [9] Shaheen, S. (2018). Future of Mobility White Paper. *Institute of Transportation Studies, Berkeley*. <https://doi.org/10.7922/g2wh2n5d>
- [10] Alkheir, A. A., Aloqaily, M., & Mouftah, H. T. (2018). Connected and Autonomous Electric Vehicles (CAEVs). *IT Professional*, 20(6), 54-61. <https://doi.org/10.1109/MITP.2018.2876977>
- [11] *Voitures autonomes : qui sauver, qui sacrifier*, Radio Canada, Marc Lajoie, 25 avril 2019, <https://ici.radio-canada.ca/info/2019/voitures-autonomes-dilemme-tramway/index.html?fromApp=applInfofos> (consulté le 21 mai 2019)
- [12] *La navette autonome reprend du service à Candiac*. Le Reflet, Vicky Girard, 27 mars 2019, <https://www.lereflet.qc.ca/la-navette-autonome-reprend-du-service-a-candiac/> (consulté le 21 mai 2019)
- [13] *Une grande première canadienne à Candiac – Projet de navette autonome électrique sur voie publique*. Newswire, Keolis Canada, 10 août 2018, <https://www.newswire.ca/fr/news-releases/une-grande-premiere-canadienne-a-candiac---projet-de-navette-autonome-electrique-sur-voie-publique-690560811.html> (consulté le 21 mai 2019)

- [14] *La navette autonome de retour mercredi sur les routes de Candiac*. Le Reflet, Vicky Girard, 13 mai 2019, <https://www.lereflet.qc.ca/la-navette-autonome-de-retour-mercredi-sur-les-routes-de-candiac/> (consulté le 25 mai 2019)
- [15] Penmetsa, P., Adanu, E. K., Wood, D., Wang, T., & Jones, S. L. (2019). Perceptions and expectations of autonomous vehicles – A snapshot of vulnerable road user opinion. *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 9-13. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.02.010>
- [16] Hengstler, M., Enkel, E., & Duelli, S. (2016). Applied artificial intelligence and trust—The case of autonomous vehicles and medical assistance devices. *Technological Forecasting and Social Change*, 105, 105-120. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.12.014>
- [17] König, M., & Neumayr, L. (2017). Users' resistance towards radical innovations: The case of the self-driving car. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 44, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.10.013>
- [18] London, A. J., & Danks, D. (2018). Regulating Autonomous Vehicles: A Policy Proposal. *Proceedings of the 2018 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society - AIES '18*, 216-221. <https://doi.org/10.1145/3278721.3278763>
- [19] Howard & Dai (2014), Public Perceptions of Self Driving Cars: Case of Berkeley, California.
- [20] Greenwald, J. M., & Kornhauser, A. (2019). It's up to us: Policies to improve climate outcomes from automated vehicles. *Energy Policy*, 127, 445-451. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.017>
- [21] Bansal, P., & Kockelman, K. M. (2017). Forecasting Americans' long-term adoption of connected and autonomous vehicle technologies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 95, 49-63. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.013>
- [22] Kyriakidis, M., Happee, R., & de Winter, J. C. F. (2015). Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 32, 127-140. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.014>
- [23] Schoettle B, Sivak M. A (2014) A survey of public opinion about autonomous and self-driving vehicles in the U.S., the U.K., and Australia. <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/108384>. (consulté le 22 mai 2019)
- [24] Bansal & al. (2015), Assessing public opinions of an interest in new vehicle technologies : an Austin perspective.
- [25] Hohenberger, C., Spörrle, M., & Welp, I. M. (2016). How and why do men and women differ in their willingness to use automated cars? The influence of emotions across different age groups. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94, 374-385. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.022>
- [26] Harper, C. D., Hendrickson, C. T., & Samaras, C. (2018). Exploring the Economic, Environmental, and Travel Implications of Changes in Parking Choices due to Driverless Vehicles: An Agent-Based Simulation Approach. *Journal of Urban Planning and Development*, 144(4), 04018043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000488](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000488)

