



**Centre de
recherches routières**
Ensemble pour des routes durables

Connected & Autonomous Vehicles et infrastructure routière

Etat des lieux et prospective



Synthèse

SF 51

Centre de compétence impartial depuis 1952, le CRR (Centre de recherches routières) est au service de l'ensemble du secteur routier. L'innovation durable est le fil conducteur de toutes ses activités. Le CRR partage ses connaissances avec les professionnels du secteur notamment par la voie de ses publications (codes de bonne pratique, synthèses, comptes rendus de recherche, méthodes de mesure, fiches d'information CRR, Bulletins CRR et Dossiers, rapports d'activité). Nos publications sont largement diffusées en Belgique et à l'étranger auprès de centres de recherche scientifique, d'universités, d'institutions publiques et d'instituts internationaux. Pour plus d'informations sur nos publications et activités, visitez notre site web www.crr.be

Synthèse SF 51

Connected & Autonomous Vehicles et infrastructure routière

Etat des lieux et prospective

Centre de recherches routières

Etablissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947

Bruxelles

2020

Auteurs

Kris Redant
Hinko van Geelen

Clause de non-responsabilité

Le présent texte est basé sur diverses sources externes et sur des commentaires et réactions des membres du groupe de travail. Dans certains cas, il est fait usage ou référence aux connaissances existantes ou à l'expérience acquise au cours des projets pilotes. De nombreuses thèses ne sont que le reflet d'attentes ou d'estimations fondées sur les connaissances des membres du groupe de travail et sur d'autres documents. Dans l'état actuel de la science, il n'existe aujourd'hui aucune preuve concluante de ces hypothèses. Quoi qu'il en soit, il faudra attendre de voir comment la technologie des véhicules autonomes va évoluer et quel sera l'impact sur l'organisation des transports en général et sur l'infrastructure en particulier. Par conséquent, ni les membres du groupe de travail ni le CRR ne peuvent en aucun cas être tenus responsables des décisions prises sur la base de ce texte.

Remerciements

Nous remercions tout particulièrement les participants réguliers aux discussions captivantes:

Wanda Debauche (CRR), Johan De Mol (UGent), Ertan Dzambaz (CRR), Jean-François Gaillet (VIAS), Simon Gianordoli (ERF, Routes de France), Vincent Helmus (SPW), Liessa Iliens (MOW), Gauthier Michaux (SPW), Sven Neckebroek (Bruxelles Mobilité), Christophe Nicodème (ERF), Rik Nuyttens (3M), Kris Redant (CRR), Kristof Rombaut (AWV), Koen Schietecatte (De Lijn), Steven Soens (Febiac), Philippe Vandewauwer (STIB), Hinko van Geelen (CRR), Lieselot Vanhaverbeke (VUB), An Volckaert (CRR), Dagmara Wrzesinska (VIAS).

Avis au lecteur

Cette publication est une synthèse de nombreux ouvrages de référence et contient des citations des sources consultées; pour certaines d'entre elles, une propre traduction a été donnée. Le CRR et les personnes qui ont contribué à cette publication ne peuvent en aucun cas être tenus pour responsables des informations recueillies et fournies, qui le sont à titre purement documentaire et non contractuel.

Connected & Autonomous Vehicles et infrastructure routière / Centre de recherches routières. – Bruxelles: CRR, 2020. 104 p. – (Synthèse; SF 51).

Dépôt légal: D/2020/0690/11

Éditeur responsable : A. De Swaef, Boulevard de la Woluwe 42 – 1200 Bruxelles

Couverture: Blue Planet Studio, s.d.

© CRR – Tous droits réservés.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Contexte des CAV	3
2.1	Description des CAV	3
2.1.1	Connectés, autonomes	3
2.1.2	Automatisés	4
2.1.3	<i>Advanced Drivers Assistance Systems</i> (ADAS)	5
2.1.4	Conducteur	6
2.1.5	Applications CAV	7
2.2	Objectifs	8
2.2.1	Prospérité économique	9
2.2.2	Sécurité routière	10
2.2.3	Congestion	12
2.2.4	Mobilité	14
2.2.5	Occupation de l'espace	14
2.2.6	Efficacité énergétique et respect de l'environnement	15
2.2.7	Capacité de la route	17
2.3	Niveaux SAE	19
2.3.1	Système de classification	19
2.3.2	Niveaux SAE et infrastructure routière	20
2.4	Déploiement des CAV & obstacles	21
2.4.1	Infrastructure routière	21
2.4.2	Obstacles divers	21
2.4.3	Prospective	23
2.4.4	Cybersécurité	24
2.5	Véhicules autonomes pour applications limitées	25
2.6	Mélange de véhicules de différents niveaux SAE	25
2.7	Réglementation	26
	Directive STI européenne	26
	Protocoles de communication	27
	Stratégie pour les services C-ITS	27
	Réglementation belge	28
3	Les CAV et l'infrastructure	29
3.1	Infrastructure physique et infrastructure numérique	30
3.2	Autoroutes	30
3.2.1	Projets de directive	31
	Tracé de la route (horizontal + vertical)	31
	Largeur et occupation des voies	33
	Voies d'insertion et de sortie / voies d'entrecroisement	34
	Bande d'arrêt d'urgence / emplacements d'arrêt d'urgence / voie d'intervention	35
	Profil transversal	35
	Convois de poids lourds	36
3.2.2	Influence des véhicules autonomes sur la structure de la chaussée	37
	Occupation / structure de la route	37
	Qualité du revêtement routier	38
	Capteurs dans la structure routière	38

3.2.3	Equipement routier	38
	Visibilité et harmonisation des marquages routiers et panneaux de signalisation	38
	Dispositifs de retenue	39
	Panneaux à Messages Variables (PMV)	40
3.3	Les routes en environnement urbain	40
3.3.1	Défi dans un contexte urbain	41
3.3.2	Rôles et intérêts	42
3.3.3	Micro-mobilité émergente	43
3.3.4	Systèmes partagés	43
3.3.5	Ecologisation du transport	45
3.3.6	Adaptation des limitations de vitesse	47
3.3.7	Infrastructure et services numériques	49
3.3.8	Mobilité lente et accessibilité	51
3.3.9	Diversification des services de transports en commun	52
3.3.10	Livraison de marchandises	52
3.4	Navettes	53
3.4.1	Champ d'application	53
3.4.2	Essais	54
3.4.3	Développements	55
3.4.4	Infrastructure	56
4	Conclusion	57
4.1	Introduction	57
4.2	(In)certitude et complexité	58
4.2.1	Prospective et gestion des risques	59
4.2.2	La recherche au service de l'expérimentation	59
4.3	Evolutions sociales / politique	61
4.3.1	Analyse politique et évaluations de projets	62
4.3.2	Société	62
4.4	Infrastructure routière	63
4.4.1	Signalisation	64
4.4.2	Tracé et répartition de la route	65
4.4.3	Structure routière	66
4.4.4	Revêtement routier	66
5	Informations générales	69
5.1	Réglementation pertinente	69
5.1.1	Europe	69
5.1.2	Belgique	69
5.2	Définitions / abréviations	72
5.3	Essais: sites d'essai et <i>Living Labs</i> (UE)	75
5.3.1	Belgique	75
5.3.2	A l'échelle mondiale (aperçu)	75
5.3.3	Europe	76
5.3.4	Projets	77
6	Bibliographie	79
7	Membres du groupe de travail	97

Liste des figures

2.1	<i>Levels of automated driving</i> (European Automobile Manufacturers Association [ACEA], 2019, p. 2)	5
2.2	<i>New safety features in your car</i> (European Commission [EC], s.d.)	6
2.3	Avantages des véhicules autonomes dans l'UE selon l'EPRS/Commission européenne («Véhicules autonomes dans l'UE», 2019)	9
2.4	Comparaison des coûts des différents modes avec et sans technologie automobile autonome (Bösch et al., 2018)	13
2.5	Evolution de la masse des voitures nouvellement vendues (Frederik, 2020)	16
2.6	Relation entre l'intensité, la densité et la vitesse («Fundamentele relatie», 2020)	17
2.7	Voies réservées aux véhicules autonomes (Albricht, 2017)	18
2.8	Système de classification SAE (SAE International releases updated visual chart, 2018)	19
2.9	Illustration niveau 3 SAE (Metamorworks, s.d.)	19
2.10	Niveau d'automatisation, EPRS/Commission européenne («Véhicules autonomes dans l'UE», 2019)	23
2.11	<i>Amara's law. tech bubble?</i> (Kerner, 2016)	24
2.12	Des risques de l'accès direct aux données des véhicules («What are the risks», s.d.)	24
3.1	Déplacements variés (Gabriel12, s.d.)	41
3.2	Relation entre vitesse, accélération et consommation de carburant (Nasir, Noor, Kalam & Masum, 2014)	48
3.3	Relation entre vitesse et bruit du véhicule (bruit de roulement et bruit du moteur) (Amundsen & Klæboe, 2005)	48
3.4	Essai avec la navette autonome (Institut VIAS, 2018)	55
4.1	Réalisation de la publication «Les CAV et l'infrastructure routière – état des lieux et prospective»	58
4.2	Essai avec une navette autonome dans la zone piétonne de la ville de Masdar, Abou Dabi, 10 octobre 2019	60
4.3	Panneau d'avertissement en trois langues utilisé lors de l'essai de la navette autonome à Neder-over-Heembeek, 12 février 2020	60
4.4	Exemple de niveaux ISAD attribués à un réseau routier (Inframix, 2017)	61
4.5	Les défauts de surface peuvent entraver le fonctionnement des véhicules autonomes	67
5.1	Coupe de la Progress map des initiatives en matière de transports en commun autonomes (UITP, s.d.)	76
5.2	Test de la navette autonome sur le Brussels Health Campus (Vrije Universiteit Brussel [VUB], 2019)	77

Liste des tableaux

2.1	Quelques systèmes ADAS très fréquents	5
2.2	Convention de Genève (Geneva Convention on Road Traffic, 1949), définition d'un conducteur	7
2.3	Scénarios de développement des véhicules autonomes dans trois domaines d'application, en Suisse	26
2.4	<i>Day 1 services</i> pour services C-ITS, Commission européenne	28
2.5	<i>Day 1,5 services</i> pour services C-ITS, Commission européenne	28
3.1	KPI for fleet size and vehicle kilometres in MaaS system, Oslo study, PTV Group, April 2019 (COWI & PTV Group, 2019)	45
4.1	Quelques facteurs déterminants pour l'Operational Design Domain	61
5.1	Réglementation pertinente (Europe)	70
5.2	Réglementation pertinente (nationale)	71
5.3	Abréviations	74

Chapitre 1

Introduction

Les **développements technologiques** autour des véhicules connectés et autonomes (CAV, *connected & autonomous vehicles*) vont à la vitesse de l'éclair. Toutes les parties concernées sont-elles prêtes pour une introduction réussie et sûre? Comment des véhicules avec un **degré d'autonomie différent** peuvent-ils utiliser ensemble, en toute sécurité, l'**infrastructure routière disponible**?¹

La **composante infrastructure** joue un rôle dans les développements des CAV. Cependant, dans de très nombreux domaines, on ne sait pas **exactement** jusqu'où va le rôle de l'infrastructure **routière**. Les questions sous-jacentes qui se posent ici:

- Quelles sont les conséquences des CAV sur l'infrastructure routière existante?
- Quelles opportunités les CAV offrent-ils pour l'infrastructure routière existante?
- Dans quel délai l'infrastructure routière doit-elle être développée?
- Quelle distinction, liée à l'infrastructure routière, doit être faite entre les véhicules connectés et les véhicules autonomes?
- Quelles sont les adaptations nécessaires pour obtenir un mélange sûr de CAV et d'autres véhicules (non CAV)?
- Qu'est-ce qui est clair et qu'est-ce qui est encore incertain?
- Lors de la conception et de la construction d'infrastructures routières aujourd'hui, y a-t-il des recommandations ou des points d'attention qui simplifient le déploiement des véhicules automatisés à l'avenir?

En étudiant ces sous-questions dans un **groupe de travail** piloté par le CRR avec des membres externes, le CRR souhaite étudier les développements entourant les CAV et le rôle de la composante infrastructure².

Le **présent rapport** donne un aperçu des conséquences possibles pour l'infrastructure routière et les autorités routières. Il est le fruit d'une étude bibliographique effectuée par le CRR et de discussions passionnantes sur des thèmes pertinents avec les membres actifs du groupe de travail: «autoroutes», «*urban mobility*» et «navettes».

Le rapport entre réellement dans le vif du sujet au **chapitre 2** avec un certain nombre de sujets contextuels:

- 2.1 Description des CAV
- 2.2 Objectifs
- 2.3 Niveaux SAE
- 2.4 Déploiement des CAV et obstacles

Le **chapitre 3** aborde ensuite concrètement le lien entre les CAV et l'infrastructure. Les thèmes sur lesquels des informations suffisantes ont été trouvées ont été développés au sein du groupe de travail. Il s'agit des thèmes suivants:³

- 3.1 Infrastructure physique et infrastructure numérique
- 3.2 Autoroutes
- 3.3 Les routes en environnement urbain (*Urban Mobility*)
- 3.4 Navettes

1

Niveaux SAE:
 SAE L0 = No automation,
 SAE L1 = Driver assistance,
 SAE L2 = Partial automation,
 SAE L3 = Conditional automation,
 SAE L4 = High automation,
 SAE L5 = Full automation.
 Voir § 2.3 Niveaux SAE.

2

L'étude a été financée par les fonds propres du CRR. Le Comité du Programme du CRR soutient cette initiative. Voir <https://brrc.be/fr/a-propos-du-crr>.

3

Au moment de la rédaction de ce rapport, les informations sur les routes hors agglomération (à l'exception des autoroutes) étaient insuffisantes.

Nous donnons un aperçu des principaux points de notre travail de recherche au **chapitre 4**. Ce chapitre contient également les conclusions sur les conséquences possibles pour l'infrastructure routière et les autorités routières. Ces conclusions sont susceptibles de s'appliquer plusieurs années après la publication du présent rapport. Nous nous intéressons aussi bien à la **vision plus globale** qu'aux mesures **no regret** dans le domaine de l'infrastructure routière. Structure du chapitre:

- 4.1 Introduction
- 4.2 (In)certitude et complexité
- 4.3 Evolutions sociales et politique
- 4.4 Infrastructure routière

Le **chapitre 5** fournit des informations générales, notamment un aperçu de la réglementation, des sites d'essai européens et des *Living Labs*, ainsi que des définitions et des abréviations.

Chapitre 2

Contexte des CAV

2.1 Description des CAV

2.1.1 Connectés, autonomes

Dans notre groupe de travail, nous utilisons «CAV», un terme court, mais fort, pour *connected & autonomous vehicles*. En français, cela se traduit par «**véhicules connectés et autonomes**». Il s'agit d'un terme collectif désignant les véhicules qui aident partiellement ou complètement le conducteur à effectuer sa tâche de conduite sur la route⁴.

Un **véhicule connecté** peut être décrit comme un véhicule doté d'une technologie qui lui permet de communiquer et d'échanger sans fil des informations avec d'autres véhicules, infrastructures, d'autres dispositifs à l'extérieur du véhicule et des réseaux externes (Society of Motor Manufacture and Traders [SMMT], 2017). Il est possible «d'updater» des véhicules connectés si, par exemple, le logiciel doit être mis à jour ou que de nouvelles règles doivent être mises en œuvre (Harari, 2018). Les véhicules connectés ne sont pas nécessairement autonomes⁵.

Un **véhicule autonome** est un véhicule qui peut se conduire sans intervention humaine. Différents termes alternatifs sont utilisés: voiture autonome, *robot car*, voiture sans conducteur. D'un point de vue technologique, les véhicules autonomes sont équipés de toutes sortes de capteurs qui permettent de connaître la position du véhicule sur la route et de reconnaître l'environnement immédiat de la route.

Le **degré d'autonomie** est indiqué par défaut par le niveau SAE⁶, un système de classification développé par l'organisation SAE International (un organisme de normalisation dans l'industrie automobile).

Les grands progrès en termes de sécurité, de mobilité, d'émissions, etc. sont attendus quand les véhicules autonomes seront également connectés à d'autres véhicules et à l'infrastructure routière⁷. Les systèmes d'aide à la conduite (ADAS) dans les véhicules autonomes peuvent contribuer à prévenir les erreurs humaines et, dans certains cas, à en réduire la gravité. Les gestionnaires d'infrastructures peuvent contribuer à ce progrès en fournissant des infrastructures connectées et en permettant aux véhicules, aux infrastructures et aux autres systèmes d'échanger des informations.

Pour les constructeurs automobiles, les véhicules connectés et autonomes ne sont pas une fin en soi. Ils veulent en premier lieu développer des véhicules plus sûrs et plus propres. Outre les constructeurs automobiles classiques, de nombreuses entreprises technologiques s'impliquent également beaucoup dans le développement de la technologie pour les véhicules autonomes.

Les développements sur les véhicules connectés et autonomes sont pour l'instant **deux développements parallèles**. Les informations que les véhicules reçoivent aujourd'hui (généralement par le biais de capteurs) servent principalement à informer et à encourager le conducteur humain à se comporter d'une certaine manière, mais ne sont pas utilisées actuellement, ou seulement dans une mesure limitée, pour intervenir activement dans le comportement du véhicule. Dans le cas de véhicules autonomes,

⁴ La notion de «sur la route» est importante pour le groupe de travail. Les véhicules autonomes qui peuvent décoller et atterrir verticalement ou les embarcations autonomes ne sont pas inclus dans la réflexion.

⁵ § 3.3.7 Infrastructure et services numériques.

⁶ § 2.3 Niveaux SAE.

⁷ Règlement CEE/ONU n°79 (2008) (introduction) jusqu'à présent, ne permet toutefois pas que le pilotage d'un véhicule se base sur des signaux provenant de l'extérieur du véhicule. Selon la Convention de Genève (art. 4) (Convention de Genève sur la circulation routière, 1949), le terme conducteur désigne une personne.

cependant, il est possible d'intervenir sur le comportement du véhicule en fonction des situations détectées par le véhicule lui-même ou – dans le cas de véhicules connectés – en fonction des informations que le véhicule reçoit de sources extérieures.

Pour les **gestionnaires routiers européens** (CEDR), l'accent est mis davantage sur les véhicules connectés. Les informations que ces véhicules enregistrent et – via leur connectivité – peuvent transmettre, sont susceptibles de fournir aux gestionnaires routiers des informations intéressantes sur l'état de l'infrastructure et leur permettre de mieux planifier les interventions et l'entretien ou d'organiser la gestion du trafic à l'aide d'informations en temps réel. Les véhicules autonomes offrent non seulement des **opportunités** (sécurité routière, mobilité), mais entraînent aussi des **risques** (complexité, aspects légaux)⁸.

8
§ 2.2 Objectifs.

En outre, en ce qui concerne les CAV, on peut dire:

- qu'un CAV peut avoir n'importe quel type de motorisation (moteurs thermiques, électriques, à hydrogène, etc.);
- qu'un CAV peut être soit un véhicule privé, soit un véhicule partagé, ou un moyen de transports en commun;
- qu'un CAV peut être un véhicule pour le transport de personnes ou de marchandises. Il s'agit de véhicules de tailles différentes.

Les piétons, les cyclistes connectés et la micro-mobilité (trottinettes et autres) ne sont **pas directement concernés** par notre rapport sur les CAV. Ces modes peuvent également être connectés à un stade ultérieur et devenir détectables pour les infrastructures et les autres usagers de la route.

2.1.2 Automatisés

Le **code de bonnes pratiques** du SPF Mobilité et Transports, intitulé «Véhicules autonomes, code de bonnes pratiques d'expérimentation en Belgique», définit un **véhicule automatisé** et un **véhicule complètement automatisé**⁹ (Service public fédéral Mobilité et Transports [SPF Mobilité et Transports], 2016b). Ces définitions se réfèrent à la réglementation de la CEE-ONU (Règlement n° 79 CEE-ONU, 2008).

9
§ 5.3 Essais: sites d'essai et Living Labs (UE).

Le code de bonnes pratiques fournit des **lignes directrices** aux organisations qui souhaitent effectuer des essais avec des technologies pour les systèmes d'aide à la conduite et les véhicules automatisés sur la voie publique ou dans d'autres lieux publics en Belgique.

Un **véhicule automatisé** est un véhicule dans lequel un conducteur doit être assis, prêt à reprendre le contrôle à tout moment. Toutefois, dans certaines situations, le véhicule peut offrir un «mode automatique» de sorte que le conducteur n'a pas besoin de participer à la conduite et peut éventuellement effectuer d'autres tâches.

Un **véhicule complètement automatisé** est un véhicule dans lequel un conducteur n'est plus nécessaire. Le véhicule est conçu de manière à pouvoir entreprendre un voyage en toute sécurité sans l'intervention d'un conducteur, dans toutes les conditions de circulation, de route et de météo dans lesquelles un conducteur humain qualifié peut conduire un véhicule¹⁰.

10
L'UNECE WP Automated/ Autonomous and Connected Vehicles (GRVA) travaille sur des exigences fonctionnelles et des méthodes d'évaluation pour ces nouvelles technologies dans les véhicules.

L'ACEA (*European Automobile Manufacturers Association*) fait la distinction entre la conduite assistée (*assisted driving*), la conduite automatisée (*automated driving*) et la conduite autonome (*autonomous driving*). La figure suivante illustre les différences:



Figure 2.1 – Levels of automated driving (European Automobile Manufacturers Association [ACEA], 2019, p. 2)

Différents termes sont donc utilisés pour la même idée. Toutefois, il existe un **dénominateur commun**, indiquant le niveau de conduite automatisée des véhicules sur les routes: les niveaux SAE de SAE International¹¹.

11

§ 2.3 Niveaux SAE.

2.1.3 Advanced Drivers Assistance Systems (ADAS)

La recherche et le développement de l'industrie automobile en faveur de véhicules plus sûrs se concentrent sur l'assistance au conducteur pendant la conduite de son véhicule. Les systèmes d'assistance peuvent ensuite être repris par le régulateur. Les systèmes de sécurité qui s'avèrent efficaces seront soumis à des exigences fonctionnelles minimales harmonisées et, avec le temps, seront également rendus obligatoires en vertu des règlements d'homologation des véhicules.

La liste des systèmes est longue et différentes dénominations sont utilisées pour le même type de systèmes. Quelques-uns des systèmes les plus connus:

ABS	<i>Anti-lock Braking System</i>	Système qui empêche les roues de se bloquer en cas de freinage brusque
AEBS	<i>Advanced Emergency Braking System</i>	Système capable de détecter une éventuelle collision frontale et d'activer le système de freinage du véhicule pour le faire décélérer dans le but de prévenir ou de limiter une collision
ACC ¹²	<i>Adaptive Cruise Control</i>	Système qui contrôle la vitesse et la distance de suivi par rapport au véhicule qui précède
DAS	<i>Driver Alert Systems</i>	Système qui détecte les signes de somnolence ou de diminution de l'attention du conducteur
ISA	<i>Intelligent Speed Adaptation</i>	Système qui garantit que la vitesse du véhicule ne dépasse pas une vitesse de sécurité ou légalement autorisée
LDWS ¹³	<i>Lane Departure Warning System</i>	Système qui avertit le conducteur lorsque le véhicule commence à quitter sa bande de circulation
	<i>Park Assist</i>	Système d'aide au stationnement/de recherche de places de stationnement libres

12

Le terme *Advanced Cruise Control* est également utilisé.

13

Egalement utilisé: *Lane Keeping Assistance (LKA)*; *Lane Departure Warning (LDW)*.

Tableau 2.1 – Quelques systèmes ADAS très fréquents

Tous ces systèmes visent à aider le conducteur humain dans sa tâche de conduite ou à détecter et surmonter des situations potentiellement dangereuses. Bien que certains de ces systèmes puissent, dans certaines circonstances, reprendre la tâche de conduite du conducteur, la responsabilité de la conduite incombe encore aujourd'hui entièrement au conducteur (humain).

14 ► Règlement (UE) 2019/2144 (2019) concernant les prescriptions pour l'homologation des véhicules à moteur, de leurs remorques et des systèmes, composants et unités techniques distinctes destinées à ces véhicules en ce qui concerne leur sécurité générale et la protection des occupants des véhicules et des usagers vulnérables de la route.

Le Règlement européen 2019/2144¹⁴ entrera en vigueur dans le courant de l'année 2022. Conformément à ce règlement, à partir de cette date, les nouveaux véhicules doivent obligatoirement être équipés d'un certain nombre de systèmes avancés (notamment l'ISA, l'enregistreur de données d'incident, l'avertisseur de fatigue, etc.).



Figure 2.2 – New safety features in your car (European Commission [EC], s.d.)

2.1.4 Conducteur

Avec ADAS, on parle d'assistance au conducteur humain. Quand on parle de véhicules autonomes, est-il encore question de conducteur?

La Convention de Genève (Geneva Convention on Road Traffic, 1949) donne une définition de **conducteur**, et dans certains articles indique un certain nombre de tâches importantes pour les conducteurs.

Les règles de circulation d'origine internationale ont été conçues à l'origine pour des voitures avec conducteur. Les voitures autonomes n'ont pas de conducteur mais ont des passagers ou des utilisateurs. Cela signifie donc que les **traités internationaux doivent être adaptés** (Vellinga & Vellinga, 2015).

article 4	Conducteur: désigne toutes personnes qui assument la direction de véhicules, y compris les cycles, guident des animaux de trait, de charge, de selle, des troupeaux sur une route, ou qui en ont la maîtrise effective.
article 7	Tous les conducteurs, piétons et autres usagers de la route doivent se comporter de façon à ne pas constituer un danger ou une gêne pour la circulation. Ils doivent éviter de causer un dommage aux personnes ou aux propriétés publiques ou privées.
article 8.1	Tout véhicule ou ensemble de véhicules couplés marchant isolément doit avoir un conducteur.
article 8.5	Les conducteurs doivent constamment avoir le contrôle de leur véhicule ou pouvoir guider leurs animaux. Ils doivent prendre toutes précautions utiles pour la sécurité d'autres usagers lorsqu'ils s'en approchent.
article 10	Tout conducteur de véhicules doit rester constamment maître de sa vitesse et conduire d'une manière raisonnable et prudente. Il doit ralentir ou s'arrêter toutes les fois que les circonstances l'exigent, notamment lorsque la visibilité n'est pas bonne.

Tableau 2.2 – Convention de Genève (Geneva Convention on Road Traffic, 1949), définition d'un conducteur

2.1.5 Applications CAV

Les systèmes d'un CAV sont destinés à une **multitude d'applications**. La fin des possibilités dans le domaine de l'info-divertissement, de la sécurité, des diagnostics, de la navigation et des services de paiement ne semble pas encore en vue. Les informations et les services sont en plein développement.

Avec la **Directive 2010/40/UE** (2010), également appelée Directive-cadre européenne sur les STI (systèmes de transport intelligents), l'Europe définit un certain nombre de domaines prioritaires et d'actions sous-jacentes auxquels devraient contribuer les Systèmes de transport Intelligents (p.ex. les services européens d'information sur les voyages multimodaux, les informations en temps réel sur le trafic, les informations sur le trafic pertinentes pour la sécurité routière, etc.). Dans la suite du développement des spécifications, des applications et des services, l'un des principes est que les caractéristiques des infrastructures nationales existantes doivent être prises en compte.

Au sein du **groupe de travail CAV du CRR**, l'objectif n'est cependant pas de prêter une grande attention à tous les systèmes et services qui peuvent être reliés à un véhicule connecté. Il s'agit plutôt de l'interaction entre les véhicules automatisés et l'**infrastructure routière physique** ainsi que de toute modification utile de cette infrastructure.

Selon toute probabilité, les CAV recevront une grande partie des informations sur l'infrastructure physique par le biais de systèmes numériques. Il est important que ces systèmes numériques (**infrastructure numérique**) reflètent correctement la réalité physique (tracé de la route, règles de circulation en vigueur, autres informations). Le Règlement délégué (UE) 2015/962 (2015) décrit les informations (en termes d'infrastructures et d'informations sur le trafic) qui doivent être mises à disposition sous forme numérique et les exigences relatives à la mise à jour de ces informations. Lors de la conception, de la construction et de l'entretien des routes et des équipements routiers, cela deviendra un point d'attention important (mise à jour de ce qu'on appelle les données statiques des routes).

Ce rapport se concentre sur les véhicules particuliers et publics. Il peut s'agir de véhicules en propriété individuelle ou partagée, et de véhicules offrant un service de taxi ou de bus (comme les navettes testées en Belgique et à l'étranger). Outre le transport de personnes, nous prêtons également attention au transport de marchandises.

2.2 Objectifs

Pour les constructeurs automobiles, les véhicules autonomes ne sont pas une fin en soi. La recherche et les développements sur les véhicules autonomes sont principalement motivés par un objectif de véhicules **zéro incident** et **zéro émission**. Parce que l'analyse des accidents de la route montre que le conducteur est un facteur important, de nombreux développements sont axés sur des systèmes qui simplifient ou prennent en charge (une partie) des tâches du conducteur. Dans la perspective la plus large, cela conduit en effet à des véhicules fonctionnant sans intervention humaine (SAE L4 et SAE L5)¹⁵.

§ 2.3 Niveaux SAE.

L'Union européenne souhaite devenir un leader mondial dans le déploiement de systèmes sûrs pour le transport automatisé, en renforçant la sécurité routière et l'efficacité du trafic routier, en luttant contre les encombrements du trafic, en réduisant la consommation d'énergie et les émissions produites par les transports et en éliminant progressivement les combustibles fossiles (Résolution du Parlement européen du 15 janvier 2019, 2019).

Voici les grandes lignes des objectifs dans le domaine des CAV. Grâce à une brève étude bibliographique, ces objectifs peuvent être affinés en **moteurs**:

- prospérité économique;
- sécurité routière;
- congestion;
- mobilité;
- occupation de l'espace;
- efficacité énergétique et respect de l'environnement;
- capacité de la route.

Pour comprendre les raisons pour lesquelles des véhicules connectés et autonomes sont autorisés à circuler sur la voie publique, il est utile d'identifier le lien entre les CAV et l'infrastructure routière. La **faisabilité** des objectifs et des moteurs dépend fortement de la politique définie, de la concertation et de la collaboration entre les différents acteurs concernés, et de choix clairs qui tiennent compte des souhaits et des besoins de la société.

La promesse d'une meilleure mobilité, d'une occupation moindre de l'espace et d'une efficacité énergétique n'est pas seulement liée aux développements technologiques, mais dépend également des **choix sociétaux** (par exemple, la promotion des véhicules partagés, des transports en commun performants, des scénarios de disparition des véhicules à combustibles fossiles et la disponibilité d'une électricité «propre» en suffisance) (Morlion, 2018).



Figure 2.3 – Avantages des véhicules autonomes dans l'UE selon l'EPRS/Commission européenne («Véhicules autonomes dans l'UE», 2019)

2.2.1 Prospérité économique

L'UE considère qu'il est essentiel pour l'industrie européenne que des opportunités numériques en termes d'innovations technologiques (internet des objets, 5G, *cloud computing*, analyse de données, robotique) soient exploitées rapidement et au maximum de leur capacité. Cela doit garantir que l'Europe reste compétitive pour la prospérité générale à moyen et long terme. L'UE a identifié les CAV comme un sujet prioritaire pour accroître la **compétitivité** de l'industrie européenne (Commission Européenne [CE], 2016a)¹⁶.

Les états membres voient le potentiel des véhicules autonomes et en estiment les avantages économiques et sociaux. Par exemple, au Royaume-Uni, ancien état membre, la SMMT (*The Society of Motor Manufacturers and Traders Limited*) s'attend à ce que les développements dans le domaine des véhicules autonomes génèrent un grand nombre de **nouveaux emplois** d'ici 2030 (320 000 nouveaux emplois, dont 25 000 dans la production de véhicules). Entre 2014 et 2030, ils prévoient que les CAV contribueront également à réduire de 2 500 le nombre de **victimes de la route** et de 25 000 le nombre de **accidents graves**. Ces personnes ne sont alors pas retirées du marché du travail (SMMT, 2017).

L'**industrie automobile** aussi voit un énorme potentiel dans la voiture autonome. En chiffres absolus, l'industrie automobile est une industrie à fort investissement. La répartition de ces investissements varie d'un continent ou d'un pays à l'autre, certains continents ou pays adoptant une approche énergique et consentant des

16

La Commission européenne parle de «concurrentialité». Cela signifie que l'UE reste compétitive, prend ou maintient une position de leader et reste au sommet dans le domaine R&D.

investissements importants dans le développement de véhicules autonomes. Dans d'autres pays, les priorités sont différentes. A titre d'illustration, selon le *Verband der Automobilindustrie* (Allemagne), l'industrie automobile allemande investira au cours de la période 2019-2022 environ 18 milliards d'euros dans la numérisation, la connectivité et la technologie des véhicules autonomes, tandis que 40 milliards d'euros seront investis dans le développement des véhicules à propulsion électrique sur la même période (Redactie Automobiël Management, 2019b).

En outre, des entreprises (en dehors du secteur des taxis) voient un grand avenir pour les **taxis robots**, qui ne nécessiteraient plus la présence d'un chauffeur. Le secteur des taxis traditionnels se voit confronté à une nouvelle concurrence. Des organisations comme Uber et Lyft investissent beaucoup d'argent dans le développement. Cependant, selon une étude américaine, la rentabilité des taxis robots par rapport aux taxis traditionnels est encore sujette à caution (Van Wijngaarden, 2019b).

Tout aussi importante, la **valeur économique du temps de conduite** peut changer avec l'introduction des CAV. Le temps de trajet en tant que passager d'un CAV peut être utilisé différemment et peut-être de façon plus agréable ou plus économique que le temps de trajet en tant que conducteur. Les gens seront probablement moins gênés par des longs trajets, ce qui peut entraîner des distances de déplacement plus longues (Leeb, 2019).

2.2.2 Sécurité routière

Les experts en sécurité routière s'attendent à ce que le nombre d'accidents de la route diminue considérablement si les véhicules autonomes déchargent le conducteur de toutes ses tâches. En se basant sur les données statistiques d'accidents, le **potentiel** est énorme: environ 90 % des accidents sont liés d'une manière ou d'une autre à un facteur humain (Treat et al., 1979). Cependant, certaines études mettent en garde contre des attentes trop positives (Dutch Safety Board, 2019; International Transport Forum [ITF], 2018; Robinson, Wallbank & Baig, 2017).

Pendant la période de transition, il y a deux défis à relever pour réaliser des gains effectifs en matière de sécurité routière:

- Premièrement, l'introduction de toutes sortes de systèmes avancés pour les véhicules modifie le rôle du conducteur et s'accompagne de nouveaux risques pour la sécurité qui sont pour l'instant trop peu connus (Dutch Safety Board, 2019). Des mesures d'accompagnement doivent permettre de faire face à ces risques.
- Deuxièmement, il existe une incertitude quant à la composition des véhicules du parc automobile (autonomes de divers niveaux SAE et non autonomes)¹⁷.

17 Il est certain que l'on parlera encore pendant des décennies d'un mélange, appelé «trafic mixte». Les estimations parlent de 30 à 40 ans, en raison de la longue durée de vie des camions et des véhicules militaires qui restent en service beaucoup plus longtemps (Conférence Européenne des Directeurs des Routes [CEDR], s.d.).

L'intention des améliorations par l'introduction de systèmes de véhicules avancés et de véhicules autonomes de niveaux d'automatisation plus élevés est évidemment positive: une nette amélioration de la sécurité. L'introduction de systèmes pour lesquels il existe des questions ou des préoccupations à cet égard peut être examinée.

Les éléments ayant un impact direct sur l'amélioration de la sécurité routière grâce aux CAV sont la capacité d'effectuer différentes tâches simultanément et le **temps de réaction** plus rapide du véhicule, qui permet au véhicule de ralentir, d'arrêter ou de changer de trajectoire plus rapidement.

Il devient également possible de s'assurer qu'un système d'assistance **intervienne** activement **sur la vitesse de conduite** pour éviter les vitesses inappropriées. Le

gestionnaire routier a un rôle important à jouer à cet égard: les informations sur la vitesse autorisée doivent être correctes et actualisées (cf. infrastructure numérique, panneaux de signalisation). Dans un scénario où tous les systèmes sont connectés, la vitesse maximale autorisée peut être adaptée dynamiquement aux circonstances (conditions météorologiques, incidents, densité du trafic, etc.). Cela peut contribuer à la crédibilité et à l'acceptation des limitations de vitesse.

Il peut également y avoir des effets qui contribuent **indirectement** à un système plus sûr en matière de sécurité routière. On peut par exemple penser aux véhicules capables de se garer eux-mêmes sur la base d'informations sur la disponibilité de places de parking. Il en résulte une diminution du trafic lié à la recherche d'une place de stationnement (impact direct), avec une vitesse de conduite plus constante (impact indirect).

Le potentiel en matière de sécurité routière est également lié au **niveau d'automatisation**. Certaines organisations ont encore des doutes raisonnables quant à la pleine réalisation des perspectives prometteuses en matière de sécurité. Le nombre d'accidents de la route résultant d'un comportement inapproprié peut diminuer. Toutefois, il existe également un risque que des conducteurs **normalement prudents** soient davantage impliqués dans des accidents, notamment lorsqu'ils doivent reprendre le contrôle du véhicule dans des situations d'urgence (ITF, 2018).

Des améliorations sur le plan de l'environnement, du confort et de la mobilité semblent être un moteur majeur pour les développements AD et STI, en combinaison avec les avantages purement économiques attendus qui y sont associés (Lindström et al., 2018). Par exemple, une étude menée aux Pays-Bas affirme que quatre groupes d'ADAS ont un potentiel substantiel de réduction des dommages: *Automatic Emergency Brake*, *Lane Change Assist/Blind Spot Monitoring*, *Lane Keep Assist* et *Park Assist*. Ensemble, dans un scénario réaliste, ils réduisent les dommages de 23 % (VMS/Insight, 2019).

Un aspect qui requiert une attention particulière est la capacité **à comprendre ou à estimer** le fonctionnement du véhicule autonome. Si le conducteur ne doit plus faire certaines choses lui-même, cela peut entraîner une diminution de prise de conscience de la situation (§ 2.4). C'est le cas lorsque le conducteur ne sait pas exactement de quoi le système est capable ou quand il doit encore intervenir lui-même («I-DREAMS-project», s.d.; Martens, 2014)¹⁸.

En particulier dans la situation transitoire où un véhicule autonome, en cas de problème, passe les commandes à un conducteur humain, il est possible que le conducteur humain ait besoin d'un certain temps pour évaluer correctement la situation de la circulation et se concentrer sur sa tâche de conduite. Jusqu'au niveau SAE 4, le conducteur reste responsable des tâches trop complexes pour que les systèmes avancés du véhicule puissent les traiter correctement. Combinée à une **expérience de conduite décroissante** (*de-skilling*), il y a une forte probabilité pour que la reprise d'une tâche de conduite par un conducteur humain ne soit pas effectuée assez rapidement ou correctement (ITF, 2018).

L'amélioration de la sécurité routière des **usagers** de la route vulnérables **actifs** est un aspect important de l'introduction des CAV.

- Les piétons, les cyclistes et les deux-roues motorisés restent pour l'instant des usagers de la route non automatisés. Dans le meilleur des cas, ils sont connectés (US Department of Transportation [DOT], s.d.)¹⁹.
- Sans une attention particulière, ils ne pourraient pas bénéficier directement ou dans la même mesure que les occupants de voitures et de camions de la technologie AD et ITS.

18

Diverses études sont en cours sur ce thème, par exemple:

- IMOB Hasselt a participé au projet européen Horizon 2020 I-Dreams. Ce projet met en place une plateforme pour définir, développer, tester et valider une *Safety Tolerance Zone* afin d'empêcher les conducteurs de s'approcher trop près des limites d'une opération dangereuse en réduisant les risques en temps réel et après le trajet.
- L'université de Twente compare plusieurs systèmes d'assistance via l'un des laboratoires de réalité virtuelle et un simulateur de conduite, et examine le côté conception de la conduite automatisée.
- TNO utilise un véhicule instrumenté, un simulateur de conduite, des vidéos et des observations pratiques pour mesurer le comportement humain. Ils examinent l'interaction entre l'automobiliste et la technologie embarquée, mais aussi la manière dont les autres personnes (comme les automobilistes, les cyclistes et les piétons) réagissent aux personnes dans une voiture qui se déplace (en partie) automatiquement.

19

Mais cela évolue également: les premiers essais avec des moteurs autonomes ont eu lieu. Voir www.youtube.com/watch?v=XMuMoZIVYqs (Alpha SQUAD official, 2018).

- Le *General Safety Regulation* révisé du Parlement européen et du Conseil européen indique que les VRU (*Vulnerable Road Users*) doivent être pris en compte et impose des normes minimales pour la reconnaissance des VRU (Règlement [UE] 2019/2144, 2019).
- Il est préférable de veiller à ce que l'attention des usagers de la route actifs ne diminue pas pendant leur trajet, s'ils supposent que le CAV les remarquera de toute façon et adaptera son comportement en conséquence. La sécurité routière dans des situations spécifiques pourrait être réduite si le CAV devait freiner de manière inattendue ou dévier de sa trajectoire normale.

Le comportement des piétons et des cyclistes vis-à-vis des voitures dépend souvent de la **communication visuelle** entre les différents usagers de la route et de l'expression des intentions.

- Il existe des expériences dans lesquelles des véhicules autonomes détectent avec succès les cyclistes et les piétons et agissent de manière adéquate (TED, 2015).
- En général, les algorithmes ont du mal à prévoir correctement le comportement des usagers de la route non automatisés et à prendre les mesures qui s'imposent (Van Schagen, van der Kint & Hagenzieker, 2017). Cela n'est pas exclusif pour les algorithmes; les conducteurs humains aussi peuvent avoir des difficultés à estimer le comportement humain (mouvements inattendus).
- De nombreuses recherches ont été menées récemment pour trouver des solutions aux comportements humains (inattendus) (European Telecommunications Standards Institute [ETSI], 2019; Kunert et al., 2018; Mannion, 2019).

D'autre part, il est également important pour **les cyclistes et les piétons** de savoir qu'ils ont été remarqués par un automobiliste qui s'approche avant, par exemple, de décider de traverser une route. Il n'y a pas cette communication entre les véhicules autonomes et les usagers de la route non automatisés et le comportement de ces derniers peut dès lors changer. Sur la base de recherches, on estime que pour 10 % des victimes de la route – principalement des accidents impliquant des cyclistes ou des motocyclistes – en Europe, il n'y a pas de véhicules motorisés impliqués (que ce soit comme victimes ou pas) qui peuvent être automatisés (Lindström et al., 2018).

2.2.3 Congestion

La contribution que les CAV pourraient apporter à la réduction de la congestion est un sujet qui fait couler beaucoup d'encre. On peut en déduire qu'il n'est pas certain que la congestion diminue. Plusieurs études laissent entendre que les CAV entraîneraient même davantage de congestion.

L'introduction des CAV (et en particulier des véhicules autonomes) peut entraîner des **effets contradictoires**.

D'une part, une **capacité supplémentaire** se libérera parce que les véhicules autonomes peuvent rouler plus près l'un de l'autre (Friedrich, 2015)²⁰. D'autre part, il existe des preuves scientifiques de l'existence d'une **demande latente de transport**²¹.

Un point important est l'idée de donner accès aux CAV à certains groupes de la population qui ne sont pas autorisés à conduire eux-mêmes (comme les jeunes sans permis de conduire ou les personnes âgées qui ne peuvent plus conduire). Il existe également un potentiel pour l'utilisation de véhicules autonomes dans les zones moins facilement accessibles par les transports en commun (p. ex. les zones rurales).

20

Dans un scénario sur une autoroute à 80 km/h où le temps entre deux véhicules est de 1,15 sec (dans le cas de conducteurs humains), l'occupation – s'il s'agit uniquement de voitures particulières autonomes avec un temps de 0,5 sec entre deux véhicules – peut passer de 2 200 à 3 900 véhicules/heure (Friedrich, 2015).

21

La demande latente de transport est le phénomène où le trafic total augmente avec l'accroissement de la capacité routière. Le nouveau trafic est dû au fait qu'avant l'augmentation de la capacité, les personnes restaient chez elles ou choisissaient un itinéraire ou un mode de transport différent ou un moment de la journée différent. La mesure dans laquelle un nouveau trafic apparaît en réponse à l'augmentation de la capacité peut être exprimée en termes d'élasticité. Diverses études scientifiques apportent la preuve de l'existence de cette demande dite latente d'infrastructure routière. Les estimations de l'élasticité vont d'environ 0,2 à court terme à 0,8 à long terme (Dunkerley, Whittaker, Laird & Daly, 2018; Verrips, Hoen et al., 2016).

La recherche montre également l'importance de la discussion sur la propriété privée d'une voiture autonome et des **systèmes partagés**. La mise en œuvre d'une politique appropriée est cruciale pour contenir les conséquences du déploiement des CAV. En investissant dans les systèmes partagés de véhicules autonomes, on peut réduire considérablement le nombre de véhicules. Les simulations montrent qu'il serait possible de répondre à tous les besoins de mobilité dans une ville avec seulement un sixième ou un septième du parc automobile actuel (International Transport Forum [ITF], 2015; Leeb, 2019)²².

La **question reste** de savoir comment l'utilisation de taxis autonomes, de véhicules privés autonomes, de transports en commun «traditionnels» et d'usagers actifs de la route va se développer et ce que cela signifie pour l'**aménagement des espaces publics** (par exemple, l'occupation de l'espace au sens général du terme ou spécifiquement pour les voies réservées aux bus entre autres).

Une étude suisse s'est penchée sur la **composante coût** (outre la durée du trajet, la fiabilité et le confort, un aspect important de la fourniture d'un service de transport)²³. Cette étude a établi une distinction entre *urban* et *regional* d'une part, et *autonomous* et *non autonomous* d'autre part, et donne un aperçu des rapports futurs (Bösch, Becker, F., Becker, H. & Axhausen, 2018).

La figure suivante, tirée de l'étude, montre comment la composante coût peut être interprétée²⁴:

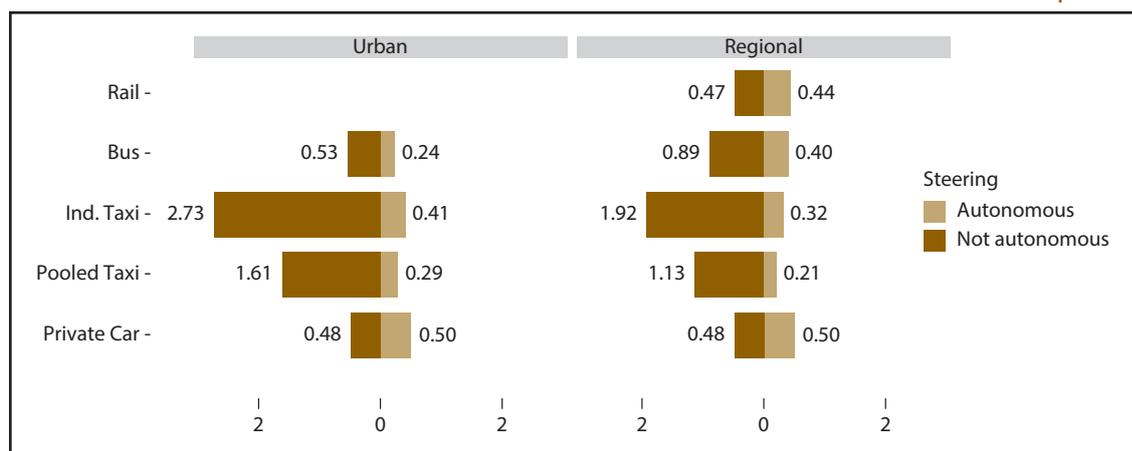


Figure 2.4 – Comparaison des coûts des différents modes avec et sans technologie automobile autonome (Bösch et al., 2018)

- **Sans automatiser**, la voiture particulière a le coût d'exploitation le plus faible par passager-kilomètre (à l'exception des services de trains régionaux)
 - parce que le chauffeur est rémunéré, les services de taxi sont considérablement plus chers;
 - les bus urbains et les chemins de fer régionaux fonctionnent à un coût par passager-kilomètre similaire à celui des voitures particulières.
- La situation **change substantiellement avec l'automatisation** des véhicules
 - les coûts des voitures particulières et des services ferroviaires changent de façon marginale;
 - grâce à la technologie de la conduite autonome, les services de taxi et les bus peuvent être utilisés à des coûts nettement inférieurs, voire être moins chers que les voitures particulières;

22

§ 3.3.4 Systèmes partagés.

23

Composante coût étudiée: frais généraux et véhicule, exploitation, salaires, carburant, nettoyage, stationnement et péage, taxes, assurance, amortissement, intérêts, entretien et usure.

24

Les coûts suivants sont inclus dans la comparaison: *overhead & vehicle operations, salaries, fuel, cleaning, parking & tolls, tax, insurance, depreciation, interest et maintenance & wear*. Pour une comparaison équitable des différents modes, les coûts de production complets des services de transports en commun actuels ont été estimés avant les subventions directes.

- dans un **environnement urbain**, les taxis deviennent moins chers que les bus conventionnels, mais ils restent plus chers que les bus automatisés;
- dans les **environnements régionaux**, définis comme des trajets de banlieue, les taxis et les bus autonomes deviennent moins chers que les véhicules particuliers et les services ferroviaires.

2.2.4 Mobilité

Les développements autour des CAV peuvent jouer un rôle dans l'offre de solutions de mobilité. Cela peut être indiqué par un récent changement de politique du Gouvernement flamand (*Vlaamse Overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, s.d.*). En juin 2019, le gouvernement flamand a remplacé l'ancien décret sur la mobilité de base par le nouveau décret sur l'accessibilité de base.

Avec l'**ancien décret sur la mobilité de base**, les sociétés de transports en commun étaient obligées de proposer à chaque habitant en Flandre un arrêt dans un rayon limité de son domicile, que ces arrêts soient utilisés ou non. De plus, la présence d'un arrêt ne garantissait pas la fréquence des transports en commun (il est parfois nécessaire de faire appel à un *Telbus* ou bus sur commande) ni que la destination souhaitée soit facilement accessible depuis cet arrêt.

Avec le concept d'**accessibilité de base**, le Gouvernement flamand veut surtout que les lieux importants soient plus facilement accessibles aux voyageurs. L'offre de transport devrait ainsi mieux correspondre aux besoins du voyageur. L'objectif est de concentrer les transports en commun réguliers principalement autour des grands axes (éventuellement même avec une offre accrue) et de les combiner avec d'autres modes de transport pour le trajet à destination ou en provenance de l'itinéraire couvert par les transports en commun réguliers.

Le décret sur l'accessibilité de base fait notamment aussi référence au **transport partagé pour la couche de transport inférieure** (transport sur mesure). Pour répondre à ce type de transport notamment, il semble que les taxis robots peuvent jouer un rôle à terme.

2.2.5 Occupation de l'espace

Une voiture particulière reste inutilisée pendant une grande partie de la journée. En particulier dans un contexte urbain, où la demande d'espace est élevée, des **systèmes partagés avec des véhicules autonomes** permettraient de **réduire le besoin de places de stationnement**²⁵. La politique urbaine accorde une attention croissante à la promotion de ces systèmes partagés. En outre, il semble y avoir une tendance à limiter le nombre de places de stationnement prévues pour les nouvelles habitations.

D'autre part, certaines études (ITF, 2015) semblent indiquer une **augmentation du nombre de kilomètres parcourus** lors de l'introduction de véhicules autonomes; principalement en raison du repositionnement des véhicules, de la prise en charge ou du débarquement de personnes ou encore du déchargement de marchandises. Toutefois, en ce qui concerne les véhicules autonomes, la politique a beaucoup plus de possibilités qu'auparavant pour promouvoir des déplacements utiles. Un véhicule autonome peut, après avoir effectué sa tâche de transport, s'éloigner de lui-même vers une zone d'attente (capacité maximale de stockage du véhicule, nuisance minimale pour la communauté, éventuellement équipé pour la maintenance et le chargement ou d'autres fonctions secondaires) ou se déplacer de façon tout à fait autonome vers

25 Selon une étude de l'OCDE/FIT, le nombre de places de stationnement nécessaires diminuerait considérablement si tous les déplacements dans une ville étaient effectués avec des véhicules partagés (Martinez & Viegas, 2016).

la prochaine tâche de transport. Cependant, pour organiser efficacement le transport de cette manière, une infrastructure adaptée (zones d'attente) semble indispensable.

Il semble nécessaire d'associer la **politique de stationnement** à la **politique environnementale** (Klochikhin, 2019). Il se peut qu'une grande flotte de véhicules autonomes soit nécessaire pour répondre aux besoins de déplacement pendant les heures de pointe. Pendant la période moins chargée, tous ces véhicules doivent pouvoir être garés efficacement en attendant une prochaine mission. Il convient d'éviter que les véhicules autonomes effectuent de longs trajets (inutiles) parce que les parkings seraient insuffisamment disponibles ou trop chers (McNulty, 2019).

Une **réflexion** sur le stationnement **ournée vers l'avenir** est déjà en cours à certains endroits. Par exemple, les promoteurs de projets à Los Angeles (Etats-Unis) sont invités à concevoir des parkings qui peuvent ensuite être transformés en habitations ou en magasins (Redactie Automobiël Management, 2019a).

Dans les zones déjà engorgées, si des mesures supplémentaires ne sont pas prises, les véhicules autonomes ne mettront pas fin aux **problèmes de mobilité**. En milieu urbain, des mesures visant à limiter le transport individuel semblent être cruciales pour la qualité de vie de cet environnement (National Association of City Transportation Officials [NACTO], 2019). Il n'est pas exclu que les villes puissent envisager des choix de grande envergure en termes d'accès à (certaines parties de) la ville si les objectifs d'accessibilité et de qualité de vie ne sont pas atteints. La question est de savoir dans quelle mesure cela est nécessaire. En premier lieu, les gens ne choisissent pas a priori de détériorer leur propre déplacement. En outre, des mesures de moindre portée peuvent être utilisées, telles que des mesures dissuasives fondées sur le libre choix des modes de déplacement. Un exemple suggéré par certains experts de la circulation est la tarification des trajets avec une différenciation selon le moyen de transport, le moment et le lieu.

2.2.6 Efficacité énergétique et respect de l'environnement

L'efficacité énergétique et la qualité de l'air sont des facteurs déterminants pour l'introduction des CAV.

Un certain nombre d'applications pour les véhicules (connectés) visent à mettre en place une **vitesse plus homogène**. Une **vitesse plus homogène** offre des avantages à plusieurs niveaux:

- la consommation d'énergie et les émissions locales de CO₂;
- les émissions de gaz d'échappement (principalement PM, PN & NOx) des véhicules à moteur à combustion;
- les émissions qui ne proviennent pas des gaz d'échappement (PM & PN des freins à disque, pneus, chaussée) parce qu'un freinage moindre (moins brutal) est nécessaire.

Exemples d'applications:

- véhicules qui reçoivent des informations des feux de circulation, permettant au véhicule d'adapter sa vitesse quand le feu est vert;
- des phases vertes prolongées pour certains véhicules et l'influence des phases par certaines catégories de véhicules (par exemple, les véhicules prioritaires);
- comportement de conduite anticipatif par le déploiement de systèmes d'assistance sur autoroutes. Cela peut conduire, par exemple, à une réduction des files en accordéon (situations dans lesquelles les embouteillages alternent avec un trafic relativement fluide).

Les émissions sont également liées au taux d'occupation des véhicules. Le succès des **systèmes partagés** avec des véhicules autonomes peut avoir un effet positif sur ce point, en particulier dans un contexte urbain.

La **masse** des véhicules est un autre aspect qui joue un rôle sur la charge de la voirie, sur les émissions et la consommation. La figure ci-dessous illustre l'évolution de la masse moyenne des véhicules neufs en Europe, aux Etats-Unis et au Japon.

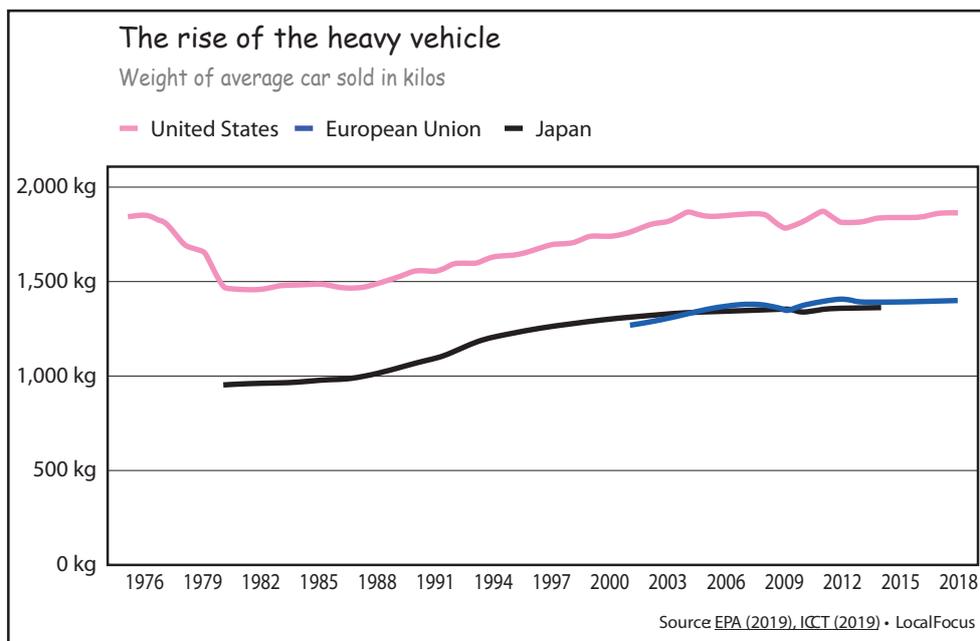


Figure 2.5 – Evolution de la masse des voitures nouvellement vendues (Frederik, 2020)

Nous devons attendre de voir comment cela va évoluer. Le succès plus important attendu des véhicules électriques et d'autres développements technologiques dans les prochaines décennies pourrait influencer l'évolution de la masse moyenne. D'une part, une diminution de la taille des véhicules (plus légers = moins de consommation d'énergie) semble appartenir au domaine du possible. D'autre part, les modèles de véhicules électriques ayant une grande autonomie nécessitent une batterie importante et sont donc plus lourds que les modèles comparables équipés d'un moteur à combustion.