- [27] Bonnefon, J.-F., Shariff, A., & Rahwan, I. (2016). The social dilemma of autonomous vehicles. *Science*, 352(6293), 1573-1576. <https://doi.org/10.1126/science.aaf2654>
- [28] Koopman, P., & Wagner, M. (2017). Autonomous Vehicle Safety: An Interdisciplinary Challenge. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9(1), 90-96. <https://doi.org/10.1109/MITS.2016.2583491>
- [29] Meder, B., Fleischhut, N., Krumnau, N.-C., & Waldmann, M. R. (2019). How Should Autonomous Cars Drive? A Preference for Defaults in Moral Judgments Under Risk and Uncertainty: How Should Autonomous Cars Drive? *Risk Analysis*, 39(2), 295-314. <https://doi.org/10.1111/risa.13178>
- [30] Payre, W., Cestac, J., & Delhomme, P. (2014). Intention to use a fully automated car: Attitudes and a priori acceptability. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.04.009>
- [31] Millard-Ball, A. (2018). Pedestrians, Autonomous Vehicles, and Cities. *Journal of Planning Education and Research*, 38(1), 6-12. <https://doi.org/10.1177/0739456X16675674>
- [32] *The self-driving car's bicycle problem*. IEEE Spectrum, Peter Fairley, 31 janvier 2017, <https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/the-selfdriving-cars-bicycle-problem> (consulté le 22 mai 2019)
- [33] *The Cyclist Problem*. Slate, Christina Bonnington, 3 février 2018, <https://slate.com/technology/2018/02/self-driving-cars-struggle-to-detect-cyclists-bicycle-to-vehicle-communications-arent-the-answer.html> (consulté le 22 mai 2019)
- [34] Hulse, L. M., Xie, H., & Galea, E. R. (2018). Perceptions of autonomous vehicles: Relationships with road users, risk, gender and age. *Safety Science*, 102, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.001>
- [35] Daziano, R. A., Sarrias, M., & Leard, B. (2017). Are consumers willing to pay to let cars drive for them? Analyzing response to autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 78, 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.003>
- [36] Deb, S., Strawderman, L., Carruth, D. W., DuBien, J., Smith, B., & Garrison, T. M. (2017). Development and validation of a questionnaire to assess pedestrian receptivity toward fully autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 84, 178-195. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.08.029>
- [37] Brell, T., Philipsen, R., & Ziefle, M. (2019). sCARY! Risk Perceptions in Autonomous Driving: The Influence of Experience on Perceived Benefits and Barriers: sCARY! Risk Perceptions in Autonomous Driving. *Risk Analysis*, 39(2), 342-357. <https://doi.org/10.1111/risa.13190>
- [38] Richardson, E., & Davies, P. (2018). *The Changing Public's Perception of Self-Driving Cars*. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.34641.02402>
- [39] Sivak, M., & Schoettle, B. (s. d.). *Road safety with self-driving vehicles: general limitations and road sharing with conventional vehicles*. 13.

- [40] Goodall, N. J. (2014). Ethical Decision Making during Automated Vehicle Crashes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2424(1), 58-65.
<https://doi.org/10.3141/2424-07>
- [41] *Self-driving Uber car saw pedestrian but didn't brake, causing fatal accident : report*. Global News, Tom Krisher, 24 mars 2018, <https://globalnews.ca/news/4229104/uber-self-driving-crash/> (consulté le 22 mai 2019)
- [42] Papadoulis, A., Quddus, M., & Imprialou, M. (2019). Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways. *Accident Analysis & Prevention*, 124, 12-22.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.12.019>
- [43] P.E., Y. J. S., Golias, M., Dedes, G., Douligeris, C., & Mishra, S. (2019). Challenges, Risks and Opportunities for Connected Vehicle Services in Smart Cities and Communities. *IFAC-PapersOnLine*, 51(34), 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.01.056>
- [44] Shen, S., & Neyens, D. M. (2017). Assessing drivers' response during automated driver support system failures with non-driving tasks. *Journal of Safety Research*, 61, 149-155.
<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.02.009>
- [45] Douma, F., & Palodichuk, S. A. (s. d.). Criminal Liability Issues Created by Autonomous Vehicles. *SANTA CLARA LAW REVIEW*, 52, 14.
- [46] Litman, T. (s. d.). *Implications for Transport Planning*. 35.
- [47] Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (2017), German Report Ethics Commission.
- [48] Fafoutellis & Manteka (2019), Major limitations: concerns regarding the integration of AVs in urban transportation systems.
- [49] Lin, P. (2016). *Why Ethics Matters for Autonomous Cars*. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8_4
- [50] Awad, E., Dsouza, S., Kim, R., Schulz, J., Henrich, J., Shariff, A., ... Rahwan, I. (2018). The Moral Machine experiment. *Nature*, 563(7729), 59-64. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0637-6>
- [51] Foot, P. (2002). *Virtues and Vices*. <https://doi.org/10.1093/0199252866.001.0001>
- [52] *Should a self-driving car kill the baby or the grandma? Depends on where you're from*. MIT Technology Review, Karen Hao, 24 octobre 2018
<https://www.technologyreview.com/s/612341/a-global-ethics-study-aims-to-help-ai-solve-the-self-driving-trolley-problem/> (consulté le 21 mai 2019)
- [53] Cunningham, M. L., Ledger, S. A., & Regan, M. A. (2018). *A Survey of Public Opinion on Automated Vehicles in Australia and New Zealand*. 15.
- [54] Schoettle, B., & Sivak, M. (s. d.-b). *Potential impact of self-driving vehicles on household vehicle demand and usage*. 18.