Si les véhicules autonomes fonctionnent à l'avenir avec une fiabilité de 100 %, on s'attend à ce qu'ils soient impliqués dans un nombre moins important d'accidents ou dans des accidents de types différents. Les exigences d'homologation des caractéristiques des véhicules qui contribuent à la sécurité en cas de collision peuvent alors changer²⁶ et affecteront probablement la construction et la masse des véhicules (Morsink, Klem, Wilmink & de Kievit, 2016) et donc aussi leur consommation d'énergie.

En ce qui concerne l'infrastructure, il est également nécessaire de prévoir une **infrastructure de recharge** pour les véhicules électriques à batterie et une station de recharge pour les véhicules électriques à pile à combustible, pour lesquels une partie de l'espace public devrait être réservé.

Les plans politiques ont tendance à se concentrer sur la qualité de vie dans les villes, tout en imposant des restrictions aux émissions des véhicules. Si l'on parle en termes d'électrification des véhicules, on peut en effet parler d'un processus parallèle potentiellement lié au développement des CAV et des systèmes partagés.

26

L'évolution des caractéristiques des véhicules a également un impact sur les spécifications techniques des équipements routiers qui pardonnent. Les méthodes d'évaluation de ces dispositifs tiennent compte des caractéristiques moyennes des véhicules (voir NBN EN 12767): Sécurité passive des structures supports d'équipements de la route - Prescriptions et méthodes d'essai (Bureau de Normalisation [NBN], 2019) et NBN EN 1317: Dispositifs de retenue routiers) (Bureau de Normalisation [NBN], 2002-2010). Si ces caractéristiques de véhicule changent, il faut en tenir compte dans ces méthodes d'évaluation.

On suppose souvent que les véhicules autonomes seront alimentés par des moteurs électriques. Par conséquent, si la proportion de ces véhicules augmente, il est important de prévoir également des installations de recharge en suffisance pour les véhicules électriques à batterie et des stations à hydrogène pour les véhicules électriques à pile à combustible (infrastructure de recharge, *charging*) (Gowling WLG & UK Automotive, 2018).

2.2.7 Capacité de la route

La **fluidité du trafic** peut être décrite au moyen de:

- l'intensité (q) le nombre de véhicules par heure;
- la densité (k) le nombre de véhicules par km de longueur de route;
- la vitesse (u) km/h.

La **relation fondamentale** est la fonction de circulation qui décrit les relations entre l'intensité et la densité, la vitesse et la densité, et la vitesse et l'intensité («Fundamentele relatie», 2020).

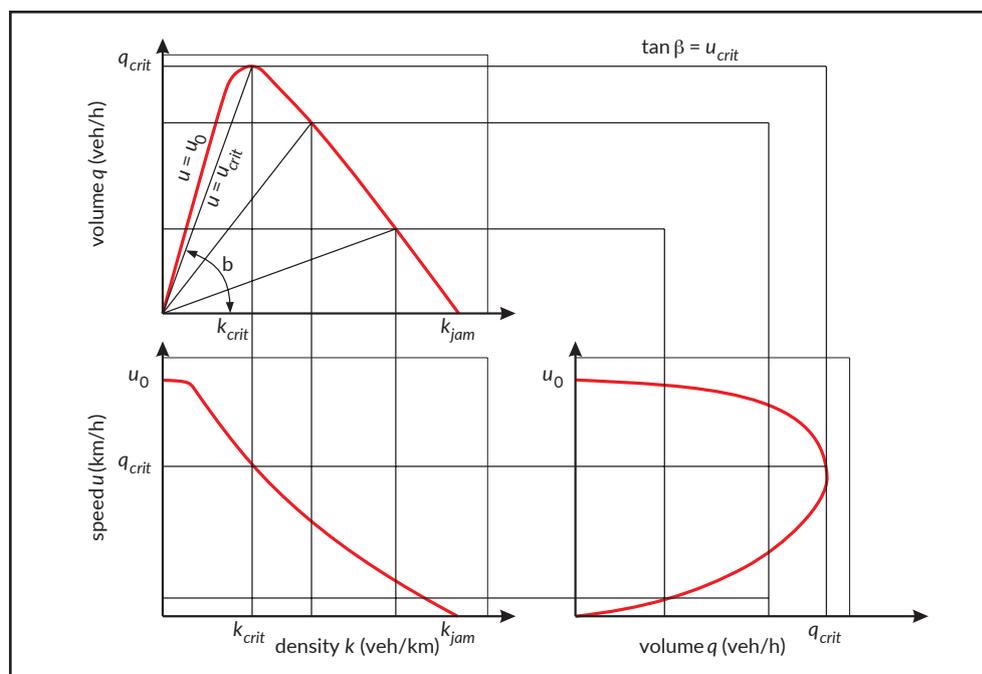


Figure 2.6 – Relation entre l'intensité, la densité et la vitesse («Fundamentele relatie», 2020)

Plusieurs paramètres sont déterminants pour le comportement du trafic:

- intensité maximale (q_{crit}), également appelée capacité;
- densité critique (k_{crit}), la densité à l'intensité maximale;
- densité maximale (k_{jam}) sur une route;
- vitesse libre (u_0), la vitesse moyenne en cas de flux de circulation libre;
- vitesse critique (u_{crit}), la vitesse à laquelle la route est utilisée le plus efficacement.

Les facteurs environnementaux influencent les paramètres (aménagement de la route, qualité du revêtement, répartition de la chaussée, etc.). La capacité n'est pas une donnée fixe, mais dépend de la **composition du trafic** et des conditions météorologiques («Fundamentele relatie», 2020).

Dans un scénario avec **uniquement** des véhicules automatisés, l'infrastructure disponible peut être utilisée plus efficacement, entre autres parce que la **distance entre les CAV** peut être réduite et en raison d'une vitesse plus homogène. Les résultats de simulation pour les routes à fort trafic montrent une variation de 0 à 30 % d'augmentation de la capacité. Cela dépend de plusieurs facteurs: en fonction de la section, du degré de pénétration des véhicules autonomes, de la vitesse, des conditions météorologiques et de la proportion du trafic de marchandises (Leeb, 2019).

Toutefois, une étude allemande montre que dans des **scénarios de transition** pour les autoroutes, la capacité pourrait diminuer. Etant donné que les interactions entre les véhicules autonomes et les véhicules avec un conducteur humain se déroulent moins bien, il est probable qu'une distance de sécurité plus importante sera appliquée, ce qui pourrait effectivement réduire la capacité dans un premier temps (Leeb, 2019). A cet égard, le **degré de pénétration** des véhicules autonomes dans le scénario de transition est un élément important. Avec un nombre suffisant de véhicules autonomes, les voies réservées à la conduite purement autonome peuvent entraîner des gains de capacité considérables (Friedrich, 2015). Il s'agit ici de déterminer dans quelle mesure les voies réservées sont socialement acceptables. Si l'introduction est trop précoce, seuls les «heureux élus» pourront utiliser une voie réservée sur laquelle la circulation est aisée. La majorité silencieuse devra alors se contenter d'une capacité routière moindre.

Des **voies réservées** aux véhicules autonomes peuvent inciter les gens à utiliser d'autres véhicules. En cas de succès, cependant, il semble probable que ces voies réservées seront vite saturées. L'expérience de la Norvège en matière d'admission des VE (véhicules électriques) sur les voies de bus montre que cette admission peut également avoir des conséquences négatives: les embouteillages augmentent aux heures de pointe parallèlement aux ventes de VE (Bannon, 2016).

Le **potentiel théorique d'augmentation de la capacité** dans les villes à un taux de pénétration maximal serait d'environ 20 à 40 %. Cela s'appliquerait en particulier dans le cas des feux de circulation: le temps nécessaire par véhicule serait réduit, les véhicules pourraient accélérer plus rapidement et le carrefour pourrait être évacué plus rapidement (Leeb, 2019).

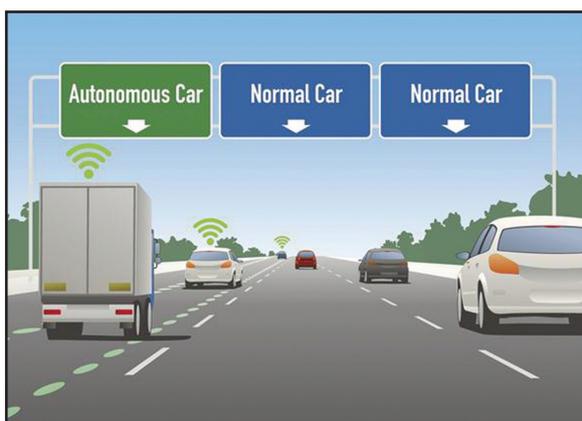


Figure 2.7 – Voies réservées aux véhicules autonomes (Albricht, 2017)

2.3 Niveaux SAE

2.3.1 Système de classification

L'organisation SAE International (un organisme de normalisation dans l'industrie automobile) a développé un **système de classification** pour les contrôles automatisés sur la voie publique. Le système de classification est basé sur la quantité requise d'interventions et l'attention requise de la part du conducteur. En 2018, SAE International a mis à jour sa classification (appelée J3016_201806).

		SAE LEVEL 0	SAE LEVEL 1	SAE LEVEL 2	SAE LEVEL 3	SAE LEVEL 4	SAE LEVEL 5
What does the human in the driver's seat have to do?		You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in "the driver's seat"		
		You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
What do these features do?		These are driver support features			These are automated driving features		
		These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
Example Features		<ul style="list-style-type: none"> • automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering OR • adaptive cruise control 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering AND • adaptive cruise control at the same time 	<ul style="list-style-type: none"> • traffic jam chauffeur 	<ul style="list-style-type: none"> • local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed 	<ul style="list-style-type: none"> • same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

Figure 2.8 – Système de classification SAE (SAE International releases updated visual chart, 2018)

Le système est également utilisé en Belgique (voir le code de bonnes pratiques d'expérimentation des véhicules autonomes) (SPF Mobilité et Transports, 2016b).



Figure 2.9 – Illustration niveau 3 SAE (Metamorworks, s.d.)

2.3.2 Niveaux SAE et infrastructure routière

27 Cela concerne la «route» au sens large: la structure de la chaussée, l'équipement routier, y compris l'environnement routier proche. Au niveau de la rue dans les villes, par exemple, il s'agit de la route de façade à façade; sur les autoroutes, les parties hors route telles que les accotements et les bermes centrales sont incluses.

Dans la situation sans CAV, le système de déplacement est basé sur l'interaction entre l'être humain, le véhicule et l'infrastructure routière²⁷. L'**être humain** a une interaction directe avec le véhicule et l'infrastructure routière. Plus le niveau SAE augmente, plus l'être humain sera aidé dans sa tâche de conduite. A terme, au **SAE L5**, le véhicule sera **totalelement autonome** et ses occupants pourront s'atteler à d'autres tâches pendant tout le trajet. Une voiture homologuée SAE L5 est à même de résoudre toute situation de conflit en totale indépendance.

A partir du niveau SAE 3, les véhicules automatisés sont en mesure d'effectuer eux-mêmes toutes ou certaines tâches de conduite en fonction de leur perception de l'environnement de conduite. Dans le cas des niveaux SAE 0, 1 et 2, le conducteur est responsable de la surveillance de l'environnement de conduite. Dans le cas des niveaux SAE 1 et 2, le véhicule peut déjà fournir une assistance limitée au conducteur ou prendre en charge certaines tâches de conduite.

Le conducteur d'un véhicule automatisé jusqu'à **SAE L3** (*conditional automation*) doit toujours être en mesure de reprendre le contrôle de son véhicule. Les capteurs du véhicule doivent être capables de détecter à temps la route, d'autres véhicules et d'éventuels obstacles et, si nécessaire, d'en informer le conducteur afin qu'il puisse reprendre le contrôle du véhicule en temps opportun. Une plus grande harmonisation et un niveau de qualité plus élevé peuvent contribuer à un fonctionnement plus fiable des systèmes SAE L3, mais comme il y a toujours un risque que le contrôle du véhicule incombe au conducteur humain, l'infrastructure devrait également continuer à tenir compte d'un conducteur humain.

Même pour **SAE L4** (*high automation*), pour les situations critiques ou en cas de non-fonctionnement des systèmes, on compte toujours sur un conducteur humain. Les projets de directive doivent donc toujours en tenir compte²⁸.

28 Projets de directive: voir § 3.2.1 Projets de directive.

Pour le *Rijkswaterstaat* (Pays-Bas), la situation des véhicules 100 % SAE L5 est un exercice théorique (Morsink et al., 2016). Ils disent ce qui suit:

- de nombreuses adaptations à la conception des routes sont peut-être nécessaires et sensées à long terme s'il n'est plus question que de **véhicules SAE L5**;
- on ne peut pas changer grand-chose à la conception des routes tant qu'il est question d'un trafic mixte, avec un mélange de véhicules de différents niveaux SAE;
- il est impossible de prévoir le **délai dans lequel** la proportion de SAE L5 sera suffisante pour faire «basculer» la conception des routes (c'est-à-dire prendre le véhicule autonome avec SAE L5 et non le véhicule à conduite manuelle comme point de départ pour la conception (d'une partie) de l'infrastructure).

Il n'est pas souhaitable d'attendre le moment où seuls des véhicules SAE L5 utilisent l'infrastructure routière pour adapter les projets de directive. Un **processus d'évaluation continue** est une meilleure approche, mais avec des ajustements bien choisis aux projets de directive:

- l'adaptation effective des projets de directive pour un certain type ou une partie de l'infrastructure routière est possible si tous les véhicules disposent d'un certain niveau de possibilités;
- il n'est pas très pratique pour les gestionnaires routiers et les entrepreneurs que les projets de directive soient constamment mis à jour (l'entrepreneur n'a en effet pas d'influence ou très peu sur les projets de directive).

En outre, il faut également tenir compte de l'**indisponibilité de la connectivité**. Dans ce cas, les capteurs du véhicule et/ou le conducteur humain doivent prendre en charge la tâche de conduite et l'infrastructure doit encore permettre de le faire de manière correcte et sûre (Farah, 2016). On est en droit de se demander si les utilisateurs de véhicules autonomes seront encore capables de prendre soudainement le relais si les systèmes automatisés flanchent ou si cela est nécessaire dans des situations plus complexes.

2.4 Déploiement des CAV & obstacles

Il n'est pas évident de déterminer avec certitude la vitesse à laquelle le déploiement des véhicules autonomes se fera. Des véhicules pouvant être qualifiés de véhicules SAE L3 ont récemment été lancés sur le marché. Des véhicules de niveau SAE L4 sont testés depuis un certain temps²⁹. La date d'introduction des véhicules SAE L5 sur le marché est loin d'être claire: les attentes des constructeurs sont très différentes.

29

Par exemple, le projet Waymo de Google en Arizona (<https://waymo.com/>).

2.4.1 Infrastructure routière

Certains constructeurs automobiles réclament une **infrastructure routière de meilleure qualité**, tandis que d'autres s'appuient davantage sur l'infrastructure routière existante lorsqu'ils développent des véhicules autonomes.

Ce sont notamment les **marquages routiers** (l'absence de marquages suffisamment visibles) qui constituent actuellement pour certains constructeurs un obstacle au fonctionnement fiable des véhicules autonomes.

La **fiabilité des systèmes** (tels qu'ISA et LDWS) est importante pour leur succès et leur généralisation. Outre le développement technologique et l'acceptation des technologies, un certain nombre d'aspects infrastructurels jouent également un rôle. Par exemple, une harmonisation de l'infrastructure routière (couleur, matériaux réfléchissants, etc.) peut avoir une influence positive sur le déploiement des CAV.

Le **développement de la technologie des caméras et les algorithmes de traitement des images** sont si rapides que les futurs systèmes pourront mieux faire face à des marquages moins bons. Il est peut-être superflu d'améliorer les marquages pour venir assister les véhicules autonomes. Les développements futurs pourraient permettre la reconnaissance correcte par les systèmes de caméras et les algorithmes de traitement des marquages qui sont considérés comme inadéquats aujourd'hui. Dans un avenir plus lointain, ces marquages pourraient même devenir complètement superflus si l'on peut se fier à une géolocalisation précise et si l'on dispose d'informations numériques fiables sur l'infrastructure physique.

Tant qu'il y a un mélange de véhicules (différents niveaux SAE), il reste extrêmement important de répondre efficacement aux **normes de qualité des marquages**. L'amélioration de la technologie (caméra, traitement) est indépendante de l'entretien nécessaire des voiries et du marquage routier en particulier.

2.4.2 Obstacles divers³⁰

Cependant, la route vers une mobilité pleinement autonome est semée de nombreuses **embûches**. Les aspects techniques (communication fiable et performante, géolocalisation

30

Diverses initiatives rassemblent des parties prenantes ayant des compétences différentes afin de fixer des priorités de R&D pour faciliter le développement de la mobilité autonome (par exemple, le partenariat CCAM de l'UE [https://ec.europa.eu/transport/themes/its/c-its_en]) et d'identifier les mesures pouvant être prises par les gestionnaires routiers pour soutenir la mobilité autonome (par exemple, le groupe de travail du FIT *Preparing transport infrastructure to autonomous mobility*).

précise et fiable, etc.) semblent encore relativement «faciles» à résoudre. Pour d'autres sujets (éthique, financement, règles de circulation, homologation des véhicules, emploi, vie privée et cybersécurité, etc.), la réponse semble encore loin pour l'instant.

Les **conditions météorologiques extrêmes** (fortes pluies, flocons de neige parfois considérés comme des personnes) et les situations particulières (travaux routiers) sont également complexes pour les voitures autonomes. Cela gêne les systèmes qui fonctionnent sur la base de la détection de leur environnement (marquages routiers, panneaux de signalisation, etc.). A l'avenir, les systèmes de détection deviendront peut-être plus fiables («Zelfrijdende auto niet langer sneeuwblind», 2020) et seront peut-être combinés avec des systèmes ayant accès à des informations numérisées sur la route sur laquelle ils se trouvent (la *digital infrastructure*), ce qui les rendra moins dépendants du fonctionnement de ces capteurs. La directive-cadre sur les STI demande des états membres qu'ils traitent les données relatives aux routes, à la circulation et aux transports utilisées pour les cartes numériques.

L'**imprévisibilité du comportement humain** est une complexité à ne pas sous-estimer. Les gens ne respectent pas toujours les règles de circulation (par exemple, ils ignorent un feu rouge ou s'arrêtent brusquement pour se garer en double file). Il ne faut pas s'attendre à ce que ce comportement s'améliore avec le déploiement des véhicules autonomes. C'est un défi d'apprendre aux véhicules autonomes à gérer un comportement aussi imprévisible. La combinaison harmonieuse et sûre de véhicules autonomes automatisés et de piétons et cyclistes non automatisés et imprévisibles est encore un aspect méconnu pour le moment (Van Schagen et al., 2017). La reconnaissance de ce problème en premier lieu, et le développement de caméras et de systèmes de mesure avancés (comme base des fonctions automatisées des véhicules) en second lieu, offrent des opportunités de prendre des mesures pour faire face aux comportements imprévisibles.

L'**horizon de niveaux d'automatisation plus élevés** est encore incertain. Les scénarios optimistes prévoient une pénétration de 15 % des véhicules SAE L4 en 2030 [35]. Il est clair qu'on est encore loin d'avoir une mobilité totalement autonome (100 % des véhicules SAE L5): selon certains, après 2075, voire jamais (Morsink et al., 2016).

Un article sur les déclarations des onze plus grands constructeurs automobiles montre clairement que l'intelligence artificielle (**Artificial Intelligence**, AI) est inévitable pour les voitures autonomes. Toutefois, en raison de leur complexité, il semble improbable que les véhicules autonomes deviennent monnaie courante sur les autoroutes au début des années 2020 (ce que déclaraient la plupart des constructeurs automobiles vers 2016) (Faggella, 2020)³¹.

Dans les véhicules SAE L3, lancés assez récemment sur le marché, l'automobiliste ne conduit pas lorsque les fonctions de conduite automatisée sont enclenchées. Toutefois, il doit conduire lorsque le véhicule le demande. Cette transition est critique car la fonction s'arrête et le conducteur doit reprendre le contrôle du véhicule dans les secondes qui suivent:

- Temps insuffisant pour que le conducteur puisse tenir compte de la situation de la circulation autour du véhicule. Les véhicules SAE L4 gèrent cette transition dans des cas d'utilisation spécifiques (ODD). La fin du cas d'utilisation est connue bien à l'avance, ce qui donne au conducteur la possibilité de se préparer et de reprendre le contrôle du véhicule en temps voulu.
- Comme la transition peut engendrer des situations critiques, certains constructeurs automobiles envisagent de passer **de la SAE L2 à la SAE L4** en une seule fois (Litzler, 2019).

31 L'article ne précise pas la définition des «véhicules autonomes sur autoroutes». Le lien avec les niveaux SAE n'est pas évident.

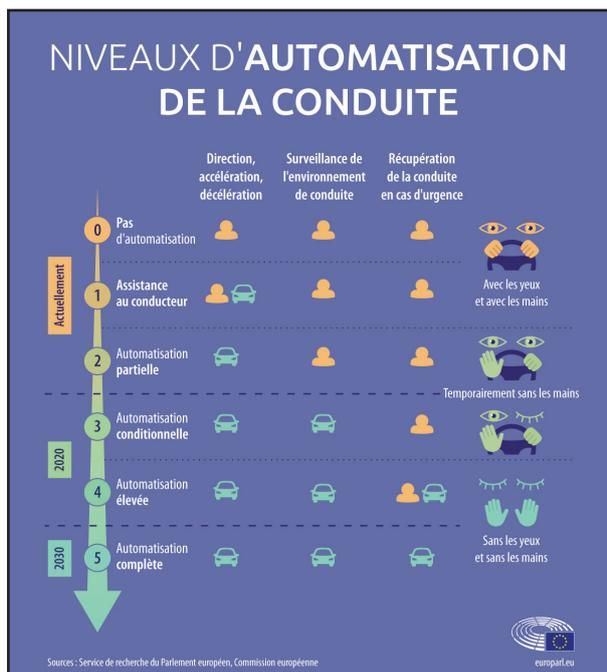


Figure 2.10 – Niveau d'automatisation, EPRS/Commission européenne («Véhicules autonomes dans l'UE», 2019)

Le degré de pénétration des CAV dépend également de l'**acceptation des CAV** par tous les conducteurs. Est-il concevable que les automobilistes se détournent des véhicules autonomes parce qu'ils ne peuvent pas prendre plaisir à conduire eux-mêmes? L'utilisation de véhicules autonomes doit-elle être prescrite par la loi? Si oui, dans quelles circonstances? La réponse à ces questions est encore ouverte (Leeb, 2019).

Un autre point important concerne les attentes des gens en matière de sécurité routière. Une confiance trop grande dans la technologie peut être problématique et mettre en jeu l'image des constructeurs automobiles. Un accident impliquant des véhicules autonomes mine la confiance du public dans un facteur clé des constructeurs automobiles: rendre le système de circulation plus sûr. Pour les constructeurs automobiles, une image sûre est extrêmement importante. Les constructeurs automobiles sont clairement conscients du fait que les accidents impliquant des voitures autonomes sont largement diffusés dans la presse. L'*Event Data Recorder* (EDR) permet cependant, en cas d'accident, de connaître les données principales relatives à l'accident ainsi que la personne qui contrôlait le véhicule au moment de l'incident: l'être humain (conducteur) ou l'algorithme.

2.4.3 Prospective

Pour les gestionnaires routiers, il est nécessaire de **prospector l'avenir**, certainement en ce qui concerne le déploiement des CAV et les implications possibles pour la société. Cependant, prospector l'avenir est loin d'être facile.

La **loi d'Amara** (Kerner, 2016) indique que si nous devons relativiser les possibilités des technologies, nous ne devons pas les sous-estimer. Au début d'une nouvelle technologie, les gens sont enthousiastes et surestiment les possibilités technologiques et pratiques. Au fil du temps, ils se rendent compte que c'est plus difficile qu'il n'y paraissait et les attentes sont alignées sur les évolutions technologiques. A long terme, on a tendance à sous-estimer l'impact des développements technologiques.

Ce **processus** se reflète clairement dans le développement des véhicules autonomes: au départ, un grand enthousiasme sur la faisabilité (technique) et progressivement la conscience que cela prend un certain temps.

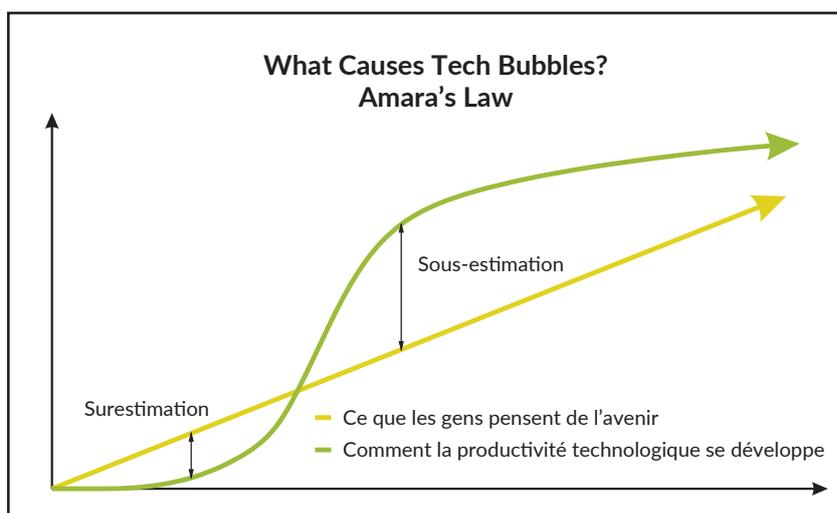


Figure 2.11 – Amara's law. tech bubble? (Kerner, 2016)

2.4.4 Cybersécurité

Les voitures autonomes sont des ordinateurs de pointe sur roues; fondamentalement, avec des vulnérabilités similaires à d'autres systèmes informatisés. Il est extrêmement important que la **fiabilité** de ces systèmes puisse être garantie à 100 %. En particulier lorsque des véhicules autonomes sont également connectés, il est fondamental que le système continue à fonctionner même si cette connectivité est (brièvement) perdue. Il est préférable d'isoler des autres systèmes les fonctions du véhicule pertinentes pour la sécurité (ITF, 2018). Cela correspond à l'idée que le fonctionnement des systèmes d'urgence ne doit pas dépendre de la disponibilité de la connectivité³².

Pour plus d'informations sur les car data: <https://www.cardatafacts.eu/extended-vehicle-concept/>

L'accès du véhicule aux données signifie que tout prestataire de services externe peut avoir un accès direct et non contrôlé aux données dans un véhicule motorisé. La figure suivante illustre les risques:

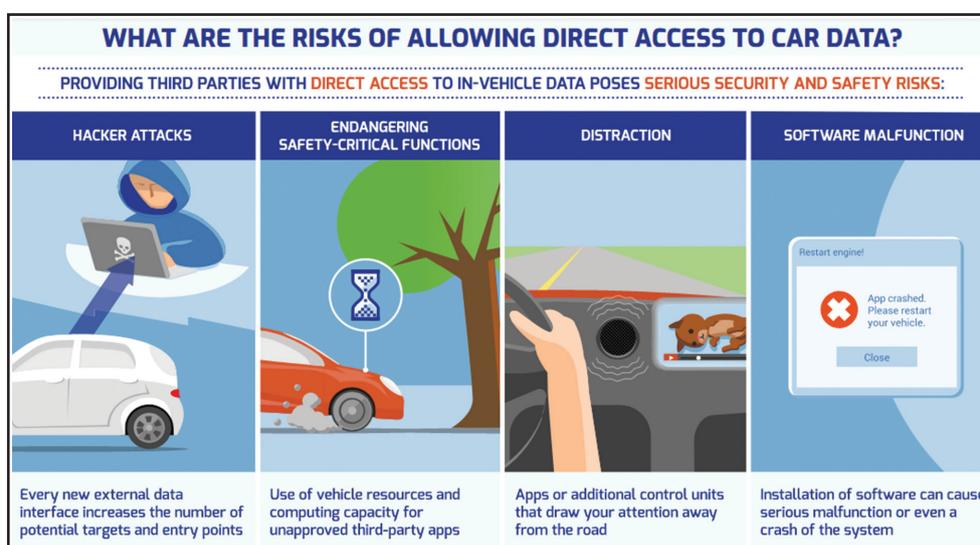


Figure 2.12 – Des risques de l'accès direct aux données des véhicules («What are the risks», s.d.)

Les **dangers potentiels** comprennent les attaques de pirates informatiques, le danger pour les fonctions critiques liées à la sécurité, les risques supplémentaires pour la sécurité liés à la distraction du conducteur et les pannes de logiciels.

2.5 Véhicules autonomes pour applications limitées

Des coûts de développement élevés pour des niveaux d'automatisation supérieurs jouent également un rôle dans le déploiement. Ces coûts varient en fonction du type d'utilisateur. Les **coûts de développement** des véhicules autonomes privés sont difficiles à justifier pour les grands groupes automobiles. Par exemple, PSA, l'un des plus grands groupes automobiles européens, propose de continuer à investir dans SAE L4 et SAE L5 pour les taxis robots et les services de navette, mais pas dans les véhicules privés avec ces niveaux élevés d'automatisation (Redactie Automobiel Management, 2019c). En outre, le développement de ces navettes autonomes pour des applications spécifiques sur un itinéraire donné ou dans une zone limitée n'est pas seulement le fait des groupes automobiles traditionnels, mais aussi d'acteurs relativement nouveaux, parfois liés au secteur des TIC plutôt qu'à celui de l'automobile (p.ex. Waymo (<https://waymo.com/>), Easymile (<https://easymile.com/>)). Plusieurs de ces nouveaux acteurs ont entre-temps conclu des partenariats avec des constructeurs automobiles établis.

Les **voies réservées** aux véhicules autonomes, sur des itinéraires prédéfinis ou dans un environnement délimité, présentent l'avantage que les véhicules sont confrontés à une quantité plus limitée d'informations périphériques:

- des lieux de départ et d'arrêt, par exemple, peuvent être programmés dans le véhicule;
- des balises physiques peuvent contribuer à améliorer la précision de la géolocalisation du véhicule.

En ce qui concerne les navettes autonomes, l'expérience acquise avec ce type de véhicules autonomes dans un environnement de circulation délimité peut aider les développeurs à améliorer les algorithmes qui orientent le comportement du véhicule et à acquérir plus de connaissances sur l'interaction entre le véhicule autonome, son environnement et d'autres usagers de la route³³. Un tel environnement simplifié augmente la fiabilité dans la phase initiale, vu que le nombre de variables est plus faible.

Il existe une grande différence entre les conditions d'utilisation des navettes autonomes (qui ne sont pas homologuées et ne circulent pas encore sur la voie publique pour l'instant) et les véhicules des constructeurs (homologués pour une utilisation sur la voie publique). Les résultats des tests ne sont donc transposables que dans une mesure limitée.

2.6 Mélange de véhicules de différents niveaux SAE

Les prochaines décennies seront donc caractérisées par un **mélange de véhicules de différents niveaux SAE**. Selon toute vraisemblance, les véhicules complètement autonomes (SAE L5), sont susceptibles de trouver leur place dans des situations avec peu d'interaction ou dans des circonstances spécifiques et limitées (dans un *Operational Design Domain* spécifique, ODD) (Redactie Automobiel Management, 2019d). Pensons par exemple à des bandes séparées sur les autoroutes ou à des voies réservées aux bus. Toutefois, cela n'empêche pas que des tests ont déjà lieu dans des situations un peu plus complexes. Exemples de services de navette:

33

En 2020 et 2021, *De Lijn* commencera des expériences avec des navettes autonomes sur les sites des aéroports de Zaventem et d'Anvers. La STIB poursuit ses tests, après le parc de Woluwe et le Campus de Solvay, un nouvel essai suivra près de l'hôpital Brugmann. Des essais auront également lieu à Louvain-la-Neuve.

- dans le quartier des affaires La Défense à Paris, où entre l'été 2017 et l'été 2019, une navette autonome a circulé dans un environnement où les piétons sont nombreux (Klochikhin, 2019; «La navette autonome», 2017);
- dans la région de Rotterdam (Capelle aan den IJssel), où une nouvelle génération ParkShuttle circulera sur la voie publique (Lohmann, s.d.).

Différents **scénarios** sont possibles pour le déploiement de véhicules autonomes. En Suisse, par exemple, des scénarios de développement dans trois domaines d'application ont été envisagés. Des perspectives de développement sont imaginées (sans fixer de délais précis), pour trois catégories de transport (trafic motorisé individualisé, transports en commun sur la voie publique et trafic ferroviaire) (Leeb, 2019).

Stade	Trafic motorisé individualisé	Transports en commun sur la voie publique	Trafic ferroviaire
1	Aide à la conduite SAE L1/L2 sur l'ensemble du réseau	Sections expérimentales	Application isolée
2	SAE L3 autorisés sur les routes à grande vitesse	Minibus (SAE L4) en utilisation normale en agglomération	Sections expérimentales sélectionnées
3	SAE L4 autorisés sur les routes à grande vitesse, SAE L3 autorisés en zone urbaine	Minibus (SAE L5) en utilisation normale en agglomération	Trains automatisés sur certaines parties du réseau
4	SAE L4 autorisés en zone urbaine, SAE L3 sur les routes interurbaines	Minibus (SAE L5) en utilisation normale en agglomération et en dehors	Trains automatisés sur certaines parties du réseau
5	SAE L4 autorisés sur les routes interurbaines, puis SAE L5 autorisés sur l'ensemble du réseau	Tous les véhicules (SAE L5) en utilisation normale en agglomération et en dehors. Transports en commun adaptatifs/sans parcours	Trains automatisés sur l'ensemble du réseau
6	SAE L5 sur l'ensemble du réseau, influence des autorités	Influence des autorités	

Tableau 2.3 – Scénarios de développement des véhicules autonomes dans trois domaines d'application, en Suisse

§ 5.1 Réglementation pertinente.

2.7 Réglementation³⁴

Directive STI européenne

Avec la directive 2010/40/UE (2010), l'Europe a formulé un certain nombre d'objectifs pour les systèmes de transport intelligents. Très brièvement, on peut dire que cette directive vise une utilisation efficace des données des véhicules (ou des systèmes de transport intelligents) pour permettre une utilisation sûre et rapide des infrastructures de transport existantes. Très concrètement, la directive définit **six actions prioritaires** sur lesquelles les premiers efforts devraient être concentrés:

- les services d'information sur les voyages multimodaux (MMTIS);
- les services d'information sur le trafic en temps réel (RTTI);
- un minimum d'informations routières universelles et gratuites pour les usagers;
- eCall;

- des services d'information sur les places de stationnement sûres et sécurisées pour les camions et les véhicules commerciaux;
- des services de réservation de places de stationnement sûres et sécurisées pour les camions et les véhicules commerciaux.

Pour les cinq premières actions, l'Europe a entre-temps publié des **règlements délégués** contenant des directives pour le développement de chaque action dans les différents états membres.

En ce qui concerne les infrastructures, les règlements suivants semblent particulièrement pertinents:

- Le **Règlement Délégué (UE) 2015/962 (2015)** («Services d'information en temps réel sur la circulation») définit, entre autres, quelles données relatives à l'infrastructure doivent être mises à disposition par le biais de services d'information numériques;
- Le **Règlement Délégué (UE) n° 886/2013 (2013)** («Informations minimales universelles sur la circulation liées à la sécurité routière») fixe les informations qui doivent être enregistrées. Ces données peuvent être utiles pour informer les autres usagers de la route, mais peuvent également être un bon outil pour les gestionnaires routiers afin de mieux planifier les interventions.

■ Protocoles de communication

L'Europe a longtemps cherché à imposer une **norme** pour la communication entre les véhicules et entre les véhicules et l'infrastructure routière. Le désaccord entre les parties prenantes a finalement abouti à la non-adoption de ce Règlement Délégué C-ITS et à la poursuite du développement de **plusieurs protocoles de communication** en parallèle (par exemple ITS-G5 et le protocole GSM pour la 5G qui doit encore être déployé). Dans un premier temps, les protocoles de communication existants (3G, 4G, 4,5G) seront utilisés. Pour l'offre de services STI, il faudra tenir compte des caractéristiques spécifiques (restrictions) de ces protocoles et de la disponibilité ou de l'indisponibilité de ce réseau à l'endroit où un service est censé être fourni (**couverture**).

■ Stratégie pour les services C-ITS

En novembre 2016, la Commission européenne a adopté une communication définissant la stratégie pour la poursuite du développement des services dits «C-ITS» vers une mobilité coopérative, connectée et autonome (Commission européenne [CE], 2016b).

Sur la base d'une estimation des coûts et des bénéfices, une liste a été établie. Il s'agit d'une liste de:

- services (**Day 1 services**) qui sont technologiquement réalisables (ou qui le deviendront à court terme) et pour lesquels il y aurait un potentiel de marché;
- services (**Day 1,5 services**) qui devraient être technologiquement réalisables, mais pour lesquels il est nécessaire de conclure d'autres accords entre les différentes parties prenantes.

Hazardous location notifications	Signage applications
Slow or stationary vehicle(s) & Traffic ahead warning	In-vehicle signage
Road works warning	In-vehicle speed limits
Weather conditions	Signal violation / Intersection Safety
Emergency brake light	Traffic signal priority request by designated vehicles
Emergency vehicle approaching	Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA)
Other hazardous notifications	Probe vehicle data
	Shockwave Damping (falls under ETSI Category "local hazard warning")

Tableau 2.4 – Day 1 services pour services C-ITS, Commission européenne

Information on fueling & charging stations for alternative fuel vehicles

Vulnerable Road user protection

On street parking management & information

Off street parking information

Park & Ride information

Connected & Cooperative navigation into and out of the city (1st and last mile, parking, route advice, coordinated traffic lights)

Traffic information & Smart routing

Tableau 2.5 – Day 1,5 services pour services C-ITS, Commission européenne

■ Réglementation belge

La directive européenne sur les STI a été **transposée en droit belge**, et un accord de coopération a été conclu entre le SPF Mobilité et Transports et les Régions sur cette directive.

La directive-cadre sur les STI a également été transposée au niveau régional, et il existe également un certain nombre de documents (décrets, notes conceptuelles).

En concertation avec les partenaires, le SPF Mobilité et Transports a élaboré un **code de bonnes pratiques** d'expérimentation en Belgique. Cela fournit un cadre qui définit les rôles et les responsabilités³⁵.

§ 5.3 Essais: sites d'essai et Living Labs (UE). ³⁵

Chapitre 3

Les CAV et l'infrastructure

Selon le lieu, les **caractéristiques** du trafic existant varient considérablement:

- Les autoroutes sont principalement utilisées par des véhicules motorisés rapides et des conducteurs qui essaient d'effectuer tant des trajets courts que des trajets longs de manière fluide et confortable sur l'infrastructure prévue à cet effet.
- En milieu urbain, la vitesse est nettement inférieure et on constate un mélange de piétons, de cyclistes, de véhicules classiques et de plus en plus de nouveaux moyens de transport (micro-mobilité³⁶).
- Les routes qui assurent souvent un mélange de fonctions résidentielles, d'affaires et commerciales sont caractérisées par un mélange de véhicules qui circulent parfois à des vitesses très différentes.

36

§ 3.3.3 Micro-mobilité émergente.

La composition du trafic existant n'est pas une donnée statique. La politique gouvernementale peut avoir un impact majeur sur la composition et les caractéristiques connexes. C'est le cas dans les villes comme sur les autoroutes. Les villes, en particulier, cherchent à améliorer la qualité de vie urbaine par le biais de diverses mesures affectant l'accès à la ville pour certaines catégories de moyens de transport et/ou la disponibilité de certaines catégories de moyens de transport.

Le déploiement de véhicules autonomes est fortement lié au développement de l'**infrastructure numérique** et est susceptible d'avoir un impact sur l'**infrastructure physique**. Une clarification des deux a été incluse plus loin dans le texte³⁷.

37

§ 3.1 Infrastructure physique et infrastructure numérique.

Selon l'emplacement ou le type d'infrastructure, et selon la manière dont cette infrastructure est utilisée et par qui, l'introduction progressive des véhicules autonomes demandera probablement des adaptations. Afin de clarifier cette distinction, une autre distinction est faite dans le texte entre les **autoroutes** et l'**environnement urbain**³⁸. De l'attention est accordée au court terme et au scénario futur, pour l'instant utopique, où seuls des véhicules automatisés participent encore au trafic.

38

§ 3.2 Autoroutes et § 3.3 Les routes en environnement urbain.

Les exigences en matière d'infrastructure routière sont désormais définies en fonction des besoins des conducteurs humains. Afin de rendre possible le trafic autonome, l'attention devra probablement s'étendre à d'autres aspects également (p. ex., la communication avec la signalisation, la disponibilité ou non d'une représentation numérique de la route, etc.). Dans le **projet Inframix**³⁹, ce que l'on appelle des **niveaux ISAD** (*Infrastructure Support levels for Automated Driving*) ont été développés pour lesquels une impulsion est donnée en vue de définir l'infrastructure minimale requise (physique et numérique) afin de permettre certaines fonctions autonomes. Une telle approche est utile pour préciser quel niveau d'automatisation est possible sur un tronçon routier donné.

39

www.inframix.eu. Voir aussi § 4.2.2 La recherche au service de l'expérimentation.

Diverses organisations, tant en Belgique qu'à l'étranger, mettent en place des essais avec ce que l'on appelle des **navettes** (bus autonomes relativement lents de taille modérée pour un trajet défini). Sur la base des expériences de ces organisations, une dernière partie formule un certain nombre de points d'attention concernant l'infrastructure routière⁴⁰.

40

§ 3.4 Navettes.

Certaines considérations sont pertinentes dans plusieurs situations. Par conséquent, il se peut qu'il y ait des répétitions dans le texte.

3.1 Infrastructure physique et infrastructure numérique

Il est attendu que le fonctionnement des véhicules entièrement automatisés sera en partie basé sur des **cartes (numériques) détaillées** et sur une **localisation GNSS précise**⁴¹. Outre l'aménagement/le tracé de la route (voies, entrées et sorties, etc.), ces cartes contiendront également des informations détaillées sur les règles de circulation en vigueur (vitesses, disponibilité des tronçons, etc.) et la présence d'équipements routiers (dispositifs de retenue routiers, etc.).

41 La précision de Galileo (https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Performances) semble actuellement insuffisante pour le positionnement des véhicules autonomes. Un positionnement précis peut nécessiter l'utilisation de techniques supplémentaires.

Si la configuration de la route change (par exemple, en raison de travaux routiers), il est important que cette **configuration modifiée** soit mise à jour en temps réel sur ces cartes numériques et qu'elle soit immédiatement disponible pour les véhicules qui se fient à ces informations cartographiques dans l'exercice de leur tâche de conduite («Adapting infrastructure», 2016; Transport Systems Catapult, 2017).

D'autre part, l'infrastructure numérique peut également jouer un rôle de **back-up** pour certaines infrastructures physiques (notamment la signalisation). Si les panneaux ou les marquages routiers ne sont pas suffisamment reconnaissables ou si les panneaux à messages variables sont défectueux, l'infrastructure et la communication numériques peuvent toujours garantir que le message correct soit transmis au véhicule.

Lors de la **construction et de l'entretien des routes**, il sera donc probablement extrêmement important que la situation correcte soit encodée dans ce modèle numérique, afin qu'il soit toujours une représentation correcte de l'infrastructure physique réelle.

Le Règlement Délégué (UE) 2015/962 (2015) encourage les parties prenantes à fournir et à tenir à jour des «données routières statiques» et des «données routières dynamiques» au moyen de cartes numériques. Des outils tels que le **Building Information Modeling** (BIM), un modèle numérique d'une construction existante et/ou planifiée composée d'objets avec des informations liées, peuvent sans aucun doute y apporter une contribution non négligeable. En tout état de cause, il semble que les entrepreneurs auront une tâche supplémentaire importante à accomplir pour maintenir ce modèle numérique à jour. Il est possible que des sociétés spécialisées voient le jour pour aider les entrepreneurs, comme c'est parfois le cas lors de l'élaboration des plans de signalisation, des plans de communication et des plans de réduction des nuisances.

Les **gestionnaires routiers** sont susceptibles de jouer un rôle dans la mise à disposition d'informations numériques à partir de leur infrastructure physique. Les constructeurs automobiles et les fabricants de systèmes ADAS utilisent ces informations pour activer certaines fonctions du véhicule. Il est important que de bons accords – européens ou internationaux – soient conclus sur le format de toutes ces données.

En outre, ces informations doivent être communiquées au véhicule de manière fiable et rapide. Un **protocole de communication standardisé** et le **matériel** nécessaire (câblage de données et infrastructure de communication) pour son fonctionnement deviendront une partie importante de l'infrastructure nécessaire au fonctionnement optimal des véhicules autonomes.

3.2 Autoroutes

Les autoroutes sont la connexion entre les pays, les régions, les grandes villes et entre les (aéro)ports importants. Elles sont généralement utilisées par des véhicules motorisés pour un transport fluide et confortable sur une courte ou une plus longue distance.

Les autoroutes semblent être l'environnement par excellence où les véhicules autonomes peuvent fonctionner avec le moins de problèmes possible. La situation de la circulation y est plus simple, les vitesses sont uniformes, il n'est pas nécessaire de tenir compte de carrefours ou de trafic en sens inverse, ni de cyclistes ou de piétons. La mise en œuvre sur les autoroutes est la **moins complexe** (Vermaat et al., 2017). Néanmoins, il convient de garder à l'esprit que pendant un certain temps encore, la majorité des véhicules circulant sur les autoroutes n'auront pas de fonctions autonomes ou que leurs fonctions autonomes seront limitées.

3.2.1 Projets de directive

Pour la conception de l'infrastructure routière, des projets de directive partageant des connaissances et de l'expertise cruciales, sont au service des concepteurs. Dans cette partie, nous prêtons attention à un certain nombre d'éléments importants des projets de directive.

A la base de ces projets de directive, on trouve un certain nombre de **concepts**, tels que la route qui s'explique et la route qui pardonne. Ils constituent la philosophie des projets de directive et servent à réduire le risque d'erreurs commises par les conducteurs humains et les conséquences de ces erreurs.

Dans le **scénario de transition**, les conducteurs humains et les erreurs qu'ils peuvent éventuellement commettre doivent toujours être pris en compte. Les concepts de route qui pardonne et de route qui s'explique restent pleinement valables aussi longtemps que l'**intervention humaine** est **nécessaire**: ils constituent un point de référence important pour limiter les erreurs et en réduire les conséquences.

Dans un **scénario complètement autonome** cependant, il n'y a plus de conducteurs humains. Si la fiabilité des systèmes peut être garantie, la conception d'une autoroute devra dès lors moins prendre en compte les conducteurs humains. D'autre part, il n'est pas inconcevable que les systèmes automatisés tombent eux aussi en panne. Il reste à examiner si l'infrastructure peut jouer un rôle dans la résolution de ces situations problématiques (p. ex., zone de dégagement pour les dysfonctionnements de véhicules individuels, autres modifications pour traiter en toute sécurité des situations problématiques plus importantes, etc.).

Tracé de la route (horizontal + vertical)

Le tracé d'une route est également déterminé par le paysage et les bâtiments existants. Dans la situation actuelle avec des conducteurs humains, de longs tronçons de route rectilignes sont évités (limitation de la position droite horizontale) afin de retenir l'attention de l'utilisateur de la route. Cela confère à la route un tracé sinueux. Cela restera important tant que la part des véhicules autonomes de niveau SAE élevé ne sera pas prédominante⁴².

Afin d'effectuer une tâche de conduite en toute sécurité, il est important que le conducteur ait une bonne vision du tracé de la route, que tout obstacle puisse être détecté à temps et qu'il ait suffisamment de temps pour ralentir ou s'arrêter en toute sécurité si nécessaire. Les recommandations relatives au **tracé géométrique** d'une route sont en grande partie basées sur la nécessité pour un conducteur humain de conserver une bonne **vue d'ensemble** de la route et des autres véhicules. Pour les véhicules autonomes qui ne fonctionnent que sur la base de capteurs de véhicule,

42

§ 2.4 Déploiement des CAV & obstacles.

cette exigence sera maintenue et les directives actuelles concernant les infrastructures utilisées par les conducteurs humains pourront être maintenues.

Lors de la conception des virages, les projets de directive supposent une rugosité et une pente transversale minimales ainsi qu'une certaine vitesse de conception. En outre, une certaine marge est prise en compte pour les conducteurs qui ne respectent pas les vitesses recommandées. Les recommandations pour le tracé des courbes verticales sont alors principalement déterminées par les souhaits d'une vue d'ensemble du tracé de la route (courbes de point haut) ou d'un tracé confortable (courbes de point bas).

Les véhicules connectés, en revanche, peuvent obtenir les informations sur le tracé de la route (éventuellement limitées à certains ODD) par le biais de systèmes numériques (informations de navigation détaillées, communication V2X). Dans ces cas, la nécessité d'une bonne vue d'ensemble de la route et de l'environnement routier peut devenir moins contraignante. D'autre part, le tracé de la route doit être adapté aux exigences de confort des usagers de la route.

À mesure que la proportion de véhicules autonomes augmente, des **voies réservées à des groupes cibles** peuvent être introduites pour les véhicules d'un niveau SAE plus élevé. Ces voies pour la conduite autonome pourraient être plus étroites. Toutefois, il faut éviter que les conducteurs humains utilisent les voies pour les véhicules automatisés ou imitent le comportement des véhicules autonomes. Cela pourrait entraîner des vitesses trop élevées (dans les virages) ou des distances trop courtes entre les véhicules (Morsink et al., 2016).

Les (grandes) **différences de vitesse** posent problème à la sécurité routière. Les interactions entre les véhicules roulant à des vitesses différentes restent difficiles. Lors de la construction d'infrastructures, la sécurité routière tire profit d'une vitesse uniforme. Les véhicules autonomes permettent de réduire plus facilement les différences de vitesse entre les voitures particulières.

Par exemple, dans un scénario avec 100 % de véhicules SAE L5, la limitation de la position droite horizontale pour retenir l'attention d'un conducteur humain ne serait plus nécessaire (Morsink et al., 2016). La question reste de savoir dans quelle mesure l'effort d'adaptation de la route l'emporte sur les coûts.

Grâce à un positionnement précis, les **véhicules SAE L5** (connectés) peuvent mieux maintenir leur trajectoire et (grâce aux informations cartographiques embarquées) mieux anticiper une modification du tracé de la route. En conséquence, la vitesse dans un virage peut être légèrement plus élevée ou le **rayon de courbure** peut être limité. Pour cela, la rugosité et la pente transversale de la route doivent être suffisantes pour permettre ces vitesses plus élevées. D'autre part, le confort des occupants des véhicules autonomes et l'impact éventuel sur la consommation d'énergie doivent également être pris en compte lors de la réduction du rayon de courbure ou de l'augmentation de la vitesse.

Si les autoroutes devaient être utilisées exclusivement par des véhicules entièrement autonomes, les recommandations relatives au tracé de la route pourraient alors évoluer (Paulsen, 2018). Mais pour l'instant, il s'agit d'un **scénario** tout à fait **utopique**. Tant qu'il y aura des véhicules non automatisés circulant sur les autoroutes, les conducteurs humains doivent rester le point de départ des projets de recommandations. Les véhicules autonomes doivent donc tenir compte de l'infrastructure telle qu'elle est conçue et construite aujourd'hui. Ce n'est que lorsque tous les véhicules seront autonomes, et à condition qu'ils puissent gérer une géométrie de route modifiée, que des adaptations efficaces de cette géométrie pourront être envisagées. Les possibilités des nouveaux

véhicules évoluent rapidement. Il est judicieux de **confronter périodiquement les projets de recommandations** à ces nouvelles possibilités et d'examiner si des ajustements rationnels, à l'épreuve du temps sont possibles.

Largeur et occupation des voies

Moyennant un positionnement suffisamment précis et fiable, un CAV peut éventuellement se contenter d'une voie de circulation plus étroite (Morsink et al., 2016; Paulsen, 2018). En rétrécissant les voies des routes existantes et en réduisant légèrement la largeur des bandes d'arrêt d'urgence et de la berme centrale, il est même possible dans certains cas de créer une voie supplémentaire (Farah, 2016; Paulsen, 2018). Toutefois, pour les véhicules avec un conducteur humain, les **recommandations** actuelles en matière de largeur de voie devraient être **maintenues**. De plus, les voies doivent encore être suffisamment larges pour permettre le passage des véhicules d'intervention.

Dans le cas d'une voie plus étroite, il y a moins de dispersion sur la position latérale d'un CAV. La réduction de la largeur des voies, conjuguée à une éventuelle augmentation du taux d'occupation des véhicules et à l'accroissement de leur masse, signifie que la structure de la chaussée est davantage **chargée**. Les expériences avec les navettes autonomes, bien qu'elles n'aient pas eu lieu sur autoroutes, montrent parfois une usure accrue du revêtement routier dans la trajectoire du véhicule après des périodes relativement courtes. En ce sens, les structures routières moins sensibles à l'usure semblent être un meilleur choix pour les véhicules autonomes.

Le **sentiment de sécurité des passagers** (marge de crainte) d'un véhicule autonome (Farah, 2016; Morsink et al., 2016) doit également être pris en compte si un véhicule autonome se rapproche d'un autre dans des voies rétrécies.

La Belgique autorise spécifiquement les **motocyclistes** à dépasser (sous certaines conditions) le trafic plus lent entre les voies. Si les voies devenaient plus étroites, cela deviendrait impossible.

Aux moments où le trafic est dense, la capacité maximale des autoroutes est atteinte, voire dépassée. On suppose que la **capacité des voies** utilisées exclusivement par des véhicules autonomes – en raison des distances plus courtes entre ces derniers – peut augmenter jusqu'à 30 %. Même sans augmenter la vitesse, en tant que mesure transitoire vers un scénario de véhicules 100 % autonomes, la capacité du réseau disponible peut ainsi être augmentée (Vermaat et al., 2017; Wilmink, Calvert, de Kievit, Landen & Zlocki, 2017).

Cependant, l'expérience des voies réservées aux véhicules électriques en Norvège a démontré que ces voies étaient très rapidement saturées⁴³. En général, l'augmentation de la capacité peut entraîner une demande accrue d'utilisation de véhicules autonomes au détriment des autres modes de transport. Les conséquences en termes de répartition modale ne sont pas claires.

43

Il convient de noter que la Norvège a mis en œuvre plusieurs mesures visant à électrifier rapidement son parc automobile.

Dans un scénario où des véhicules ayant des degrés d'automatisation différents partagent la même section de voie, l'ajustement de l'occupation de la voirie n'est pas à l'ordre du jour. En outre, il apparaît en pratique que la **distance** entre les véhicules autonomes et les véhicules non autonomes (trafic mixte) est plus élevée que la distance entre les véhicules avec uniquement des conducteurs humains (les conducteurs humains regardent plus loin que le véhicule suivant). A mesure que de plus en plus de personnes vont commencer à se fier à la technologie des véhicules, il semble donc

que si l'infrastructure ne change pas (ou si l'utilisation de l'infrastructure existante ne change pas), la fluidité du trafic diminuera encore davantage.

Pour faciliter la circulation aux heures de pointe, il est déjà possible d'aménager des (nouvelles) autoroutes avec une règle de «voie à affectation variable». Il s'agit d'un aménagement dynamique des voies, avec une ou plusieurs voies à sens de circulation variable. L'annonce d'un changement de répartition peut se faire au moyen de PMV, éventuellement complétés par des séparateurs de voies mobiles.

Dans un **scénario futuriste**, les **voies** séparées physiquement peuvent devenir **superflues** et la largeur de route disponible peut être répartie de manière souple et dynamique en voies en fonction du moment de la journée, des conditions météorologiques et du trafic en présence (les fameuses voies réservées à des groupes cibles), éventuellement même avec des régimes de vitesse différents. L'attribution des voies peut se faire via la communication I2V. Si les camions autonomes sont exclus d'une ou plusieurs voies par l'automatisation, les voies sur les tronçons de route où l'interaction est nulle ou très limitée peuvent être réduites. Aux endroits où il y a beaucoup d'échanges (entrées et sorties), le rétrécissement n'est peut-être pas indiqué.

La capacité des voies utilisées exclusivement par des véhicules autonomes pourrait être augmentée jusqu'à 30 % en réduisant la distance entre les véhicules. Cet aspect combiné à l'augmentation du poids des véhicules signifie que la chaussée doit supporter une charge plus importante. Lors de la (re)construction de ponts et d'ouvrages d'art, il peut donc être judicieux de prendre en compte des **charges plus élevées**.

Toutefois, il est **difficile d'estimer** à partir de quand cela devient **pertinent**. Il faudra sans nul doute des dizaines d'années avant que l'ensemble du parc automobile soit autonome et que la largeur des voies et l'occupation de la route puissent être effectivement adaptées. Les infrastructures qui sont construites aujourd'hui devront probablement être remplacées avant qu'il n'y ait un parc de véhicules entièrement autonomes.

■ Voies d'insertion et de sortie / voies d'entrecroisement

Le **dimensionnement** des voies d'insertion et de sortie, des voies d'entrecroisement et des structures parallèles similaires (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap [MVG], Agentschap Wegen en Verkeer [AWV], Afdeling Expertise Verkeer en Telematica, Team Veiligheid en Ontwerp, 2018) doit permettre aux véhicules d'entrer ou de sortir sans différences de vitesse excessives avec le trafic de transit et d'utiliser de manière optimale la capacité de la route (dans le cas des voies d'entrecroisement).