- [55] Talebpour, A., & Mahmassani, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 143-163. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.07.007>
- [56] Ye, L., & Yamamoto, T. (2018). Impact of dedicated lanes for connected and autonomous vehicle on traffic flow throughput. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 512, 588-597. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.083>
- [57] McLaren, J., Miller, J., O'Shaughnessy, E., Wood, E., & Shapiro, E. (2016). *Emissions Associated with Electric Vehicle Charging: Impact of Electricity Generation Mix, Charging Infrastructure Availability, and Vehicle Type* (N° NREL/TP--6A20-64852, 1247645). <https://doi.org/10.2172/1247645>
- [58] Levin, M. W., & Khani, A. (2018). Dynamic transit lanes for connected and autonomous vehicles. *Public Transport*, 10(3), 399-426. <https://doi.org/10.1007/s12469-018-0186-2>
- [59] Soriguera, F., Martínez, I., Sala, M., & Menéndez, M. (2017). Effects of low speed limits on freeway traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77, 257-274. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.024>
- [60] Ghiasi, A., Hussain, O., Qian, Z. (Sean), & Li, X. (2017). A mixed traffic capacity analysis and lane management model for connected automated vehicles: A Markov chain method. *Transportation Research Part B: Methodological*, 106, 266-292. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.09.022>
- [61] Skeete, J.-P. (2018). Level 5 autonomy: The new face of disruption in road transport. *Technological Forecasting and Social Change*, 134, 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.05.003>
- [62] Ko, Y., Song, B., & Oh, Y. (2019). Mathematical Analysis of Environmental Effects of Forming a Platoon of Smart Vehicles. *Sustainability*, 11(3), 571. <https://doi.org/10.3390/su11030571>
- [63] Kloostera, B., & Roorda, M. J. (2019). Fully autonomous vehicles: analyzing transportation network performance and operating scenarios in the Greater Toronto Area, Canada. *Transportation Planning and Technology*, 42(2), 99-112. <https://doi.org/10.1080/03081060.2019.1565159>
- [64] Saeednia, M., & Menendez, M. (2017). A Consensus-Based Algorithm for Truck Platooning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(2), 404-415. <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2579260>
- [65] Hevelke, A., & Nida-Rümelin, J. (2014). Responsibility for Crashes of Autonomous Vehicles: An Ethical Analysis. *Science and Engineering Ethics*, 21(3), 619-630. <https://doi.org/10.1007/s11948-014-9565-5>
- [66] Volpe National Transportation Systems Center (2014), AVs Symposium 2014.
- [67] Anderson, J., Kalra, N., Stanley, K., Sorensen, P., Samaras, C., & Oluwatola, O. (2016). *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers*. <https://doi.org/10.7249/RR443-2>
- [68] United Nations (2015), World Population Ageing UN 2015.
- [69] *Average Vehicle Occupancy Factors for Computing Travel Time Reliability Measures and Total Peak Hour Excessive Delay Metrics (April 2018)*. (s. d.). 8.

- [70] McKinsey&Company (2016), An integrated perspective on the future of mobility.
- [71] Foldes, D., & Csiszar, C. (2018). Framework for planning the mobility service based on autonomous vehicles. *2018 Smart City Symposium Prague (SCSP)*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/SCSP.2018.8402651>
- [72] Meyer, J., Becker, H., Bösch, P. M., & Axhausen, K. W. (2017). Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities? *Research in Transportation Economics*, 62, 80-91.
<https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.03.005>
- [73] Gelauff, G., Ossokina, I., & Teulings, C. (2019). Spatial and welfare effects of automated driving: Will cities grow, decline or both? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 121, 277-294. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.01.013>
- [74] Mounce, R., & Nelson, J. D. (2019). On the potential for one-way electric vehicle car-sharing in future mobility systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 120, 17-30.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.12.003>
- [75] Heinrichs, D. (2016). Autonomous Driving and Urban Land Use. In M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, & H. Winner (Éd.), *Autonomous Driving* (p. 213-231). https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8_11
- [76] Zakharenko, R. (2016). Self-driving cars will change cities. *Regional Science and Urban Economics*, 61, 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2016.09.003>
- [77] Zhang, W., Guhathakurta, S., Fang, J., & Zhang, G. (2015). Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach. *Sustainable Cities and Society*, 19, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.006>
- [78] Loeb, B., & Kockelman, K. M. (2019). Fleet performance and cost evaluation of a shared autonomous electric vehicle (SAEV) fleet: A case study for Austin, Texas. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 121, 374-385. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.01.025>
- [79] Laird, J. J., & Venables, A. J. (2017). Transport investment and economic performance: A framework for project appraisal. *Transport Policy*, 56, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.02.006>
- [80] Teulings, C. N., Ossokina, I. V., & de Groot, H. L. F. (2018). Land use, worker heterogeneity and welfare benefits of public goods. *Journal of Urban Economics*, 103, 67-82.
<https://doi.org/10.1016/j.jue.2017.10.004>
- [81] *Qu'est-ce que la COP21 ?* Agence Parisienne du Climat, 04 décembre 2018, <https://www.apc-paris.com/cop-21> (consulté le 04 juin 2019)
- [82] Mersky, A. C., & Samaras, C. (2016). Fuel economy testing of autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 65, 31-48.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.001>
- [83] Toglaw, S., Aloqaily, M., & Alkheir, A. A. (2018). Connected, Autonomous and Electric Vehicles: The Optimum Value for a Successful Business Model. *2018 Fifth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security*, 303-308.
<https://doi.org/10.1109/IoTSMMS.2018.8554391>



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

www.kheops.ca