Dans le cas d'un trafic mixte, l'interaction entre les véhicules automatisés et non automatisés risque d'être un peu moins fluide. Il est donc possible que de tels points d'échange doivent être légèrement plus grands pour permettre une circulation fluide (Morsink et al. 2016). La (re)construction d'infrastructures peut y répondre en **prévoyant** déjà de l'**espace** pour rendre facilement possible une extension ultérieure.

D'autre part, il est à noter qu'à l'heure actuelle, un grand nombre de conducteurs n'utilisent pas toujours les longues voies d'**entrecroisement** à bon escient (ces voies ont pour but de permettre de sortir rapidement ou bien de s'insérer juste à la fin de celles-ci). Les automobilistes sont souvent tentés de quitter la file par la voie d'entrecroisement afin de dépasser le ralentissement puis de s'insérer à nouveau dans le trafic. La signification de la signalisation d'une voie d'entrecroisement ne semble pas suffisamment claire ou l'utilisation correcte de cette section de route n'est pas suffisamment connue.

Des **structures parallèles plus longues** (ou la possibilité de les prolonger) semblent judicieuses pour le trafic mixte. On peut supposer que les véhicules autonomes – s'ils sont correctement programmés – feront bon usage de cet espace supplémentaire. Cependant, les conducteurs humains devraient être encouragés à faire un usage approprié de cet espace supplémentaire.

Dans le cas d'une circulation entièrement autonome, l'insertion et la sortie peuvent être automatisées grâce à la communication entre les véhicules concernés (Morsink et al., 2016). Il est important de prévoir un espace suffisant à cet effet. Pour certaines sorties, une augmentation de la capacité peut s'avérer judicieuse. Même si cela n'est pas nécessaire selon les recommandations actuelles, il semble intéressant de **prévoir un espace suffisant** pour étendre la capacité des structures parallèles, si cela s'avère nécessaire ultérieurement pour un échange sécurisé du trafic automatisé.

Bande d'arrêt d'urgence / emplacements d'arrêt d'urgence / voie d'intervention

Par défaut, les autoroutes sont équipées d'une bande d'arrêt d'urgence. Les **bandes d'arrêt d'urgence** permettent de s'arrêter en toute sécurité en cas de panne et de limiter les inconvénients pour les autres usagers de la route, mais ne sont pas un lieu sûr où l'on peut rester.

Sur certaines sections, la bande d'arrêt d'urgence peut être convertie en **voie de circulation aux heures de pointe**. Dans ce cas, des emplacements d'arrêt d'urgence doivent être prévus à intervalles réguliers. Le *Vademecum Weginfrastructuur* (Flandre) recommande de prévoir des bandes d'arrêt d'urgence suffisamment larges pour permettre une utilisation alternative à un stade ultérieur (MVG, AWV, Afdeling Expertise Verkeer en Telematica, Team Veiligheid en Ontwerp, 2018).

Un véhicule automatisé peut décider de s'arrêter sur la bande d'arrêt d'urgence ou sur un emplacement d'arrêt d'urgence si, par exemple, l'occupant ne se sent pas bien ou n'est pas en mesure de prendre le contrôle du véhicule si on le lui demande. Cependant, sur une bande d'arrêt d'urgence, cela peut engendrer des situations dangereuses si les occupants ne peuvent plus quitter le véhicule. En ce sens, les **emplacements d'arrêt d'urgence** semblent être une meilleure solution qu'une bande d'arrêt d'urgence continue. L'endroit où se situent ces emplacements d'arrêt d'urgence doit être connu des véhicules autonomes. Avec l'augmentation du nombre de véhicules autonomes ou de véhicules équipés d'un *Driver Fatigue Monitor* (DFM) dans le trafic, l'utilisation de ces emplacements risque d'augmenter et il faudra envisager d'en adapter le nombre et les dimensions (Transport Systems Catapult, 2017).

D'autre part, un nombre suffisant d'emplacements reste nécessaire pour les interventions (entretien et gestion des incidents).

Profil transversal

Le **profil transversal classique** d'une autoroute est constitué de deux revêtements, chacun avec un certain nombre de voies, séparées par une berme centrale et sur les côtés extérieurs une bande d'arrêt d'urgence avec ou sans accotement revêtu sur les côtés. Sur la berme centrale, les deux sens de circulation sont séparés par un dispositif de retenue routier. S'il y a des obstacles dangereux sur l'accotement, ils sont également protégés par un dispositif de retenue en métal ou en béton.

Pour le **trafic mixte**, cela reste la **solution privilégiée**. Dans certains cas (pas d'obstacles tels que des poteaux d'éclairage ou des piliers de pont dans la berme centrale), il semble qu'un simple dispositif de retenue dans la berme centrale offre des avantages par rapport à un système double. En laissant un peu plus d'espace entre le bord de la voie et le dispositif de retenue, on donne au conducteur plus de chance de corriger un comportement anormal et on réduit légèrement le risque de collision avec ce dispositif.

Si les autoroutes sont **exclusivement** utilisées par des véhicules autonomes (SAE L5), une adaptation du profil transversal peut être envisagée. La largeur de la zone de sécurité, une partie importante du concept de la route qui pardonne, pourrait par exemple être réduite (Farah, 2016; Morsink et al., 2016).

Si, dans un avenir lointain, tous les véhicules sont autonomes, les systèmes de maintien de la trajectoire garantiront que ces véhicules restent sur leur voie. Dans ce cas, les voies de circulation, les bermes latérales, les zones de sécurité et la berme centrale pourraient être **rétrécies**, voire devenir **superflues**. Cela pourrait conduire à la mise en place de voies supplémentaires dans le revêtement existant (Farah, 2016; Transport Systems Catapult, 2017).

Les recommandations pour la construction de routes devront toutefois continuer à tenir compte des **conducteurs humains** et des **erreurs** qu'ils commettent pendant un certain temps encore. Dans un avenir où l'automatisation prendra de plus en plus en charge les tâches d'un conducteur humain ou la correction de ses erreurs, l'environnement routier devra peut-être être adapté selon la fiabilité avec laquelle les véhicules autonomes fonctionnent (ITF, 2018).

■ Convois de poids lourds

Le secteur du transport encourage depuis plusieurs années la formation de convois de poids lourds. En permettant aux poids lourds de voyager en convoi, il est possible de réduire les émissions et de transporter les marchandises plus efficacement qu'avec des poids lourds traditionnels. Dans un convoi de poids lourds, c'est un chauffeur humain qui conduit le **véhicule de tête**. Si les véhicules suivants sont (partiellement) automatisés, ils communiquent avec le véhicule de tête et répondent automatiquement aux signaux envoyés par ce dernier. La vitesse de réaction de ces systèmes automatiques est supérieure à celle d'un conducteur humain (Paulsen, 2018).

Un convoi de deux ou trois véhicules prend beaucoup plus de place qu'un poids lourd individuel. Un convoi entraîne également des charges plus importantes sur la chaussée et sur les ponts. En outre, des **projets pilotes** ont montré que la longueur de ces convois entraîne des difficultés d'insertion et de sortie, ainsi que pour les dépassements. Si un convoi change de voie ou doit prendre un virage, les autres usagers de la route peuvent en subir les inconvénients en raison de la limitation temporaire de la vue d'ensemble du reste du trafic. Il importe peu que le convoi soit constitué (en partie) de véhicules automatisés (Paulsen, 2018).

En raison de l'espace supplémentaire qu'ils occupent par rapport à un véhicule individuel, le *truck platooning* (formation de convois de poids lourds) n'est possible que sur **certains itinéraires**. Certains pays envisagent de mettre en place des infrastructures réservées à l'usage exclusif du fret et des convois de poids lourds (Ohern, 2016).

En automatisant également les convois de poids lourds, l'espace requis peut être quelque peu limité, de sorte qu'un plus grand nombre d'itinéraires sont éligibles pour ces convois.

La vitesse de réponse plus élevée attribuée aux véhicules automatisés s'applique également aux convois de poids lourds autonomes. Si d'autres marges de sécurité (vitesse) sont également optimisées, l'**espace** occupé par les convois sur la route peut être légèrement réduit. Pour les routes existantes, l'automatisation des convois de camions peut élargir légèrement l'application de ce système. Lors de la construction de nouvelles routes accessibles uniquement aux véhicules autonomes (y compris aux convois de poids lourds), les exigences relatives au tracé géométrique peuvent être assouplies et la route peut mieux s'adapter au tracé du terrain (Paulsen, 2018).

3.2.2 Influence des véhicules autonomes sur la structure de la chaussée

Occupation / structure de la route

Lorsque tous les véhicules seront autonomes, la **capacité** de l'infrastructure existante pourra probablement être augmentée en rapprochant les véhicules les uns des autres et en réduisant la largeur des voies. Le simple fait de réduire la distance entre les véhicules permettrait un gain de capacité pouvant aller jusqu'à 30 %.

La demande croissante de mobilité et l'augmentation du trafic qui en résultera seront dues en partie au transport individuel et en partie au transport collectif et au fret.

L'influence de l'électrification des véhicules sur la **masse** semble aller dans deux directions. D'une part, les véhicules électriques à grande autonomie nécessitent une capacité de batterie supplémentaire, ce qui rend ces véhicules généralement plus lourds que les modèles comparables équipés d'un moteur à combustion. D'autre part, des voitures électriques à autonomie limitée sont également en cours de développement (par exemple, uniquement pour le trafic urbain ou les déplacements domicile-travail sur une distance limitée). Pour une autonomie limitée, une batterie de moindre puissance (et de moindre poids) est suffisante. Ces véhicules peuvent donc être allégés.

Dans la pratique, il semble qu'en ce moment le **poids des véhicules** tend plutôt à augmenter⁴⁴.

Toutes ces évolutions laissent penser que les routes **seront plus fortement chargées** à l'avenir. De plus, le nombre plus important de véhicules (voitures particulières et poids lourds) ne fera qu'augmenter les conséquences de l'indisponibilité d'une (section de) route. Des routes durables (dans le sens d'une durée de vie suffisante) et une grande disponibilité gagnent en importance (Paulsen, 2018).

Dans la **situation de transition**, il semble toutefois probable que la capacité d'une route diminuera légèrement afin de ne pas provoquer de situations dangereuses. La vitesse de réaction élevée des véhicules autonomes nécessite, pour les véhicules non autonomes, une distance plus importante entre eux afin de pouvoir s'arrêter à temps si nécessaire. En ce sens, il ne semble pas immédiatement nécessaire de modifier radicalement les structures routières. Toutefois, les routes construites aujourd'hui doivent également pouvoir servir si, dans un avenir relativement proche, des voies sont réservées aux véhicules autonomes, qui roulent par exemple avec des distances plus courtes entre eux (*High occupancy toll lanes* (Farah, 2016)). Les initiatives qui augmentent la **durabilité des routes** et/ou les techniques qui permettent des **réparations rapides** semblent donc déjà utiles pour le trafic non automatisé. Plus la proportion de véhicules autonomes augmente, plus cela devient pertinent.

44

§ 2.2.6 Efficacité énergétique et respect de l'environnement.

Lors de la **construction ou de la rénovation de ponts**, il est également préférable d'examiner si la structure est capable d'absorber en toute sécurité des charges de trafic plus élevées à l'avenir.

Qualité du revêtement routier

La qualité du revêtement routier reste un point d'attention important.

Les véhicules connectés peuvent constituer une source de données intéressante pour les gestionnaires routiers, qui peuvent ainsi obtenir une image plus précise de l'état du revêtement et planifier plus efficacement des réparations et un entretien⁴⁵.

§ 2.1.1 Connectés, autonomes et § 3.3.7 Infrastructure et services numériques.

Il convient d'éviter que de petites irrégularités dans le revêtement n'engendrent une **détection erronée** par des véhicules autonomes ou des systèmes d'aide à la conduite (par exemple, détection erronée d'un joint longitudinal comme un marquage), ce qui entraînerait un comportement inattendu. Il semble plausible que les caractéristiques des véhicules autonomes entraînent des exigences différentes en matière de qualité du revêtement routier (Morsink et al., 2016).

Indépendamment des développements dans le domaine du transport autonome, il reste nécessaire d'utiliser des revêtements routiers qui répondent à des **exigences minimales**. Il faudra toujours trouver un équilibre entre le confort de conduite, la sécurité, la consommation de carburant, le bruit de roulement, etc. Il est logique d'accorder une attention particulière à ces caractéristiques de surface lors de l'exécution et de l'entretien et d'utiliser des techniques qui visent une qualité durable du revêtement routier. Pour l'instant, il semble plus important que les exigences actuelles en matière de caractéristiques superficielles soient effectivement respectées (et qu'une route continue à les respecter) que de renforcer ces exigences.

Capteurs dans la structure routière

Outre les véhicules intelligents et l'infrastructure numérique, des **capteurs** peuvent également fournir des informations utiles aux gestionnaires routiers et contribuer à une meilleure utilisation, plus sûre des routes. Les capteurs peuvent stocker et transmettre des informations sur le volume du trafic, sur les obstacles invisibles sur ou le long de la route ou même servir de système de guidage alternatif pour les véhicules (Clapaud, 2017) ou pour augmenter **la précision et la fiabilité du positionnement** basé sur les systèmes GNSS (GPS, Galileo, etc.)⁴⁶. Cependant, il est alors crucial que ces capteurs aient une autonomie comparable à la durée de vie de la structure routière dans laquelle ils sont utilisés (Clapaud, 2017).

Techniques alternatives de positionnement des véhicules autonomes. Voir Voronov, Hultén, Wedlin & Englund (2016).

3.2.3 Equipement routier

Visibilité et harmonisation des marquages routiers et panneaux de signalisation

Les marquages routiers et panneaux de signalisation sont aujourd'hui la **méthode par défaut** pour indiquer aux usagers de la route où ils sont autorisés à rouler et quel est le comportement que l'on attend d'eux. Cependant, il existe déjà sur le marché des véhicules équipés de **technologies** permettant de reconnaître les messages que ces marquages et ces panneaux de signalisation envoient et soit de les transmettre au conducteur, soit de contrôler le comportement du véhicule (par exemple, LKA).

Un **marquage** (permanent) et bien visible dans toutes les conditions météorologiques est donc important, à la fois pour les conducteurs humains et pour le bon fonctionnement de la génération actuelle de systèmes d'aide à la conduite. En plus d'être suffisamment visibles, il importe cependant que les marquages existants soient uniformes et aient une seule et unique signification.

Pour les systèmes de détection en particulier, un **contraste** suffisant entre le marquage et le revêtement est important afin que le marquage soit reconnaissable (Somers, 2019d). L'importance des marquages bien visibles pour les systèmes de détection est sujette à évolution. Les nouvelles caméras et les techniques de traitement de l'image posent de moins en moins d'exigences aux marquages.

Pour les **panneaux de signalisation**, une bonne visibilité et une harmonisation sont tout aussi importantes. De plus, il est préférable de limiter les différences entre les différents pays et régions. Dans le cas des panneaux de signalisation, des informations complémentaires sont parfois données par le biais de textes (panneaux additionnels). Pour la génération actuelle de capteurs de véhicules, il n'est pas évident de reconnaître et d'interpréter correctement toutes les différentes possibilités. Cela deviendra probablement beaucoup plus simple quand il existera une représentation numérique de l'infrastructure physique et des règles de circulation applicables ou qu'il y aura une communication entre les panneaux de signalisation et les véhicules.

La visibilité et la reconnaissabilité de la signalisation doivent être suffisantes pour assurer certaines fonctions dans les véhicules autonomes. D'un autre côté, les **systèmes de détection des véhicules autonomes connectés** peuvent aussi potentiellement enregistrer et communiquer les endroits où cette visibilité et cette reconnaissance sont insuffisantes. De cette manière, il est possible de détecter plus efficacement les endroits où un entretien s'avère le plus nécessaire. Tant les véhicules autonomes que les conducteurs humains tireront profit de cette situation win-win. Une condition préalable à un tel système est, bien entendu, de parvenir à des accords sur l'échange de données.

A long terme, lorsque tous les véhicules seront entièrement automatisés et que toutes les informations dont les véhicules ont besoin pour leur tâche de conduite seront disponibles via l'infrastructure numérique, l'**importance des panneaux de signalisation** pour les usagers de la route automatisés pourra diminuer. Toutes les informations actuellement fournies aux conducteurs humains par le biais de panneaux de signalisation (limitations de vitesse, règles de priorité, etc.) pourront alors être stockées dans des bases de données et mises à la disposition des véhicules autonomes par le biais de systèmes numériques. Ainsi, les règles de circulation en vigueur sur un tronçon de route donné pourront devenir beaucoup **plus dynamiques** (par exemple, en cas de travaux routiers, d'accidents ou de mauvaises conditions météorologiques). Le long des routes qui sont également empruntées par des usagers non automatisés (cyclistes, piétons), la signalisation reste probablement le meilleur moyen d'informer ces usagers sur le comportement que l'on attend d'eux.

Dispositifs de retenue

Les dispositifs de retenue doivent être en mesure de **protéger l'environnement** contre les intrusions involontaires de véhicules qui quittent la route. Dans le même temps, les conséquences de ces collisions pour les **occupants** du véhicule impliqué doivent rester limitées. Ces deux aspects sont évalués selon des méthodes d'essai européennes existantes.

Les véhicules semblent devenir tout sauf plus légers. Les véhicules électriques sont plus lourds que le même modèle à moteur à combustion interne. Même si davantage d'efforts sont faits à l'avenir pour promouvoir les transports collectifs, il semble que la masse des véhicules ne diminuera pas. De nouveaux développements dans le domaine des dispositifs de retenue routiers feraient mieux de tenir compte de cette tendance.

Certainement tant qu'il y aura des conducteurs humains, les dispositifs de retenue resteront un moyen important de limiter les conséquences des accidents, tant pour les occupants du véhicule que pour l'environnement. Si les véhicules autonomes fonctionnent correctement, les **accidents «simples»** devraient appartenir au passé. Dans ce cas, il se peut que les dispositifs de retenue deviennent superflus ou soient réservés aux endroits à très haut risque ou le long des routes qui n'ont pas encore été adaptées à la conduite automatisée. Dans ces cas, ces installations sont bien entendu appelées à **évoluer** avec le parc automobile. D'autre part, les dispositifs de retenue – comme alternative aux marquages routiers – peuvent également être utilisés pour le guidage du trafic (Morsink et al., 2016).

Panneaux à Messages Variables (PMV)

Les panneaux à messages variables sont de plus en plus utilisés pour transmettre des messages aux conducteurs et pour guider la circulation. Pour l'instant, ces messages sont principalement interprétés par des conducteurs humains. Vu que de plus en plus de véhicules sont équipés de capteurs, il devient important que ces **capteurs**, en plus de reconnaître les panneaux statiques classiques, soient également capables de reconnaître les messages de ces panneaux à messages variables.

La génération actuelle de caméras semble moins apte à gérer les *scanned LED arrays* (Vantomme, 2019). Les *Pulsed LED arrays* ou **PMV** qui peuvent être équipés de technologies de communication offrent donc plus de sécurité pour l'avenir.

Comme pour les panneaux de signalisation et les marquages routiers, le **rôle des panneaux à messages variables** est susceptible de diminuer à long terme. Les informations dont un véhicule a besoin pour accomplir sa tâche de conduite pourront alors être transmises par des systèmes numériques.

3.3 Les routes en environnement urbain

Dans un environnement urbain, le défi pour les véhicules autonomes est d'une **nature** différente et souvent **plus complexe que sur les autoroutes**.

La situation dans un environnement relativement homogène tel qu'une **autoroute**, où il n'y a d'interaction qu'entre les véhicules, est particulière. La vitesse maximale autorisée est élevée, mais les différences de vitesse entre les véhicules restent limitées. La plupart des croisements sont des croisements dénivelés et il y a plusieurs voies situées l'une à côté de l'autre. C'est dans cet environnement que les directives de conception de l'infrastructure peuvent évoluer en fonction de la proportion de véhicules autonomes ayant un niveau SAE élevé.

Dans un **environnement urbain**, nous sommes confrontés à des routes non homogènes et à un usage très diversifié.

3.3.1 Défi dans un contexte urbain

Du côté positif pour les véhicules autonomes, on peut noter la **vitesse** et l'**urbanisation**.

- Les limitations de vitesse en ville étant inférieures, la distance d'arrêt est plus courte.
- Par rapport à un véhicule avec conducteur, un véhicule autonome présente l'avantage que la forme et la structure des constructions situées à côté de la route jouent un rôle limité dans l'exécution de la tâche de conduite. Un conducteur subit continuellement des impressions visuelles et est également distrait par des objets ou des événements en bordure de route qui ne sont pas pertinents pour la tâche de conduite. L'attention des véhicules autonomes se concentre uniquement sur l'exécution de la tâche de conduite. En outre, un véhicule autonome peut prendre en compte des événements ou des situations qui ne sont pas encore visibles, sur la base des données communiquées. Grâce à ces informations, un véhicule autonome peut prendre des décisions en matière de sécurité routière, par exemple en adaptant son itinéraire ou sa vitesse.

La plus grande complexité de la situation dans un contexte urbain par rapport aux autoroutes est liée à la **nature non homogène des routes** et à leur utilisation.

- Les gens empruntent les routes pour des **déplacements variés** avec **toutes sortes de véhicules**: à pied, à vélo, en cyclomoteur, en voiture, à moto, en camion et, depuis quelque temps, divers types de micro-mobilité. Dans un environnement urbain, une part importante des usagers de la route n'est pas encore connectée au réseau de transport. Les véhicules autonomes doivent avant tout être capables de détecter eux-mêmes correctement ces utilisateurs.
- Il existe un grand nombre et une grande **variété d'objets** qui peuvent ou non faire partie de la chaussée (poteaux de signalisation routière, poteaux d'éclairage, caméras de vitesse, clôtures, râteliers à vélos, pylônes électriques, panneaux publicitaires, mobilier urbain, dispositifs ralentisseurs, etc.). Une **représentation numérique correcte** de l'emplacement et des caractéristiques physiques pertinentes peut être importante pour permettre au véhicule autonome de faire ses choix. Par exemple, dans le cas de dispositifs le long de routes où des vitesses plus élevées sont autorisées, il peut être intéressant de disposer d'informations sur la sécurité passive du dispositif. Les VA peuvent alors utiliser ces informations pour évaluer le risque de collision.
- Il convient de **distinguer** les véhicules qui doivent pouvoir circuler partout (voitures automatisées) des véhicules qui circulent sur un itinéraire prédéfini (navettes). Les navettes se distinguent par le fait que les itinéraires sont codés sur une carte⁴⁷.

47

§ 3.4 Navettes.



Figure 3.1 – Déplacements variés (Gabriel12, s.d.)

3.3.2 Rôles et intérêts

Les parties concernées ont toutes des intérêts, qu'il convient de **concilier** pour que les véhicules autonomes puissent apporter une contribution positive aux défis auxquels sont confrontées les villes (inclusion, aspects environnementaux, sécurité, accessibilité, qualité de vie, etc.).

Pour les **constructeurs automobiles**, la rentabilité reste le maître-mot. Outre la vente traditionnelle de véhicules, une gamme de services s'ajoute de plus en plus souvent, comme l'offre d'un forfait de mobilité et l'entretien d'une flotte de véhicules. Les véhicules doivent répondre à des exigences en matière de sécurité et d'environnement (émissions, bruit).

Les **sociétés de transports en commun** proposent des modes de transport alternatifs pour répondre à la demande de déplacements. Les véhicules utilisés (bus, trams ou métros, etc.) et les véhicules du futur (navettes et taxis robots) doivent être sûrs, propres et accessibles.

L'intérêt des **gestionnaires de l'espace public**, les villes et communes, réside dans la défense des intérêts des citoyens en termes d'accessibilité, de qualité de vie et de sécurité routière.

Certains experts s'attendent à ce que l'introduction inconsidérée de véhicules autonomes dans un environnement urbain ait un effet plutôt négatif sur la **qualité de vie** dans une ville. Ils estiment qu'une introduction inconsidérée de véhicules autonomes augmentera le trafic (par exemple en passant des transports en commun à des services de transport automatisés, à cause des véhicules qui roulent «à vide» – des «voitures zombies», de l'augmentation du nombre de kilomètres parcourus en raison de l'augmentation du transport partagé, etc.) (Smolnicki, 2017)⁴⁸. Il est donc important de considérer l'introduction des voitures autonomes comme une **opportunité** de repenser la mobilité urbaine.

Voir aussi, en ce qui concerne la demande latente de transport, § 2.2.3 Congestion.

La mobilité autonome ressemble à une arme à double tranchant. D'une part, il y a de grandes chances pour que les transports deviennent plus sûrs et plus accessibles. D'autre part, sans cadre approprié, l'introduction de la mobilité autonome peut également avoir un certain nombre d'effets secondaires (glissement des transports en commun aux services de transport individuel, problèmes de mobilité, etc.) (Smolnicki, 2017).

Les différents intérêts jouent un rôle dans la manière dont les véhicules autonomes vont se frayer un chemin dans la société. Dans les villes en particulier, le développement des véhicules autonomes n'est qu'une des évolutions de la mobilité qui doit être prise en compte. D'**autres développements**, ainsi que les technologies de mobilité autonome, entraînent des changements majeurs dans la mobilité urbaine. Certains changements importants sont, dans un ordre aléatoire:

- la micro-mobilité émergente;
- les systèmes partagés;
- l'écologisation des transports;
- l'ajustement des limitations de vitesse;
- l'infrastructure numérique;
- l'engagement en faveur d'une mobilité lente et de l'accessibilité;
- la diversification des services de transports en commun;
- la livraison de marchandises.

3.3.3 Micro-mobilité émergente

Outre le vélo traditionnel, le cyclomoteur et la marche, il existe de nombreuses formes de déplacement sur le marché ou en cours de développement. Ces moyens de transport, tels que la trottinette et le monocycle, sont appelés «micro-mobilité». La **place** de la micro-mobilité **sur la route** est un aspect important. Il s'agit de questions telles que «où peut-on les utiliser?», «où peut-on les laisser?» et «comment les mettre en charge?». Le gouvernement doit faire des choix réglementaires à cet égard. Concrètement:

- Autoriser la micro-mobilité sur les trottoirs, les pistes cyclables, les voies de bus? (Transportation for America [T4America], 2018).
- Autoriser leur stationnement partout, délimiter des zones ou prévoir de nouveaux types de places de stationnement?
- S'il s'agit d'un système partagé de véhicules électriques (trottinettes électriques et autres), quelles options choisir pour le chargement?
- Les nouveaux moyens de transport seront-ils connectés et pourront-ils être reconnus (intéressant pour des raisons de gestion mais aussi pour le développement et la sécurité des VA)?

Les différentes formes de stationnement présentent chacune des avantages et des inconvénients (T4America, 2018). Les villes optent de plus en plus souvent pour des **restrictions de stationnement**. La Région de Bruxelles-Capitale, par exemple, a d'abord procédé à la délimitation des zones où il est interdit de laisser des trottinettes partagées, puis a testé des places de stationnement spécifiques pour les trottinettes partagées («Specifieke parkeerplaatsen», 2019).

L'utilisation croissante de la micro-mobilité augmente le nombre de types d'usagers de la route qui doivent être capables de **détecter** un VA. Les utilisateurs de la micro-mobilité sont à peu près de la même taille qu'un piéton ou un cycliste, mais se déplacent en général rapidement. Les véhicules autonomes doivent en tout cas pouvoir analyser et évaluer correctement le comportement des utilisateurs de la micro-mobilité. La plupart des nouveaux moyens de transport peuvent être connectés. Cependant, toutes les formes de micro-mobilité ne sont pas encore détectables. Les VA doivent encore être développés davantage avant d'être capables de détecter toutes les formes de micro-mobilité en toutes circonstances et d'en estimer le comportement. Un véhicule autonome de niveau SAE L3 peut transférer la responsabilité au conducteur en cas d'imprévisibilité. Pour les niveaux SAE L4 et L5, ce transfert n'est plus prévu.

En ce qui concerne l'**infrastructure routière**, pour la micro-mobilité, d'autres intérêts que le lieu d'utilisation sont en jeu (déplacement, stationnement, chargement). Le **revêtement** doit être de qualité suffisante et le nombre d'obstacles rencontrés doit être réduit. Cela contribue à la prévisibilité du comportement des usagers micromobiles, ce qui est important pour les véhicules autonomes.

La **vitesse** des trottinettes et des monocycles constitue un défi de taille pour les piétons, les cyclistes, les personnes en chaise roulante, etc. Il peut également être utile d'envisager une sorte d'ISA pour ces moyens de transport en fonction de leur utilisation dans certains environnements (zone piétonne, zone 30, rues cyclables, espaces partagés, etc.).

3.3.4 Systèmes partagés

Dans les villes, il existe un **potentiel théorique** de partage des véhicules. Des simulations montrent que les voitures partagées pourraient remplacer plusieurs voitures particulières,

ce qui entraînerait une diminution de la consommation de l'espace. Le nombre estimé de voitures particulières remplacées par une voiture partagée varie entre 2,5 et 13, mais les études présentent des limites qui conduisent à une surestimation (par exemple, elles se concentrent sur les *early adopters*) (Liao, Molin, Timmermans & van Wee, 2020).

Les systèmes partagés ont également le potentiel d'influencer positivement la **répartition modale** et de contribuer à un comportement de déplacement plus respectueux de l'environnement. Après tout, les utilisateurs de voitures partagées sont plus souvent des utilisateurs multimodaux (transports en commun, vélo, marche, micro-mobilité) que des propriétaires de voitures particulières. En revanche, de nombreuses catégories de la population (jeunes, personnes âgées, personnes handicapées, personnes sans permis de conduire, etc.) ne peuvent pas ou ne sont pas autorisées à utiliser de manière autonome les véhicules SAE L0 à L3, alors qu'elles pourraient utiliser des véhicules autonomes SAE L4 et L5. Cela peut contribuer à une **société** plus **inclusive**.

C'est un des revers de la médaille: avec l'introduction des VA sans se concentrer également sur les alternatives au transport individuel, il y a un risque que la répartition modale soit affectée négativement. Cela pourrait conduire à l'**engorgement** (encore plus important) des **villes**.

Pour une mobilité urbaine durable, l'avenir des véhicules autonomes va sans nul doute de pair avec une politique de répartition modale. Plusieurs **options** sont disponibles pour une telle politique: systèmes partagés, MaaS (*Mobility as a Service*), transports en commun, zones environnementales, paiement pour l'utilisation des infrastructures routières, restrictions d'accès à certaines zones dans les villes, etc.

MaaS et les systèmes partagés qui recourent également aux **véhicules autonomes** (taxis robots) semblent avoir un grand potentiel. Selon l'étude dite d'Oslo (COWI & PTV Group, 2019):

- 7 % du parc de véhicules actuel suffiraient si tous les utilisateurs de transports privés passaient à des véhicules (autonomes) à usage partagé (**ride-sharing**);
- dans ces mêmes conditions, le nombre de véhicules-kilomètres parcourus diminuerait en outre de 14 %;
- si seul le véhicule et non le trajet était partagé (**ride hailing**), 9 % du parc automobile suffiraient mais le nombre de véhicules-kilomètres parcourus augmenterait de 26 %;
- si les usagers des transports en commun se mettaient eux aussi à ne plus utiliser que les services de *ride-sharing*, 16 % du parc de véhicules actuel suffiraient et, en outre, tous les trams et les bus pourraient disparaître. La suppression des transports en commun entraîne évidemment une forte augmentation du nombre de véhicules-kilomètres parcourus.

Une étude pour Lisbonne (ITF, 2015) donne des résultats similaires. Les deux études fixent également des exigences de qualité de service; le temps d'attente maximal (temps entre l'appel du véhicule et la disponibilité effective) et le retard maximal (par exemple, pour aller chercher d'autres usagers) sont limités à des niveaux acceptables.

Dans le domaine de l'**infrastructure routière**, les systèmes partagés nécessitent des zones de stationnement, de débarquement et d'embarquement agréables et sûres (ce que l'on appelle des PUDO⁴⁹). De tels hubs de mobilité ne peuvent rencontrer le succès que si les usagers ou les fournisseurs de systèmes partagés s'y sentent en sécurité et peuvent y laisser leur véhicule sans craindre de le retrouver vandalisé. Au cours du second semestre 2019, il a été décidé de retirer les vélos partagés JUMP de plusieurs communes de Bruxelles, par exemple, pour cause de vandalisme (Région de Bruxelles-Capitale, 2019).

⁴⁹ PUDO: zones for picking up and dropping off passengers (COWI & PTV Group, 2019).

	BASE	1A	1B	2A	2B	3A	3B	3
	PRIVATE CARS 2020	FROM PRIVATE CAR TO CAR SHARING	FROM PRIVATE CAR TO SHARED TAXI	FROM PRIVATE CAR, BUS AND TRAM TO CAR SHARING	FROM PRIVATE CAR, BUS AND TRAM TO SHARED TAXI	FROM BUS AND TRAM TO TAXIBUS		FROM TRAM AND BUS TO TAXIBUS
						FROM PRIVATE CAR TO CAR SHARING	FROM PRIVATE CAR TO SHARED TAXI	
VEHICLE KILOMETERS – IN SERVICE (MILLION)	4.4	4.0	3.1	6.1	4.6	5.5	4.7	1.5
VEHICLE KILOMETERS – EMPTY VEHICLE (MILLION)	0	1.5	0.6	2.4	1.1	1.7	0.9	0.2
VEHICLE KM (MILLION)	4.4	5.5	3.7	8.6	5.7	7.3	5.5	1.8
VEHICLE KILOMETERS SHARE – IN SERVICE	100%	73%	83%	72%	81%	76%	84%	86%
VEHICLE KILOMETERS SHARE – EMPTY VEHICLE	0%	27%	17%	28%	19%	24%	16%	14%

Tableau 3.1 – KPI for fleet size and vehicle kilometres in MaaS system, *Oslo study, PTV Group, April 2019 (COWI & PTV Group, 2019)*

Les véhicules partagés des **floating sharing services** sont autorisés à stationner sur des places de stationnement réglementaires où les voitures particulières sont également autorisées à se garer. Dans le cas du **station based carsharing**, des places de stationnement attribuées doivent être prévues (voir infra dans «Ecologisation des véhicules»).

Les systèmes partagés (voitures, vélos) ont plus de chances de réussir s'ils sont facilement **accessibles** (à une courte distance du point de départ ou facilement accessibles par les transports en commun). Les autorités ont un rôle à jouer à cet égard, en négociant avec les fournisseurs de systèmes partagés organisés avant de déployer le service dans la région concernée. Afin d'assurer une bonne correspondance des systèmes partagés à d'autres systèmes partagés ou à d'autres modes de transport, des investissements doivent être réalisés dans une infrastructure adaptée. Un défi réglementaire consiste à faire face à la popularité croissante du **covoiturage privé** (un groupe de personnes/ménages utilisant sur une base systématique une voiture en propriété commune).

Le réaménagement des routes laissant moins d'espace aux véhicules et plus d'espace aux alternatives (transports en commun, vélo, marche et micro-mobilité) peut être une option en fonction de la répartition modale, de l'accessibilité et de la qualité de vie. Le degré de pénétration des véhicules autonomes, qu'il s'agisse de système partagé ou non, a une influence sur ce point. Pour une ville qui fait face à ce défi et qui veut en comprendre les effets, il semble crucial de développer une vision du futur et des scénarios et de les calculer à l'aide d'un modèle.

3.3.5 Ecologisation du transport

Les **exigences environnementales** applicables aux véhicules deviennent de plus en plus strictes. Les villes ont la possibilité de créer une LEZ (*Low Emission Zone* – zone basses émissions).

Certaines villes (Paris, Bruxelles, etc.) se sont déjà prononcées en faveur de l'**interdiction des véhicules à moteur à combustion interne**.

C'est ainsi que le gouvernement **bruxellois** a récemment approuvé le plan régional sur le climat et qu'il s'est engagé à renforcer les critères d'accès et à introduire une interdiction des véhicules diesel en 2030 et des véhicules à essence et au LPG en 2035. En outre, une extension du champ d'application (intégration des cyclomoteurs dans la LEZ) a été opérée et la création de «Zero Emission Zones – zones zéro émission» (ZEZ) est envisagée dans le Pentagone de Bruxelles ou dans certaines zones, par exemple dans les pôles commerciaux. Des critères d'accès plus stricts seraient liés à cette ZEZ comparé à la LEZ (Redactie e-Drivers, 2019).

A **Rotterdam**, des mesures positives et préventives sont prises. L'objectif des LEZ a été atteint en quelques années seulement. La ville adopte de nouvelles mesures, telles que des accords avec les entreprises du centre-ville pour ne fournir que des véhicules électriques, accorder plus d'espace aux usagers faibles, aux transports en commun, aux transports partagés et aux modes de transport plus propres («Waarom Rotterdam», 2019).

Pour certaines organisations, les LEZ ne vont pas assez loin. Elles préconisent une ZEZ (**zone zéro émission**) (Transport & Environnement (TE), 2019).

Pour d'autres organisations, les LEZ vont juste un pas trop loin et l'**efficacité d'une LEZ** suscite des doutes (BV, 2020). A **Stuttgart**, lors du confinement engendré par la covid 19 (printemps 2020), il a été décidé de supprimer l'alarme liée à la présence de particules dans l'air sur la base de nouvelles opinions sur la relation entre les mesures de l'air et l'utilisation des anciens véhicules diesel. Cela a été fait sur la base des données recueillies pendant la période de trafic particulièrement faible depuis le confinement.

Afin d'atteindre les objectifs environnementaux, il est utile d'**encourager** l'utilisation de véhicules propres. Pour généraliser l'utilisation et l'achat de véhicules propres fonctionnant à l'électricité ou à l'hydrogène, il reste encore plusieurs étapes à franchir. Le prix d'achat devrait notamment baisser et il devrait y avoir plus de clarté sur les performances de ces véhicules (notamment, l'incertitude sur l'autonomie des véhicules électriques). En outre, l'**infrastructure de chargement et d'alimentation** (électricité, hydrogène, CNG, etc.) doit encore faire l'objet d'un développement considérable. Il est important que les utilisateurs puissent alimenter facilement leurs véhicules avec la source d'énergie jusqu'ici encore indispensable⁵⁰. Les personnes potentiellement intéressées ne doivent pas être dissuadées par la menace d'un changement des conditions d'utilisation⁵¹. Les villes et les gouvernements peuvent choisir de **coordonner les politiques** relatives aux systèmes partagés, aux véhicules autonomes et aux véhicules propres.

En ce qui concerne l'**infrastructure** physique, certains types de véhicules propres nécessitent évidemment une infrastructure de recharge et d'approvisionnement, mais le stationnement pose également problème. Le **stationnement** reste nécessaire, même pour les VA. Dans une économie qui fonctionne 24 heures sur 24, la demande de transport connaît en effet de grandes fluctuations. Il n'est pas très logique, notamment la nuit, qu'une grande partie des véhicules circulent sans but. Il est également vrai que pour offrir un service efficace par des véhicules autonomes aux heures de pointe, une grande flotte est nécessaire. Laisser circuler des **véhicules sans but** (voitures zombies) contribue inutilement aux embouteillages et à la consommation d'énergie (que ce soit en heures creuses ou aux heures de pointe). En ce qui concerne le stationnement, il reste des **questions essentielles** auxquelles il n'y a pas encore de réponse claire:

- Où, dans la ville (ou à l'extérieur), faut-il prévoir des places de stationnement pour les VA?

50 En Région de Bruxelles-Capitale, il y a quatre stations de recharge CNG (situation au 10/06/2020 selon <https://www.gas.be/fr/trouver-une-station-cng>).

51 Ionity (un réseau européen de chargement rapide) a décidé d'augmenter les prix d'une charge via leurs chargeurs rapides à partir de 2020.

- A partir de quel niveau de charge une voiture électrique autonome partagée doit-elle se recharger ou continuer à rouler pour un trajet qui est encore possible?
- Quel est le rapport coûts du stationnement/coûts de la conduite?

En ce qui concerne la recharge des véhicules électriques individuels, il peut s'agir d'une **recharge privée** et d'une **recharge publique**. Les options de chargement pour les particuliers doivent être sélectionnées avec soin. Les câbles qui sont posés de la voiture électrique à une façade sur un trottoir posent principalement problème aux piétons et aux personnes à mobilité réduite (PMR)⁵². Avec la **charge par induction** (également appelée charge sans fil), une voiture électrique peut être chargée sans l'intervention de câbles ou d'une borne de recharge. En pratique, la voiture stationne au-dessus d'une plaque de recharge. Il est important que la distance entre le câblage sous la surface et l'élément qui capte l'électricité soit limitée. Sur de plus longues distances, le transfert d'énergie diminue rapidement.

Une plaque de recharge présente cet avantage qu'elle nécessite un espace plus limité par rapport aux bornes de chargement. Autres **avantages**: moins sensible au vandalisme et facile d'utilisation. Toutefois, la recharge par induction présente également des **inconconvénients**: le coût d'investissement plus élevé en raison de l'installation plus complexe, l'absence de normes et la perte de puissance (Bruxelles Mobilité, 2019). L'efficacité de la charge par induction est limitée à environ 90 %, contre 99 % lorsque la charge est effectuée par des systèmes de prise (O'Brian, 2019).

Un **autre système de recharge** est la recharge par pantographe. Ce système peut être utilisé pour recharger plus rapidement à un arrêt ou sur un emplacement de parking (comme pour les bus électriques).

La gestion des lieux de chargement publics constitue un défi: il y a le phénomène des «**squatteurs de bornes**» (voitures qui restent garées plus longtemps que le temps nécessaire au chargement). L'adéquation de l'offre à la demande de lieux de chargement publics et de places de stationnement traditionnelles exige également beaucoup d'attention. Il convient de concevoir un système qui soit équitable, tant pour les véhicules autonomes que pour les véhicules «traditionnels» (Carter, 2019).

Enfin, les véhicules électriques peuvent **accélérer** et **décélérer** plus rapidement que les véhicules à moteur thermique. En ce qui concerne les véhicules électriques (autonomes), la question est de savoir comment le logiciel prendra en compte la vitesse et le confort. Il faudra éviter les freinages inutiles. Les pneus des véhicules électriques sont plus sujets à l'usure en raison des accélérations et décélérations plus rapides, mais il n'est pas certain que ce comportement de conduite affecte les forces agissant sur une structure routière.

En plus d'investir dans des véhicules moins polluants, les villes peuvent bien sûr aussi réduire l'impact environnemental des transports en favorisant les **transports collectifs** et la **mobilité lente**.

3.3.6 Adaptation des limitations de vitesse

On observe une tendance à l'**abaissement des limitations de vitesse** dans les villes, en raison de considérations liées à la sécurité routière et à l'environnement (en termes de bruit). Le nombre de rues où la vitesse est limitée à 30 km/h est en augmentation, et les limitations de vitesse supérieures à 50 km/h sont sous pression. Par exemple, la Région de Bruxelles-Capitale (RBC) a inclus dans le projet de plan de mobilité Good Move l'action visant à introduire la limitation de vitesse de 30 km/h comme vitesse par défaut sur l'ensemble du territoire, avec des limitations de vitesse plus élevées qui

52

Les personnes souffrant d'un handicap physique ou mental sont considérées comme des PMR, mais aussi, par exemple, les personnes âgées ou les femmes enceintes qui ont des difficultés à se déplacer, les personnes ayant une jambe dans le plâtre, etc. (Service Public Fédéral Mobilité et Transports [SPF Mobilité et Transports], s.d.).

constitueraient plutôt une exception pour les routes ayant principalement une fonction de circulation. Dans le sondage public, la demande de quartiers à rues calmes où la vitesse maximale autorisée est de 30 km/h a pu compter sur l'approbation de près des trois-quarts des 8 500 citoyens qui ont pris la peine de remplir le sondage en ligne (Bruxelles Mobilité, 2019)⁵³.

51

Quartiers à rues calmes, où moins de voitures roulent à une vitesse adaptée à la vie locale (30 km/h): totalement d'accord 54 %, plutôt d'accord 20 %, plutôt pas d'accord 12 %, pas du tout d'accord 14 % (Bruxelles Mobilité, 2019).

Le graphique ci-dessous à gauche montre la relation entre la vitesse, l'accélération et la consommation de carburant. Le graphique de droite met en relation la vitesse et le bruit de roulement et du moteur. A des vitesses inférieures, la consommation de carburant est plus élevée et le bruit total des véhicules est plus faible. Dans des zones où la fonction résidentielle est prioritaire, les autorités locales donnent la priorité à la sécurité routière et à la qualité de vie (notamment le bruit du trafic). Des vitesses inférieures profitent à l'un comme à l'autre.

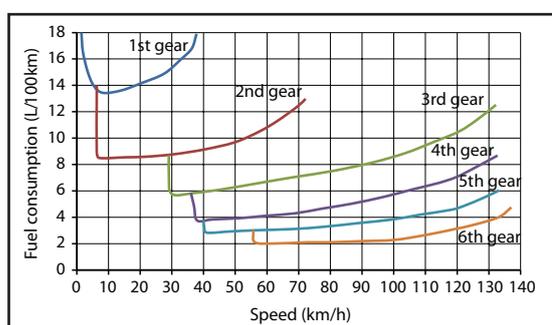


Figure 3.2 – Relation entre vitesse, accélération et consommation de carburant (Nasir, Noor, Kalam & Masum, 2014)

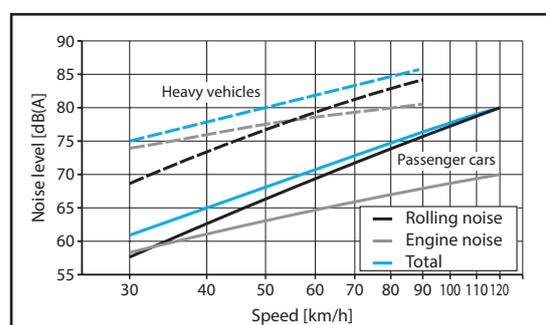


Figure 3.3 – Relation entre vitesse et bruit du véhicule (bruit de roulement et bruit du moteur) (Amundsen & Klæboe, 2005)

Les plans politiques se prononcent en faveur de quartiers résidentiels où la **qualité de vie prime** sur le flux du trafic. Le choix de quartiers résidentiels vivables et l'abaissement des limitations de vitesse peuvent réduire les différences de vitesse entre les véhicules. C'est intéressant pour les véhicules autonomes, qui doivent traiter une multitude d'informations provenant des piétons et des véhicules en mouvement. A des vitesses inférieures, ils disposent d'une marge de réaction un peu plus importante. Des essais avec des véhicules autonomes sur les voies publiques urbaines sont plus sûrs à réaliser si des limitations de vitesse faibles y sont applicables et que les différences de vitesse sont effectivement faibles.

En Europe, à partir de 2022, tous les nouveaux véhicules doivent être équipés de dispositifs de sécurité avancés. Il s'agit de l'ISA (**Intelligent Speed Adaptation**), de la possibilité de connecter un éthylotest, de la détection de la fatigue et de l'attention, de l'assistance sur la voie, d'un signal d'arrêt d'urgence, de l'avertisseur de recul et d'un enregistreur de données pour les incidents et les accidents («Parlement européen», 2019). En ce qui concerne l'ISA, il n'est pas clair à ce stade s'il s'agira d'un système ouvert (indication au conducteur de la vitesse maximale autorisée uniquement), d'un système fermé (la vitesse de conduite est activement limitée à la vitesse maximale autorisée) ou d'un système intermédiaire.

En gardant à l'esprit le concept de sécurité routière de «route qui s'explique», il est souhaitable d'adapter l'**infrastructure routière** à ces limitations de vitesse inférieures. Il peut s'agir de **petites - ou de plus grandes - interventions** concernant le profil de la route, comme le rétrécissement effectif de la chaussée ou l'utilisation d'éléments extérieurs à la chaussée qui permettent un rétrécissement visuel. Les **ralentisseurs de vitesse** sont également une option. Ce type d'intervention peut imposer un plus grand respect des limitations de vitesse. De telles adaptations restent **nécessaires** dans un

scénario mixte avec des véhicules de niveaux SAE différents et avec des systèmes ISA qui ne font pas respecter efficacement la vitesse. Pour certains des véhicules, les conducteurs ont encore le pouvoir de décider de la vitesse à laquelle ils roulent dans cette situation. A partir du moment où les systèmes embarqués dans les véhicules (autonomes) peuvent effectivement faire respecter les vitesses, les mesures physiques de réduction de la vitesse ou les modifications du profil de la route à cette fin ne sont plus nécessaires. On s'**attend** à ce qu'il faille encore des années avant que tous les véhicules ne soient équipés de systèmes efficaces de contrôle de la vitesse.

Des **profils routiers adaptés** au profit des usagers de la mobilité douce sont non seulement utiles pour les vitesses de conduite, mais aussi pour la politique (urbaine) visant une répartition modale plus durable au profit des piétons, des cyclistes, de la micro-mobilité et des transports en commun.

■ 3.3.7 Infrastructure et services numériques

On observe une numérisation plus poussée dans tous les secteurs de la société. Des thèmes comme *Smart City*, *Mobility As A Service (MaaS)* figurent en bonne place sur l'agenda politique des villes qui veulent faire un grand pas en avant vers une société moderne et durable.

Dans le domaine de la mobilité, l'accent est mis sur les services STI qui rendent l'utilisation des routes plus sûre et plus fluide. Pensons par exemple à l'influence exercée sur les feux de circulation (systèmes intelligents de contrôle des feux de circulation) pour les transports en commun, les services d'urgence et certaines catégories d'usagers de la route, ou aux informations sur des situations spécifiques (travaux routiers, accidents, etc.).

Le débat sur la technique à appliquer (**5G ou STI-5G**) n'est pas encore tranché. Toutefois, il est clair que l'objectif premier de ces services est de transmettre les informations à des véhicules connectés. Tant que les conducteurs sont aux commandes, c'est à eux de faire quelque chose avec l'information. Le risque que les conducteurs réagissent différemment continuera d'exister. Avec des véhicules de niveaux d'automatisation SAE L4 et L5, ce sont les véhicules eux-mêmes qui réagissent. Les informations sur les caractéristiques pertinentes de la route ou des objets peuvent être importantes pour le choix de leur comportement et de leur trajectoire optimal(e). Afin d'obtenir un comportement homogène, des accords devront être conclus avec:

- les constructeurs automobiles (quelles informations devraient entraîner quel comportement);
- les fabricants de cartes numériques (quelles informations sont reprises sur ces cartes);
- les autorités (quel comportement est souhaitable).

Safety Related Traffic Information (Règlement Délégué (UE) N° 886/2013 (2013), **SRTI**) se concentre sur la **gestion du trafic** dans des situations où la sécurité routière est compromise (p. ex. verglas, chantiers mobiles, accidents de la circulation). Par exemple, l'infrastructure numérique permettra aux usagers de la route d'être informés sur le tracé d'une route, les règles de circulation applicables, le comportement de conduite recommandé en fonction de facteurs externes (autres véhicules, conditions météorologiques, etc.). C'est également important dans un contexte urbain. Une **gestion centralisée des incidents** est une des possibilités. Les expériences réussies en matière de SRTI peuvent conduire au partage d'autres données (par exemple, des données pertinentes pour la mobilité ou l'entretien des routes) entre le secteur des véhicules et les gestionnaires routiers, en plus de données pertinentes pour la sécurité routière.

Cependant, beaucoup de choses restent **floues**, comme:

- La rapidité de développement du *Global Navigation Satellite System* (GNSS) et des produits de positionnement et d'information (infrastructure cartographique). Il est très important pour les véhicules autonomes que le système ne puisse pas tomber en panne. Même les satellites peuvent tomber en panne. C'est pourquoi les récepteurs GNSS doivent être capables de capter les signaux d'autres systèmes. Les GNSS diffèrent en termes de précision. Par exemple, le système européen Galileo est plus précis que le système américain **GPS** (*Global Positioning System*) (T4America, 2018).
- La vitesse de développement des **capteurs sur les VA**. La question qui se pose ici est la suivante: si les véhicules autonomes eux-mêmes deviennent de plus en plus intelligents, une représentation numérique de l'infrastructure physique devient-elle dès lors moins nécessaire?
- Le développement en ce qui concerne la **propriété privée** des voitures particulières et l'**admission** de types de véhicules dans les villes. Avec les développements dans le domaine de MaaS et l'offre théoriquement très flexible des taxis robots en tant que service public à un coût d'utilisation financier moindre, quel est l'avenir du nombre de véhicules privés vendus? Quels choix politiques sont opérés? Les **choix politiques** continueront-ils à se fonder principalement sur les possibilités technologiques proposées? Les voitures de société seront-elles remplacées par un service de mobilité? Les véhicules privés pourront-ils encore pénétrer dans certaines zones à l'avenir? Malgré le développement de plans de mobilité fortement axés sur la numérisation, l'**élaboration de la politique** n'est pas facile à prévoir.

En ce qui concerne l'**infrastructure routière**, ce sont avant tout les **accessoires** de la voirie qui doivent être adaptés: les commandes de feux de circulation, les panneaux d'information (référence de stationnement) et les panneaux de signalisation devront pouvoir communiquer avec les véhicules connectés et autonomes en plus d'afficher le message. En principe, les panneaux routiers classiques sont également détectables et interprétables par des caméras et des algorithmes. Toutefois, ces panneaux de signalisation sont souvent complétés par toutes sortes d'informations sur le moment où les règles de la signalisation routière s'appliquent ou sur les personnes à qui elles s'adressent. Pour l'instant, la technologie actuelle ne semble pas être en mesure de reconnaître correctement ces **informations supplémentaires**. Une représentation numérique du panneau de signalisation, y compris des ajouts sur la validité, est probablement une bonne option pour résoudre ce problème.

Les véhicules autonomes que l'on teste aujourd'hui sur des tronçons limités fonctionnent principalement sur la base de la navigation et des capteurs GNSS. Des **cartes détaillées et actualisées** semblent être une condition préalable importante aux développements à grande échelle. Les gestionnaires routiers et les entrepreneurs peuvent avoir un rôle important à jouer (en ce qui concerne l'actualité des informations sur les travaux routiers). Il est nécessaire de passer des accords avec les **prestataires de services** (un seul prestataire de services ou plusieurs prestataires de services à coordonner). La mise au point de la **précision** des systèmes et sites web existants (GIPOD, Osiris, Trafiroutes, etc.) constitue un grand défi, afin que cela corresponde à la réalité et que les véhicules autonomes puissent être informés de manière optimale.

En ce qui concerne les **carrefours**, une évolution est possible à (très) long terme vers des carrefours où l'interaction est purement basée sur la communication. Si tous les véhicules sont de niveau d'automatisation SAE L5 et que tous ceux qui se déplacent sont connectés, les feux de circulation aux carrefours pourraient devenir superflus. Toutefois, les **feux de circulation** continueront à jouer un rôle important pendant longtemps encore.

En cas de **nouvelles installations ou de remplacements**, il est dès à présent judicieux de recourir à des systèmes intelligents de contrôle des feux de circulation. Ces systèmes permettent la communication entre le feu de circulation et l'utilisateur de la route. Cela peut se faire dans les deux sens: sur la base des données individuelles des usagers de la route provenant d'une source d'information supplémentaire et de boucles de détection, un système intelligent de contrôle des feux de circulation peut mieux adapter les contrôles à la situation réelle de la circulation. Les **systèmes intelligents de contrôle des feux de circulation** conviennent pour:

- **prioritiser**, il s'agit par exemple de prévoir une phase verte plus longue pour une direction précise ou une combinaison de directions, ou une phase verte supplémentaire pour certaines catégories de véhicules;
- **informer**, fournir des informations actuelles à bord des véhicules à partir du système de contrôle des feux de circulation. Il s'agit par exemple de la vitesse conseillée, du temps qu'il reste avant que le feu ne repasse au rouge ou du temps qu'il reste avant qu'il ne repasse au vert, informations qui permettent à l'utilisateur de la route d'ajuster son comportement de conduite (vitesse, niveau d'attention);
- **optimiser**, la fluidité du trafic à un ou plusieurs carrefours en mettant des données des véhicules à la disposition de la régulation du trafic (Hormann & Bakker, 2019).

3.3.8 Mobilité lente et accessibilité

Dans les visions d'avenir pour les villes, le transport motorisé individuel se voit généralement attribuer moins d'espace qu'aujourd'hui. L'**espace** ainsi libéré peut être utilisé par les piétons, les cyclistes et les différentes formes de micro-mobilité. L'espace peut également être rendu plus vert ou être utilisé de manière utile ou agréable. Il est probable qu'il y ait un besoin supplémentaire de plateformes où les participants au trafic peuvent passer d'un moyen de transport à un autre. Un point d'attention dans les visions futures reste le besoin d'espace pour les véhicules autonomes (par exemple, espace d'attente, lieux d'embarquement et de débarquement).

Les faibles vitesses, la diminution du nombre de véhicules personnels et l'augmentation du nombre d'utilisateurs de la route non motorisés sont susceptibles d'entraîner davantage d'**interactions** entre les véhicules lents et les autres usagers de la route. Des routes plus étroites avec moins de véhicules et des véhicules plus lents permettent aux piétons de traverser plus facilement sans nécessairement marcher jusqu'à un passage pour piétons. Pour que cela soit possible de manière confortable (par exemple pour les personnes à mobilité réduite), les **différences de niveau** entre les zones piétonnes et la chaussée peuvent être limitées (comme cela est déjà recommandé pour l'accessibilité). Les zones destinées à différents utilisateurs peuvent être distinguées par des **différences de couleurs** et des **types de revêtement différents** (NACTO, 2019). A faible vitesse (30 km/h ou moins), on peut se demander dans quelle mesure il est nécessaire de prévoir des passages pour piétons spécifiques.

Lors d'un aménagement de la route approprié, il est également important de veiller à une **accessibilité suffisante des services de secours** et autres prestataires de services qui doivent nécessairement avoir un accès facile à l'endroit où leurs services sont demandés.

Les véhicules autonomes devront tenir compte de ces évolutions. Dans les villes par exemple, il est préférable d'éviter des flux continus de CAV se suivant de près pour permettre aux piétons et aux cyclistes de traverser facilement. L'implantation d'espaces spécifiques (pour attendre, descendre et monter) pour les véhicules autonomes doit être sécurisée. Dans le cas de hubs en particulier, il est important que cet espace réponde aux besoins de tous les modes aux alentours.

3.3.9 Diversification des services de transports en commun

Les sociétés de transport jouent un rôle important dans la mobilité urbaine. Le **transport traditionnel** (bus, trams, métros) reste la colonne vertébrale de leurs services. Ces véhicules ne sont que peu (bus), voire pas (trams, métros), flexibles au niveau des trajets. En raison de leurs dimensions, ils ont aussi leurs limites en termes d'intégration dans le tissu urbain. Pour répondre à la demande croissante de transports en commun, les sociétés de transports en commun tentent de **diversifier** leurs services.

§ 3.4 Navettes. ⁵⁴ Les **navettes autonomes (électriques)**⁵⁴ en sont un exemple. Une navette autonome offre l'avantage majeur qu'elle permet d'éliminer les coûts élevés de personnel, si la législation autorise de proposer un service sur la voie publique sans chauffeur ni accompagnateur. Des **essais** élargis de ces navettes dans différents environnements devraient permettre de déterminer si ce nouveau concept répond aux besoins des utilisateurs et des autorités (locales), dans quelles conditions elles fonctionnent correctement et si l'on peut parler d'un business case rentable.

Avec la génération actuelle de navettes, un **trajet fixe** est programmé avec indication des points d'intérêt (où la vitesse est par exemple légèrement réduite), en combinaison avec les capteurs du véhicule pour détecter les situations locales.

Plus les tests progressent, plus l'*Operational Design Domain* (ODD), l'environnement dans lequel les essais ont lieu, peut devenir complexe. Les aspects réglementaires et administratifs sont examinés, mais il est certain que les aspects infrastructurels et environnementaux sont également pris en compte. En ce qui concerne l'**infrastructure**, plusieurs aspects sont importants:

- la qualité du revêtement est importante pour éviter les fausses détections;
- Il est crucial qu'un itinéraire contienne le moins d'obstacles (visuels) possible, qui pourraient compromettre une interprétation correcte de la route par le véhicule;
- la couverture cellulaire est probablement un peu meilleure dans les villes qu'en dehors, mais l'expérience montre qu'un certain nombre de points de référence doivent être placés le long d'un itinéraire si la couverture GNSS est trop limitée à cause, par exemple, de la végétation;
- les véhicules ont besoin d'une infrastructure de recharge et de places de stationnement lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Il est préférable que le parking soit protégé (contre le vandalisme).

3.3.10 Livraison de marchandises

Outre pour le transport de personnes, les véhicules autonomes peuvent bien sûr aussi être utilisés pour la distribution de marchandises. Le **dernier kilomètre** dans la distribution des marchandises est chronophage et coûteux. En particulier dans les villes, il n'est souvent pas facile d'utiliser des camions pour la distribution des marchandises. Il existe toutes sortes de scénarios d'utilisation de véhicules autonomes afin que tout se passe au mieux. On peut penser par exemple aux *delivery points* autonomes, de petits robots entièrement autonomes partant d'un centre de distribution ou d'un véhicule autonome plus grand (*mother ship*), des véhicules autonomes qui viennent en soutien d'un livreur humain (afin que ce dernier puisse se concentrer sur sa tâche principale), etc.⁵⁵

Tous ces moyens de transport, grands et petits, utilisent les infrastructures disponibles. L'automatisation peut éventuellement permettre à ces moyens de transport d'utiliser des voies réservées (par exemple, les bandes de bus). Il est important ici que l'utilisation des moyens de transport de marchandises ne cause pas de nuisances supplémentaires aux services pour lesquels ces bandes sont réservées.

⁵⁵ Voir le projet VIL ALEES (*Autonomous Logistics Electric Entities for Cities*) avec un certain nombre de scénarios possibles pour le déploiement de véhicules autonomes dans la logistique urbaine (Claeys, 2018).

Les centres de distribution peuvent avoir un rôle important à jouer. D'une part, ceux-ci doivent être facilement accessibles pour le transport, si possible multimodal, de marchandises. D'autre part, le lieu est important: il doit permettre d'effectuer les livraisons le plus efficacement possible.

3.4 Navettes

Les «navettes» ont été citées à plusieurs reprises dans les défis en contexte urbain. Dans ce chapitre, nous nous intéressons spécifiquement au **champ d'application**, aux **essais** et au **développement** des navettes. Nous rétablissons le lien avec les **défis** au niveau de la mobilité. Ensuite, nous examinons le lien avec l'**infrastructure routière physique**.

3.4.1 Champ d'application

Il est courant d'associer le terme de navette à celui de **services**, pour former des «services de navette». Les «services de navette» désignent le type de services dont l'objectif principal est de transporter des passagers sur un trajet fixe entre deux points fixes, avec éventuellement plus d'un point d'embarquement et de débarquement entre les deux. Les services sont généralement destinés à des distances courtes ou moyennes de moins d'une heure.

Les navettes «autonomes» constituent une **nouvelle forme** de transport collectif. Ce sont de petits véhicules qui peuvent se déplacer de manière autonome. Ils ont une motorisation électrique et leur taille est plutôt limitée. En raison de cette taille, ils sont très adaptés pour transporter un nombre limité de passagers sans occuper beaucoup d'espace public. Pour les sociétés de transports en commun et les autres fournisseurs de services de mobilité, le fait que les navettes autonomes puissent être utilisées **sans chauffeur ni accompagnateur** constitue un atout majeur à long terme. Cela est possible pour autant que des essais aient démontré que les navettes sont tout à fait capables de le faire, que la réglementation le permette et qu'il y ait une analyse de rentabilité favorable.

Les navettes autonomes offrent un service sensiblement différent de celui des **taxis robots**. Ces derniers sont également des taxis autonomes sans chauffeur (niveau d'automatisation SAE L4 ou L5), qui sont toutefois destinés à un service de mobilité «à la demande» pour une utilisation sur la voie publique. Pour l'instant, les navettes autonomes sont des véhicules de niveau SAE L4 qui peuvent emprunter des itinéraires prédéfinis sur la voie publique ou en dehors de celle-ci. Les taxis robots, en revanche, ont un itinéraire flexible. Quand les navettes pourront également être utilisées sur des itinéraires flexibles, la distinction entre ce type de service et les taxis robots disparaîtra probablement à terme.

Les navettes sont destinées à de multiples (groupes d')usagers. Dans le cas des taxis robots, il existe une autre distinction entre les véhicules utilisés par un usager (ou un groupe d'usagers apparentés) et ceux qui ne prennent pas en charge d'autres usagers pendant la course (*ride hailing*). Dans une variante, il est possible que d'autres usagers soient pris en charge pendant le trajet et que les taxis robots s'écartent pour ce faire de l'itinéraire initialement prévu (*ride sharing*)⁵⁶.

Les navettes autonomes et les taxis robots se ressemblent pour un aspect au moins: l'idée qu'aucun chauffeur ou accompagnateur n'est nécessaire pour conduire les véhicules. Du point de vue de l'**économie d'entreprise**, il s'agit d'une évolution très intéressante pour les fournisseurs de transport.

56

§ 3.3 Les routes en environnement urbain.

Les développements des navettes et des taxis robots sont des processus parallèles. Certains experts affirment que les taxis robots pourraient être **introduits à grande échelle** dans les villes d'ici dix ans et, plus tard, dans les zones plus rurales. Le gros avantage de ces taxis robots est qu'ils peuvent se charger des déplacements de porte-à-porte (ou en allant un peu moins loin, de « coin de rue » à « coin de rue » où des passagers ayant des destinations différentes pourraient être plus enclins à utiliser un véhicule partagé). Dans la ville de Phoenix, Waymo (<https://waymo.com/>) lance déjà des taxis robots sans « personnel de réserve » pour reprendre les tâches de conduite. En Chine, les coûts d'exploitation d'une flotte de taxis robots devraient tomber sous le niveau d'une flotte de véhicules conventionnels d'ici fin 2030 (Pizzuto, Thomas, Wang & Wu, 2019). Un prix de revient plus bas peut alors permettre d'investir dans un meilleur service et de se concentrer sur des temps d'attente plus courts pour les usagers.

Un grand succès des taxis robots peut avoir des **conséquences** sur d'autres modes de déplacement. En premier lieu, le nombre de véhicules privés pourrait diminuer. Les services de transports en commun peuvent également en être affectés, qu'il s'agisse des formes traditionnelles ou des nouvelles formes comme la navette autonome.

Toutefois, les taxis robots n'ont de valeur ajoutée que s'ils sont aussi partagés efficacement. Si les taxis robots sont utilisés comme transport personnel individuel, le nombre de kilomètres parcourus augmentera considérablement (notamment à cause du nombre de kilomètres parcourus à vide pour prendre des passagers) et le problème de congestion ne fera qu'empirer.

Des **simulations** pour Lisbonne ont montré que le remplacement du parc de véhicules par 10 % (en heures creuses) à 35 % (aux heures de pointe) de taxis robots **partagés**, combiné à des transports en commun performants, pourrait suffire à répondre à la demande actuelle de transport (Martinez & Viegas, 2016), sans compromettre la qualité du service fourni⁵⁷ en gardant une disponibilité comparable à celle d'un moyen de transport privé. Selon la même étude, le **stationnement** en rue pourrait presque totalement disparaître, libérant ainsi beaucoup d'espace qui pourrait être comblé différemment. Selon d'autres études, de nombreuses **questions** restent **non résolues** quant à la disparition présumée des besoins en stationnement⁵⁸.

57 Dans la simulation, les temps d'attente maximums sont limités en fonction de la distance totale à parcourir (max. 10 minutes pour une distance supérieure à 12 km). Le temps total perdu (en raison des embouteillages ou des déviations) est également limité en fonction de cette distance totale (max. 15 minutes pour des distances supérieures à 12 km).

58 § 3.3.5 Ecologisation du transport.

3.4.2 Essais

Le parcours de développement des navettes passe par une **batterie de tests complète** sur des itinéraires prédéfinis. Les essais des navettes autonomes se déroulent dans différents environnements. Il peut s'agir de tests effectués sur la voie publique ou en dehors, avec des degrés variables en ce qui concerne la présence d'autres usagers de la route (piétons, cyclistes, ou encore voitures particulières).

Les essais doivent avant tout répondre aux questions de savoir si les navettes répondent à un besoin des usagers et des gestionnaires routiers, et dans quelles **circonstances** les navettes fonctionnent correctement. Avant de procéder au déploiement à grande échelle de navettes autonomes, il est nécessaire d'obtenir une bonne idée des avantages et des inconvénients de ces véhicules et de la valeur ajoutée pour concrétiser de nouveaux services de mobilité. Les exigences et les conditions requises en termes de services, d'environnement et d'infrastructures routières, de réglementations et d'encadrement doivent être claires.

Pour un **aperçu** des essais en Europe, voir l'Union internationale des transports publics (UITP) (s.d.).

Pour les essais, la **sécurité** et la **perception** figurent en haut de la liste des conditions. Comme c'est le cas pour les groupes automobiles dans le développement de véhicules autonomes, il est essentiel pour les sociétés de transport que leurs véhicules puissent rouler en toute sécurité sur la route. En effet, en cas de doute sur la sécurité, les gens n'utiliseront pas ce nouveau service.

Il convient également de prêter attention à l'**acceptation** de ces navettes autonomes par les autres usagers de la route (Feys, Rombaut, Macharis & Vanhaverbeke, 2020; Rombaut, Feys, Vanobberghen, De Cauwer & Vanhaverbeke, 2020). En effet, avec une navette autonome, il n'y a pas de conducteur qui puisse communiquer par un contact visuel ou des gestes de la main. Pour d'autres usagers de la route, cela peut conduire à la méfiance et au doute («cette voiture m'a-t-elle remarqué?») et à une confiance moindre dans les véhicules autonomes. Des recherches sont menées sur les technologies qui peuvent fournir une forme alternative de communication. Lors des essais, les navettes autonomes sont programmées avec une extrême prudence afin que le véhicule prenne toujours la décision la plus sûre en cas de doute.



Figure 3.4 – Essai avec la navette autonome (Institut VIAS, 2018)

Lors de l'organisation d'essais, il est important de toujours impliquer tous les **acteurs** possibles: la police, les autorités locales et régionales, le SPF Mobilité et Transports (pour l'admission des véhicules sur la voie publique), les sociétés de transports en commun (pour l'interaction possible avec leurs services), les utilisateurs, les riverains et les commerçants. Il est également essentiel de communiquer clairement sur les possibilités, les limites et les objectifs du système testé.

Enfin, dès 2015/2016, le SPF Mobilité et Transports a élaboré, en concertation avec les partenaires, un **code de bonnes pratiques** d'expérimentation en Belgique⁵⁹.

59

§ 5.3 Essais: sites d'essai et Living Labs (UE).

3.4.3 Développements

Le §3.3 Les routes en environnement urbain a abordé une série d'orientations de développement qui ont été mises en place dans le contexte urbain et sur lesquelles des documents politiques expriment un avis. Certaines d'entre elles ne peuvent être considérées indépendamment du développement des navettes autonomes.

Les navettes autonomes constituent un service de transport collectif. Elles sont électriques et font partie de l'ensemble des moyens de transport respectueux de

l'environnement qui contribue à la qualité de vie locale. La **vitesse** de conduite des navettes autonomes est, selon plusieurs essais, très faible. Cela correspond bien aux circonstances dans lesquelles les essais sont réalisés en premier lieu: zones commerciales et campus (avec beaucoup de piétons lents, de cyclistes et de micro-mobilité), aéroports (peu d'interaction sur les itinéraires des navettes), etc. Mais aussi ailleurs (sur la voie publique, dans des endroits à trafic mixte, y compris des véhicules des niveaux SAE les plus bas), il est vrai que des essais avec des navettes à faible vitesse sont plus sûrs à réaliser dans des situations où les différences de vitesse sont limitées. La faible vitesse des navettes autonomes permet de partager l'espace public en toute sécurité avec d'autres usagers de la route, moins protégés.

Les **services numériques** en cours de développement (tels que *Mobility as a Service*, MaaS) devraient idéalement prendre en compte l'offre supplémentaire de navettes autonomes. Ces services doivent intégrer la flexibilité nécessaire afin que les essais avec des navettes autonomes fassent partie intégrante de MaaS.

Avec la génération actuelle de navettes, un **trajet fixe** est programmé avec indication des points d'intérêt (par exemple, où la vitesse est légèrement réduite), en combinaison avec les capteurs du véhicule pour détecter des situations locales. Un **matériel cartographique de haute qualité** est nécessaire pour les itinéraires définis. Dans le cas logique où les navettes proviennent d'un seul fournisseur de transport, la question du fournisseur de ce matériel cartographique (service unique ou multiple) n'est pas pertinente. Bien entendu, la carte doit être tenue à jour afin que la navette puisse tenir compte de la situation réelle sur le terrain.

3.4.4 Infrastructure

Les essais actuels donnent un premier aperçu des **exigences** en **matière d'infrastructure routière** et de l'utilisation de l'infrastructure routière:

- La **qualité** du revêtement routier est importante pour éviter que des défauts de la chaussée n'arrêtent la navette ou ne la forcent à réaliser des manœuvres d'évitement inutiles. Les petits défauts ne posent pas de problème. Toutefois, avec la technologie actuelle, il est préférable d'éviter les défauts plus importants.
- La **pollution** du revêtement (boue, poussière) peut avoir une influence négative sur le fonctionnement des systèmes de détection et doit être évitée.
- Les **obstacles (visuels)** qui provoquent l'arrêt inutile de la navette doivent être évités. Les points d'attention sont la végétation, les véhicules mal garés ou à l'arrêt.
- Si la disponibilité du positionnement GNSS ne peut être assurée (par exemple à cause du feuillage ou dans des tunnels), des **points de référence supplémentaires** peuvent être nécessaires.
- Il est préférable que l'**infrastructure de chargement** et le **parking** soient protégés (contre le vandalisme).
- Lors de certains essais, il est apparu qu'une **usure** légèrement accrue du revêtement pouvait être observée dans la trajectoire de la navette. Il est possible de limiter cette usure en programmant un **comportement de conduite en zigzag** de la navette autonome.
- Un **mouvement sur le bord** du trottoir est parfois interprété comme un risque.
- Une navette autonome est généralement située sur le côté de la route pour permettre aux passagers de **monter** et de **descendre** sur la voie publique. Il est possible qu'il soit nécessaire de sacrifier quelques places de parking pour cela. L'insertion de la navette dans le trafic et sa sortie sont des opérations complexes. S'arrêter à un arrêt en saillie sur la chaussée est moins complexe et peut être une option à explorer (acceptation, manœuvres de dépassement).

Chapitre 4

Conclusion

Dans les chapitres précédents, nous avons examiné une multitude d'aspects de plus près dans le domaine des CAV⁶⁰. Les informations recueillies permettent de mieux comprendre les conséquences possibles des CAV pour l'infrastructure routière et les administrations routières. Nous avons placé cela dans un contexte social. Dans ce chapitre, nous souhaitons rassembler les questions principales. La répartition est la suivante:

60

Pour la terminologie utilisée, voir § 2.1 Description des CAV.

- 4.1 Introduction: bref **aperçu du comment et du pourquoi** de l'étude;
- 4.2 **(In)certitude et complexité** entourant les CAV;
- 4.3 Evolutions sociales/politiques, sur la nécessité d'une **étude politique** et les **aspects sociétaux** entourant les véhicules autonomes;
- 4.4 **Infrastructure routière**: les **mesures no regret** dans les domaines suivants:
 - signalisation;
 - tracé de la route;
 - structure routière;
 - revêtement.

4.1 Introduction

De sa propre initiative, le CRR souhaite étudier le **rôle de l'infrastructure routière physique** dans le développement des véhicules autonomes.

La **raison** de cette étude était la conviction que de nombreux facteurs sont analysés sur les CAV et reçoivent beaucoup d'attention, mais aussi le sentiment que l'aspect «infrastructure routière physique» est plutôt abordé de façon limitée.

Pour les **gestionnaires routiers**, il est important qu'ils soient bien armés pour relever le défi et créer les conditions qui permettront la transition progressive vers des véhicules autonomes de niveau SAE supérieur (par exemple, une infrastructure adaptée ou facilement adaptable). En même temps, les données qui deviennent disponibles grâce au déploiement et à l'utilisation de ces véhicules peuvent contribuer aux tâches que les gestionnaires routiers doivent accomplir (notamment gestion des routes, sécurité routière et gestion du trafic). Les gestionnaires routiers devraient continuer à se concentrer sur l'**infrastructure routière**, mais leur attention doit dans le même temps s'élargir à l'**infrastructure numérique**, à la communication et à la géolocalisation. L'utilisation de la route par différents modes et pour différents motifs de déplacement retient également leur attention.

D'autre part, les **entrepreneurs** doivent également être préparés aux changements que cela entraînera dans divers domaines, tels que les adaptations de la route et de l'environnement routier, et la communication des travaux routiers.

Le groupe de travail mis en place par le CRR était composé d'**experts** de diverses organisations, chacun d'entre eux ayant pu contribuer, grâce à ses propres compétences, aux discussions sur le sujet de recherche présenté. Des **échanges de connaissances** fascinants ont eu lieu lors des réunions du groupe de travail.

Les discussions, ainsi qu'un examen de la **littérature** pertinente (+ 215 documents), ont abouti au présent document. Vous y trouverez un état des lieux et une prospective dans le domaine des CAV et de l'infrastructure routière.



Figure 4.1 – Réalisation de la publication «Les CAV et l'infrastructure routière – état des lieux et prospective»

Le document contient des **conclusions**, dont on peut supposer qu'elles seront applicables plusieurs années après la publication du présent rapport. Notre objectif est ici de donner un aperçu des mesures **no regret** dans le domaine de l'infrastructure routière. Toutefois, nous ne pouvons pas éviter d'esquisser la **vue d'ensemble**: bien que l'infrastructure routière soit une condition préalable essentielle aux déplacements, elle présente évidemment des interfaces étroites avec d'autres aspects de la société et le système de déplacement en particulier.

4.2 (In)certitude et complexité

Sur la base de la littérature et des discussions, nous pouvons affirmer que nos déplacements au cours des prochaines décennies se caractériseront par un **mélange** de services publics et de moyens de transport particuliers, et par une grande **variété de connectivité et de degrés d'autonomie** des véhicules.

Nous sommes **encore loin** d'un tableau final possible – une société avec 100 % de trajets connectés (de tous les types d'utilisateurs de la route) et des véhicules autonomes de niveau SAE L5 uniquement. Les changements nécessaires sont si profonds que la route vers une telle société est pavée de nombreuses incertitudes. L'équilibre entre les avantages et les inconvénients⁶¹, le calendrier et le développement des technologies⁶², les règles/rôles/responsabilités (pour les conducteurs, les véhicules, les gestionnaires routiers, les instances politiques, etc.), l'acceptation sociale et les questions éthiques: il reste encore des **étapes importantes** à franchir dans ces domaines.

Dans les décennies à venir, avec différents niveaux d'autonomie (niveaux SAE) et des déplacements connectés et non connectés, les détails pratiques des mesures à prendre ne sont pas encore très clairs. Pour les gestionnaires routiers, il s'agit d'acquérir en permanence des connaissances sur les **idées avant-gardistes** qui permettent de lever les incertitudes.

On peut parler d'un consensus général sur le fait que l'introduction progressive de véhicules autonomes est **complexe**:

- Le développement de véhicules autonomes n'est que l'un des **défis** auxquels sont confrontés les gestionnaires routiers. Le § 3.3 examine en détail, dans un ordre aléatoire, les défis du **contexte urbain**: la micro-mobilité émergente, les systèmes partagés, l'écologisation des transports, l'adaptation des limitations de vitesse,

§ 2.2 Objectifs. 61
 § 2.4 Déploiement des CAV & obstacles. 62

- l'infrastructure numérique, l'engagement en faveur de la mobilité lente et de l'accessibilité, et la diversification des services de transports en commun.
- Les véhicules autonomes ont le potentiel d'apporter des **changements et des innovations majeurs** à l'ensemble du **système de transport**. Les CAV admis sur la voie publique sont des véhicules qui ont dû passer par une procédure d'homologation, qui tient compte de l'infrastructure routière.
 - Cependant, de nombreuses questions demeurent:
 - Quelle politique (locale, nationale) en matière de transport de personnes et de marchandises permettrait la mise en place de ce changement? Dans quel délai? Et à quels endroits?
 - De quoi avons-nous besoin pour changer et renouveler le système de transport? Quel est l'intérêt de cette évolution⁶³?
 - En ce qui concerne l'**infrastructure routière**⁶⁴:
 - Quelles mesures peuvent ou doivent être prises maintenant?
 - Quelle harmonisation ou distinction doit-on faire selon le type de route, le type de moyen de transport, le niveau de développement technologique (niveaux SAE)?
 - Qui sera autorisé à conduire, ou pourra conduire, et où?

63

§ 4.3 Evolutions sociales / politique.

64

§ 2.4.1 Infrastructure routière.

4.2.1 Prospective et gestion des risques

Compte tenu des incertitudes, il est recommandé que les gestionnaires routiers accordent une plus grande attention à la **prospective** et à la **gestion des risques** lors de la planification du système de transport.

La **prospective** est extrêmement importante. Il est souhaitable que les gestionnaires routiers pensent en termes de **scénarios**, avec un horizon à long terme (dix ans et plus) d'une part et qu'ils prêtent attention aux incertitudes et à la sur- et sous-estimation des opportunités de développement d'autre part. Il est alors conseillé d'agir de manière **pragmatique**: se concentrer principalement sur des mesures «no regret» pour le lustre à venir, et au fil du temps, ajuster les actions en fonction de la vision avant-gardiste⁶⁵.

65

§ 2.4.3 Prospective.

La **gestion des risques** peut être un atout majeur. C'est un processus continu et une partie essentielle de la gestion de projet. En ce qui concerne plus particulièrement les CAV: la gestion des risques a été incluse dans le Code de bonnes pratiques d'expérimentation en Belgique⁶⁶. Un **Scenario based planning** pourrait aider à mieux anticiper l'avenir. Ce type de planning part de l'idée qu'une organisation accepte plusieurs scénarios, chacun d'entre eux ayant le potentiel de se concrétiser dans le futur (CFO Redactie, 2016). Dans ce que l'on appelle l'**approche de planning orientée décision**, la gestion de l'incertitude occupe une place importante dans la transformation des situations en situations de choix. Ceux qui soutiennent cette approche embrassent l'incertitude, en tenant compte des lacunes dans les connaissances, de l'évolution des schémas de valeur et des effets inconnus sur les mesures futures (Faludi, 1973).

66

§ 5.3.1 Belgique.

4.2.2 La recherche au service de l'expérimentation

La vision avant-gardiste se nourrit de la recherche. L'agenda de recherche pour le déploiement de véhicules autonomes est richement rempli. Dans tous les domaines pour lesquels des incertitudes subsistent, une réponse ne peut être trouvée qu'en menant des recherches et en réalisant des **essais**.

De nombreux essais sont effectués pour les **navettes autonomes**, qui peuvent compléter les formes plus traditionnelles de transports en commun.

En l'état actuel des choses, il n'y a **pas encore d'analyse de rentabilité**. Cela n'empêche pas les organisations de transports en commun de lancer ou de poursuivre des essais.

Généralement, les essais se déroulent dans des situations relativement simples, dans des environnements où la confrontation avec les autres usagers de la route est limitée, et à des vitesses réduites. Par exemple: un parc, une zone piétonne, un campus avec peu de transports. On évolue **progressivement** vers une situation où on laissera circuler les navettes dans des situations **plus complexes**, par exemple sur la voie publique. Les gestionnaires routiers sont un partenaire incontournable dans le soutien de projets expérimentaux avec des CAV. Compte tenu de la complexité, il est question d'une approche par étapes et d'une vision progressiste dans lesquelles la technologie des véhicules, la redéfinition des infrastructures et l'adaptation des réglementations vont de pair.



Figure 4.2 – Essai avec une navette autonome dans la zone piétonne de la ville de Masdar, Abou Dabi, 10 octobre 2019



Figure 4.3 – Panneau d'avertissement en trois langues utilisé lors de l'essai de la navette autonome à Neder-over-Heembeek, 12 février 2020

On doit pouvoir attendre des gestionnaires routiers qu'ils jouent un rôle dans les **essais** avec des véhicules autres que les navettes autonomes, tant au niveau de la préparation que de l'exécution. Ils ont accès à des **informations pertinentes sur leur réseau routier** concernant l'utilisation (moyens de transport, motifs de déplacement, vulnérabilité aux embouteillages, comportements dangereux, etc.) et l'infrastructure (conception, aménagement et signalisation des routes, sécurité routière intrinsèque, choix d'infrastructure, exigences d'entretien, etc.);

Ils peuvent **confronter** ces **connaissances pratiques** avec **ODD** (*Operational Design Domain*)⁶⁷ proposé par les chercheurs, la description des domaines opérationnels spécifiques pour lesquels une fonction ou un système automatisé est conçu pour fonctionner correctement. Il appartient en partie aux gestionnaires routiers (locaux) d'évaluer comment et où les essais peuvent être effectués dans la pratique.

Il est tout à fait justifié de tester différents **use cases**. Un cas intéressant est celui des travaux routiers. Une attention particulière doit être accordée aux usagers de la route non connectés.

Pour les gestionnaires routiers supra-locaux, la participation au **développement de l'ODD** même est cruciale. Cela peut se faire en participant à des groupes de travail et des projets de recherche internationaux, ou au moins en assurant le suivi de ces

⁶⁷ ODD / *Operational Design Domain*: les conditions spécifiques dans lesquelles un système d'automatisation de la conduite particulier ou une de ses caractéristiques est conçu pour fonctionner, y compris, mais sans s'y limiter, les modes de conduite. Il peut s'agir de diverses restrictions, telles que la géographie, le trafic, la vitesse et les routes (Lemecjava, 2016).

initiatives. Pour la suite du développement de l'ODD, une attention particulière sera accordée aux transitions entre les zones ou les tronçons de route de différents **niveaux ISAD** (*Levels of Infrastructure Support for Automated Driving*).

L'attention nécessaire est requise pour les **facteurs** suivants:

Type de route ou de tronçon de route	Pour quel type de route une certaine fonction ou un certain niveau d'automatisation a-t-il été développé?
Temps	A quels moments un tronçon de route peut-il supporter un certain niveau d'automatisation?
Météo	Par quel temps les différents niveaux d'automatisation peuvent-ils fonctionner?
Trafic	Quelle est l'influence de la quantité et du type de trafic sur les niveaux d'automatisation pris en charge?

Tableau 4.1 – Quelques facteurs déterminants pour l'Operational Design Domain

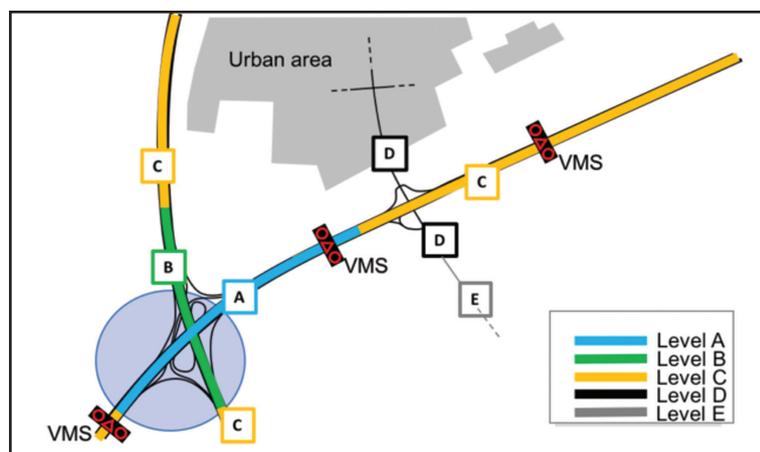


Figure 4.4 – Exemple de niveaux ISAD attribués à un réseau routier (Inframix, 2017)

4.3 Evolutions sociales / politique

La valeur ajoutée des véhicules autonomes dans une future politique de mobilité durable est un thème passionnant. Le potentiel d'utilisation des véhicules autonomes comme **levier** pour une «mobilité différente» est mis en avant par certains experts comme une solution possible aux problèmes actuels de mobilité (congestion, insécurité routière, pollution de l'environnement). Il est possible que la société soit confrontée à des changements drastiques. Certaines villes participent de manière pragmatique à des projets expérimentaux et prennent part à l'évaluation.

Une introduction réussie et de grande envergure des CAV nécessite, d'une part, la poursuite de l'analyse politique et des évaluations de projets. D'autre part, il est utile d'avoir une vision des aspects sociaux des véhicules autonomes et de la numérisation de la société qui y est liée.

4.3.1 Analyse politique et évaluations de projets

Une étude des **coûts et avantages** du déploiement de véhicules autonomes dans le système de transport est pertinente:

§ 2.2 Objectifs.

- Les documents politiques contiennent divers objectifs avec des avantages et des inconvénients⁶⁸. Il y a souvent un manque de résultats objectifs. Les contradictions, par contre, ne manquent pas. Il appartient aux chercheurs, avec la coopération des gestionnaires routiers, de procéder à des analyses, de limiter les incertitudes et d'apporter des nuances. La recherche supplémentaire peut également permettre de dépeindre une **image plus réaliste** des attentes des véhicules autonomes.
- L'**implication des citoyens** est un aspect crucial de la **coordination** entre les gestionnaires routiers, les constructeurs automobiles (fonctionnalités des véhicules) et les fournisseurs de services numériques dans les projets de recherche. Cela concerne à la fois les utilisateurs finaux (les personnes utilisant des véhicules autonomes) et ceux qui entrent en contact avec les véhicules autonomes sur la voie (publique) (principalement: les piétons et les cyclistes, qu'ils soient connectés ou non). L'**acceptation** des véhicules autonomes par les utilisateurs et les non-utilisateurs est un domaine de recherche essentiel.
- Les **projets** impliquant des CAV peuvent également être évalués sur une base intermédiaire. Ces **évaluations** peuvent conduire à des ajustements du projet et influencer des projets futurs. Des actions et des options concrètes pour le gestionnaire routier peuvent en découler. L'alignement sur les plans politiques est un point qui mérite qu'on y prête attention.

4.3.2 Société

§ 4.2 (In)certitude et complexité.

La recherche est encore nécessaire dans de nombreux domaines: la recherche à des fins d'essais⁶⁹ et l'analyse politique (voir ci-dessus). Une **approche plus existentielle** est également justifiée. Il s'agit davantage d'une mission sociale que d'une question technologique (*Society beats technology*), avec des questions essentiellement complexes telles que:

- Vers quel type de société voulons-nous aller? Dans quel genre de villes voulons-nous vivre? Avec beaucoup de réglementation ou beaucoup de liberté («état vs marché»)? En mettant l'accent sur le transport collectif ou individuel, ou un mélange des deux? Comment gérer les différences régionales?
- Dans quelle mesure une évolution dans laquelle les voitures particulières sont de plus en plus bridées est-elle réaliste? Y aura-t-il des villes qui vont carrément bannir les voitures particulières? Ou, au contraire, y aura-t-il des villes qui vont supprimer les voies réservées (aux transports en commun)?
- Quelles exigences devons-nous poser à l'utilisation des taxis robots?

Il s'agit de la **mise au point de futurs possibles** pour la société dans son ensemble. Cela comprend, entre autres, les éléments suivants:

- L'implication des acteurs concernés dans la définition de la politique (par exemple, les plans de mobilité). Cela peut se faire par la **co-création**, une forme de collaboration dans laquelle tous les participants influencent le résultat d'un processus et le chemin qui y mène.
- Les considérations à prendre en compte sont notamment l'accessibilité, la qualité de vie, la sécurité et l'inclusivité. La **réflexion inclusive** autour du développement des véhicules autonomes peut garantir que les usagers actifs de la route (qu'ils soient connectés ou non) soient dûment pris en compte.

- Un **débat** sur l'occupation de l'espace par différents modes de transport, la nécessité de trouver des alternatives et l'accessibilité doit encore être tenu.
 - La question est de savoir qui est encore autorisé à utiliser les infrastructures routières, où et quand;
 - Dans le cas extrême, il s'agit de l'accès à la ville.
 - Pour cela, il faut élaborer des scénarios⁷⁰ avec des modèles de trafic et une consultation des parties prenantes. Les scénarios devraient inclure des combinaisons de voitures particulières (électriques ou localement respectueuses de l'environnement d'une autre manière), de transports en commun traditionnels, de services de navette complémentaires, de taxis robots, de moyens de transport actifs et de micro-mobilité.
 - Il est très important de prêter attention à la question du stationnement: est-il moins cher de se garer que de rouler en voiture? Si oui, quelles sont les règles nécessaires? Y a-t-il des restrictions par type de véhicule?
- L'étude des **scénarios «best case» et «worst case»** dans le domaine des aspects liés à la mobilité (accessibilité, sécurité routière, qualité de vie). Plusieurs études (Backhaus, 2020; ITF, 2015) indiquent qu'une introduction non contenue de véhicules autonomes pourrait entraîner une augmentation du trafic. La question est double: qui peut agir et comment pour atténuer les effets négatifs, et quelles mesures peuvent être prises pour que le scénario best case soit le plus probable?

70

§ 4.2 (In)certitude et complexité.

4.4 Infrastructure routière

L'intention initiale du texte était d'examiner si certaines adaptations de l'infrastructure sont nécessaires ou utiles pour permettre ou faciliter le passage progressif aux véhicules autonomes. Logiquement, les exigences que les véhicules autonomes imposent aux infrastructures dépendent fortement de l'environnement dans lequel ils fonctionnent. C'est pourquoi le texte a été scindé en deux parties: les autoroutes et l'environnement urbain. Nous avons ajouté une partie sur les navettes, pour lesquelles les essais se déroulent principalement dans un environnement limité.

Etant donné que, pour la plupart des véhicules, des conducteurs continueront encore longtemps à effectuer eux-mêmes certaines actions et corrections, les **recommandations relatives à l'aménagement des infrastructures de trafic** (tracé des routes, environnement routier, signalisation, qualité et durabilité du revêtement routier) devront continuer à tenir compte de ces conducteurs humains pendant un certain temps encore.

Néanmoins, les constructeurs automobiles, les initiatives législatives, les évolutions attendues relatives à la flotte automobile et les expériences acquises lors des essais semblent indiquer qu'il va être nécessaire d'**adapter l'infrastructure routière** pour faciliter l'utilisation des véhicules autonomes. Une prise en compte de ces attentes lors de la (re)construction de l'infrastructure routière permettrait peut-être déjà de simplifier des adaptations ultérieures. Les besoins sur lesquels les constructeurs automobiles insistent le plus aujourd'hui (visibilité et harmonisation de la signalisation) sont quoi qu'il en soit judicieux pour les conducteurs humains.

Par tradition, les gestionnaires routiers tiennent compte de l'infrastructure physique. Toutefois, l'arrivée des véhicules autonomes introduit de **nouveaux domaines** auxquels les gestionnaires routiers doivent également prêter attention. Une représentation numérique de l'infrastructure physique (**digital twin**) peut être utilisée pour des systèmes de guidage ou en complément ou encore comme alternative pour la signalisation. Si le positionnement GNSS (GPS, Galileo, etc.) n'est pas disponible ou pas suffisamment

précis, des balises physiques peuvent devenir utiles pour permettre un positionnement (plus précis). Pour l'échange de données, l'infrastructure routière devra être complétée par une **infrastructure de communication**.

4.4.1 Signalisation

Les marquages routiers, les panneaux de signalisation, les panneaux à messages variables, les feux de circulation et autres systèmes de signalisation servent à transmettre un message aux conducteurs de véhicules. Si les systèmes du véhicule assistent le conducteur ou prennent en charge sa tâche de conduite, il est important que ce message soit également **accessible** à ces systèmes du véhicule, puis compris par les conducteurs. Il existe actuellement un certain nombre d'options qui peuvent se compléter ou servir de solution de secours si l'une des options est (temporairement) indisponible.

Les voitures équipées de capteurs doivent être en mesure de **reconnaître** et d'**interpréter** la signalisation. Cela implique de nombreux aspects: la signalisation doit être détectable, visible et lisible en toutes circonstances. Le message doit également être compréhensible et sans ambiguïté.

Dans le cas des niveaux d'automatisation inférieurs, cette information sera présentée au conducteur, qui est alors censé réagir de manière appropriée. Dans les niveaux supérieurs d'automatisation, des algorithmes peuvent interpréter ces messages et intervenir activement dans le comportement de conduite de la voiture.

Dans tous les cas, il est important que des capteurs soient capables de distinguer ces messages et de les interpréter correctement. Des mesures qui augmentent la **visibilité des panneaux de signalisation ou des marquages routiers**, même dans des conditions moins optimales, peuvent certainement y contribuer.

71

Le groupe d'experts de la CEE-ONU sur la signalisation routière (qui fait partie du WP sur la Sécurité routière), <https://www.unece.org/trans/main/welcwp1.html> tâche d'harmoniser la signalisation.

- Une harmonisation et une simplification de ces messages faciliteront l'interprétation correcte du message détecté par les systèmes des véhicules⁷¹;
- Des initiatives européennes en matière de signalisation facilitent l'arrivée des CAV homologués au niveau international. Les panneaux de signalisation routière et les marquages qui ne sont pas suffisamment reconnaissables et qui diffèrent d'un pays ou d'une région à l'autre augmentent le risque que les CAV ne les reconnaissent pas ou ne les comprennent pas⁷²;

72

Le groupe d'experts de la CE sur la sécurité des infrastructures routières (<https://ec.europa.eu/transparency/regexpert/index.cfm?do=groupDetail.groupDetail&groupID=3686>) examine si des caractéristiques de visibilité minimale pour la signalisation peuvent contribuer au déploiement des véhicules autonomes.

- En plus d'être utiles pour les systèmes des véhicules, les conducteurs humains tirent aussi profit de messages uniformes et clairement visibles. Les messages liés à la langue doivent être évités autant que possible.

Si les capteurs des véhicules ne sont pas en mesure de reconnaître correctement les panneaux de signalisation ou les marquages routiers, cette information peut être intéressante pour les gestionnaires routiers. Les systèmes connectés peuvent transmettre aux gestionnaires routiers les endroits où la signalisation n'est pas suffisamment reconnaissable. Ceux-ci peuvent utiliser ces informations comme alternative aux inspections visuelles et pour planifier un entretien. L'échange de données des véhicules avec les autorités routières peut ainsi contribuer à l'amélioration de l'infrastructure routière, tant au profit des véhicules autonomes qu'au profit des conducteurs humains.

Comme alternative ou en complément des capteurs, les véhicules automatisés peuvent également recevoir des messages via des **systèmes connectés**.

- Une représentation numérique de l'infrastructure physique consiste essentiellement en une **carte détaillée (numérique)** enrichie d'informations sur l'environnement routier et les règles de circulation (éventuellement dynamiques) en vigueur.
- Grâce à des systèmes de communication, la carte peut être mise à disposition dans le véhicule ou des informations sauvegardées peuvent être mises à jour. Avec ces systèmes, il est important que les modifications de l'infrastructure ou les incidents affectant le comportement de conduite attendu soient communiqués au véhicule en **temps réel**. Un point d'attention important ici est la sécurité des données et la sécurisation des données du véhicule, ainsi que le fonctionnement de ses fonctionnalités.
- Dans un premier temps, l'état de l'infrastructure sera probablement cartographié par une intervention humaine. Les **entrepreneurs** qui modifient la **configuration de la route** pendant des travaux routiers peuvent être invités à communiquer ces adaptations. Cela doit faire partie de la mission. Il existe aujourd'hui déjà des applications limitées qui permettent aux usagers de la route de transmettre des informations sur l'infrastructure routière au gestionnaire routier (par exemple via des applications spéciales). Les nouveaux développements et la numérisation dans le domaine des mesures d'auscultation et de l'inventaire routier peuvent également permettre à l'avenir d'utiliser les observations des systèmes des véhicules pour cartographier plus précisément l'état de l'infrastructure routière⁷³.

La signalisation peut également être équipée afin de communiquer directement avec les systèmes des véhicules. Les **feux de circulation** et les **panneaux à messages variables** en Flandre sont aujourd'hui déjà équipés de cette option par défaut ou équipés pour pouvoir l'ajouter ultérieurement. Des protocoles de communication standardisés sont actuellement en cours de discussion au niveau international.

4.4.2 Tracé et répartition de la route

Plusieurs publications **suggèrent** qu'une flotte de véhicules 100 % fiables et entièrement automatisés permettra d'adapter les recommandations relatives au tracé de la route. Les recommandations en matière de géométrie liées à la vue d'ensemble de la route pour les conducteurs humains joueront alors un rôle moins coercitif. Les routes pourraient alors être plus conformes au tracé naturel du terrain.

La capacité des routes augmente, non pas en raison du tracé ajusté ou d'une répartition différente, mais en raison d'une occupation plus importante (vitesse plus homogène et interdistance réduite)⁷⁴. En fin de compte, une situation avec uniquement des véhicules SAE L5 pourrait même aboutir à des bandes de roulement plus étroites (avec une marge de sécurité inférieure) et à des routes de plus grande capacité pour une même occupation de l'espace (ou à de nouvelles routes avec une occupation moindre pour une même capacité).

Toutefois, il est **peu probable** de ne voir **que des véhicules entièrement automatisés** en circulation dans un avenir proche. Pour l'instant, on ne sait pas très bien comment les incidents seront traités dans un système de trafic avec des voitures automatisées. Cela sera-t-il possible en toute sécurité avec l'aménagement actuel de la route (ou dans un avenir lointain, adapté) ou les véhicules automatisés continueront-ils à dépendre de certaines infrastructures (emplacements d'arrêt d'urgence, espace suffisant pour les véhicules d'intervention entre les véhicules de deux voies adjacentes) pour traiter les incidents en toute sécurité? Néanmoins, nous pouvons partir du principe que les véhicules totalement autonomes ne seront homologués que s'il existe des accords sur l'infrastructure sur laquelle ces véhicules peuvent compter pour gérer les incidents en toute sécurité.

73

P.ex. www.xenomatrix.com. La technique LIDAR permet d'analyser quels paramètres techniques peuvent être mesurés (planéité longitudinale, planéité transversale, inspection visuelle, reconnaissance des marquages sur la route, etc.). A long terme, il serait possible de collecter ces paramètres par le biais du crowd sourcing (si cette technologie est embarquée dans des véhicules autonomes).

74

§ 2.2.7 Capacité de la route.

Toutes les **recommandations** en vigueur aujourd'hui concernant le tracé de la route devraient donc être **maintenues**. En tenant déjà compte des modifications futures lors de la (re)construction, il est possible de limiter quelque peu des travaux de grande ampleur à un stade ultérieur.

- Afin de permettre, par exemple, l'utilisation (ultérieure) de voies à affectation variable ou un aménagement dynamique des voies, on peut envisager d'éviter autant que possible les **séparations physiques**, en tenant bien sûr toujours compte des recommandations existantes en matière de **sécurité routière**.
- La largeur des **bandes d'arrêt d'urgence** peut être ajustée de manière à ce qu'elles puissent être facilement converties ultérieurement en une voie réservée aux heures de pointe ou en une voie à part entière.
- De la place peut être prévue aux entrées et sorties ou aux **voies d'insertion** pour les étendre ultérieurement au profit du trafic automatisé et pour faciliter les mouvements d'insertion.

■ 4.4.3 Structure routière

Pour l'instant, il n'est pas possible de savoir avec certitude si les **futurs véhicules** ayant d'autres types de motorisation seront plus légers ou plus lourds. Sur la base de l'évolution actuelle de la masse des nouvelles voitures, de l'augmentation prévue du trafic et de l'estimation selon laquelle les futurs systèmes de véhicules pourraient permettre une utilisation plus efficace de la capacité routière existante, il semble probable aujourd'hui que l'**occupation d'une route**, tant par les voitures particulières que par le trafic de marchandises, ne fera qu'augmenter à l'avenir.

Cette augmentation de l'occupation est susceptible d'avoir des conséquences sur la **charge** d'une structure routière. Une mise à jour du spectre du trafic (tenant compte des caractéristiques récentes ou prévues des véhicules) et une estimation du volume de trafic sur la durée de vie prévue (tenant compte d'une éventuelle évolution de l'occupation des routes) peuvent donner lieu à des exigences différentes en matière de structure routière. En outre, en raison des taux d'occupation plus élevés, l'**indisponibilité d'une route** en raison de travaux ou d'accidents, aura inévitablement un impact plus important sur la mobilité.

Les structures routières qui sont mieux à même de supporter des charges plus élevées et les techniques de réparation rapides semblent gagner en importance. En tout état de cause, les **usagers de la route ordinaires** en bénéficient également.

■ 4.4.4 Revêtement routier

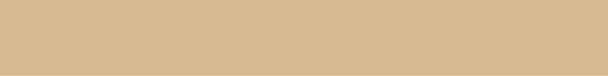
La génération actuelle de **capteurs** et d'**algorithmes** des **véhicules** peut détecter les défauts du revêtement routier avec plus ou moins de succès et les traiter avec succès. Les défauts de surface plus importants restent pour l'instant un problème et provoquent de temps à autre l'arrêt d'un véhicule autonome (en l'occurrence une navette).



Figure 4.5 – Les défauts de surface peuvent entraver le fonctionnement des véhicules autonomes

En outre, le revêtement routier joue également un rôle dans la **consommation d'énergie** et le **confort de conduite**. Ces deux aspects ne sont pas exclusivement liés aux véhicules autonomes, mais deviennent de plus en plus importants pour les véhicules électriques (autonomie, consommation) et pour les passagers des véhicules autonomes (p.ex. les navettes).

Pour l'instant, il ne semble pas nécessaire de renforcer les recommandations existantes pour les revêtements routiers. Par contre, il est logique de s'assurer que la **qualité du revêtement routier escomptée** soit effectivement atteinte et maintenue. En ce sens, il est logique de se concentrer sur des techniques de réparation de qualité et durables.



Chapitre 5

Informations générales

5.1 Réglementation pertinente

5.1.1 Europe

Voir le tableau à la page 72.

5.1.2 Belgique

Voir le tableau à la page 73.

			Type de législation	Législation	Description	Lien
La directive européenne sur les STI			Framework directive	2010/40/EU	Décrit le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents dans le domaine du transport routier et d'interfaces avec d'autres modes de transport. La directive contient 4 domaines principaux et 6 actions prioritaires. Chacun d'entre eux indique les priorités mises en avant par la Commission européenne. Les Etats membres de l'UE sont tenus de faire rapport périodiquement sur l'état d'avancement de la mise en œuvre. Certains éléments sont imposés par l'UE. Pour d'autres, si l'état membre veut mettre en œuvre ce service, on est lié par une méthode de travail prédéfinie.	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX:32010L0040
6 ITS directive Priority actions	a	Multimodal Travel Information Services (MMTIS)	Delegated Regulation	2017/1926	Décrit ce qu'il faut réaliser pour fournir des services d'information sur les déplacements multimodaux à l'échelle de l'UE.	https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2017/1926/oj?locale=fr
	b	Real-Time Traffic Information Services (RTTI)	Delegated Regulation	962/2015	Décrit ce qu'il faut réaliser pour mettre à disposition des services d'information sur le trafic en temps réel à l'échelle de l'UE.	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32015R0962
	c	Road safety related minimum universal traffic information free of charge to users (SRTI)	Delegated Regulation	886/2013	Décrit les données et les procédures pour la fourniture, dans la mesure du possible, d'informations minimales universelles sur la circulation liées à la sécurité routière gratuites pour les usagers.	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32013R0886
	d	eCall	Delegated Regulation	305/2013	Décrit comment la mise en place d'un système eCall interopérable harmonisé à l'échelle de l'UE devrait se faire.	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32013R0305
	e	Information services for safe and secure parking places for trucks and commercial vehicles	Delegated Regulation	885/2013	Décrit comment mettre à disposition des services d'information sur les places de stationnement sûres et sécurisées pour les camions et les véhicules commerciaux.	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32013R0885
	f	Reservation services for safe and secure parking places for trucks and commercial vehicles		On hold	Les développements vers un Règlement Délégué concernant les services de réservation de places de stationnement sécurisées pour les camions et les véhicules commerciaux ont été mis en suspens en raison du manque d'intérêt des états membres.	
EU cybersecurity Act			Regulation	2019/881	The EU Cybersecurity Act revamps and strengthens the EU Agency for cybersecurity (ENISA) and establishes an EU-wide cybersecurity certification framework for digital products, services and processes.	https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/881/oj
General Data Protection Regulation			Regulation	2016/679	Regulation on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data.	https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj
Revised General Safety Regulation			Regulation	2019/2144	Type-approval requirements for motor vehicles and their trailers, and systems, components and separate technical units intended for such vehicles, as regards their general safety and the protection of vehicle occupants and vulnerable road users.	https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2144/oj

LEGISLATION DE L'UE

Tableau 5.2 – Réglementation pertinente (nationale)

		Type de législation	Numéro Législation	Description	Lien
Législation belge	Loi portant création du cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents	Transposition de la directive-cadre	53-2943	Cela inclut la transposition de la directive-cadre européenne dans la législation belge.	http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=fr&la=F&cn=2013081735&table_name=loi
	Accord de coopération concernant la directive 2010/40/UE entre les Régions et le Service public fédéral Mobilité	Accord de coopération	C-2016/14240	Accord de coopération relatif à la Directive 2010/40/UE du Parlement européen et du Conseil du 7 juillet 2010 concernant le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents dans le domaine du transport routier et d'interfaces avec d'autres modes de transport.	http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2016/08/12/134026.pdf
	Code de bonnes pratiques d'expérimentation en Belgique pour les véhicules (semi-) autonomes sur la voie publique	Ligne directrice (pas une législation)	N/A	Il ne s'agit pas d'une législation, mais d'un cadre qui définit les rôles et les responsabilités ainsi qu'une manière de collaborer pour les tests effectués avec des véhicules de plus haut niveau d'automatisation sur la voie publique.	https://mobilit.belgium.be/fr/circulationroutiere/vehicules_et_leurs_elements/systemes_de_transports_intelligents_its/vehicules
Flandre	Décret concernant le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents	Transposition de la directive-cadre de l'UE	Publication: 2013-04-16 Numac: 2013035341	Décret concernant le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents dans le domaine du transport routier et d'interfaces avec d'autres modes de transport (1).	http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/article_body.pl?language=fr&caller=summary&pub_date=13-04-16&numac=2013035341
	Arrêté du Gouvernement flamand concernant le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents	Décision du gouvernement flamand	Publication: 24/07/2013 Numac: 2013035655	Arrêté du Gouvernement flamand relatif au cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents dans le domaine du transport routier et d'interfaces avec d'autres modes de transport (1).	http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/article_body.pl?language=fr&caller=summary&pub_date=13-07-24&numac=2013035655
	Mobilité connectée et automatisée en Flandre	Note conceptuelle bis (pas une législation)	GF 2018 0203 DOC.0194/1BIS	Note conceptuelle bis au Gouvernement flamand concernant la CCAM.	https://www.ewi-vlaanderen.be/sites/default/files/conceptnota_-_geconnecteerde_en_geautomatiseerde_mobiliteit_in_vlaanderen.pdf

5.2 Définitions / abréviations

ABS	A nti-lock B raking S ystem
ACC	A daptive C ruise C ontrol
AD	A utomated D riving
ADAS	A dvanced D river A ssistance S ystem
AEB	A utonomous E mergency B raking
AEBS	A dvanced E mergency B raking S ystem
AI	A rtificial I ntelligence
AWV	A gentschap W egen en V erkeer (B)
BIM	B uilding I nformation M odelling
CACC	C onected A daptive C ruise C ontrol
CAV	C onected and A utonomous V ehicles
CCAM	C onected C ooperative A utomated M obility
CEDR	C onférence E uropéenne des D irecteurs des R outes [CEDR]
C-ITS	C ooperative I ntelligent T ransport S ystems
C-ITS Day 1 Services	<i>Agreed list of services with mature technology and expected societal benefits (voir plus loin)</i>
C-ITS Day 1.5 Services	<i>Mature and desired services which are still missing complete specifications and/or standards (voir plus loin)</i>
DAS	D river A lert S ystems
DFM	D river F atigue M onitor
EDR	E vent D ata R ecorder
EV	E lectric V ehicle

GNSS	G lobal N avigation S atellite S ystem
GPS	G lobal P ositioning S ystem (US)
ISA	I ntelligent S peed A daptation
iTLC	I ntelligent T raffic L ight C ontrollers
ITS-G5	Communication courte distance sur la bande de 5,9 GHz
KPI	K ey P erformance I ndicator
LED	L ight- e mitting D iode
LEZ	L ow E mission Z one
LDWS	L ane D eparture W arning S ystem
LKA	L ane K eeping A ssistance
LKS	L ane K eeping S ystems
LTE-V2X	L ong- T erm E volution V ehicular T o X (Concurrerend communicatieprotocol)
MaaS	M obility a s a S ervice
MMTIS	M ultimodal T raavel I nformation S ervices
NOx	N itrogen O xides
ODD	O perational D esign D omain
PM	P articulate M atter
PMR	P ersonne à M obilité R éduite (B)
PMV	P anneaux à M essages V ariables
PN	P article N umber

PUDO	Zones for P icking U p and D ropping O ff passengers
RBC	Région de B ruelles- C apitale
RTTI	R ea -T ime T raffic I nformation S ervices
RWS	R ijk w ater s tstaat (NL)
RWW	R oad W orks W arning
SAE	S ociety of A utomotive E ngineers (US)
SAM	S hared A utonomous M obility
SMMT	The S ociety of M otor M anufacturers and T raders Limited
SPW	S ervice P ublic de W allonie (B)
SRTI	S afety R elated T raffic I nformation
TMS	T raffic M anagement S ystem
V2I	V ehicle t o I nfrastructue
V2P	V ehicle t o P edestrian
V2V	V ehicle t o V ehicle
V2X	V ehicle t o E verything
VA	V oiture a utonome
VWI	V ademecum W eginfrastructuur (AWV)
ZEZ	Z ero E mission Z one
5G	5 e G eneratie mobiele netwerk

Tableau 5.3 – Abréviations

5.3 Essais: sites d'essai et *Living Labs* (UE)

5.3.1 Belgique

En accord avec des partenaires (services publics régionaux, fédérations sectorielles Agoria asbl et Febiac asbl, IBSR asbl (actuellement: Institut VIAS)), le SPF Mobilité et Transports a rédigé en 2015/2016 un code de bonnes pratiques d'expérimentation en Belgique (SPF Mobilité et Transports, 2016b).

Ce code de bonnes pratiques propose des lignes directrices aux organisations qui souhaitent effectuer des essais avec des technologies pour les systèmes d'aide à la conduite et les véhicules automatisés sur la voie publique ou dans d'autres lieux publics en Belgique. Ce code de bonnes pratiques est destiné aux applications suivantes:

- tester des systèmes d'aide à la conduite et des technologies automobiles partiellement, voire entièrement automatisées sur la voie publique ou dans d'autres lieux publics en Belgique;
- tester une large gamme de véhicules, allant des petits modules et navettes automatisés aux véhicules routiers plus traditionnels tels que des voitures, des camionnettes, des bus ou des camions.

Tests (liste non exhaustive)

- E313 (B, associé au projet InterCor);
- piste d'essai FORD à Lommel (B) indiquée comme potentiellement intéressante pour certains essais (en particulier le comportement des véhicules sur différents revêtements routiers, *vehicle probe data*);
- navette de Han-sur-Lesse (Institut VIAS et Service public fédéral Mobilité et Transports [SPF Mobilité et Transports], 2018);
- Navajo, Louvain-la-Neuve;
- Brussels Airport Company & *De Lijn*, Zaventem;
- SAM-e, Parc Woluwe / Campus Solvay / Hôpital Brugmann;
- Hôpital Maria Middelaers, Gand;
- UZ Bruxelles;
- Campus de l'hôpital de la VUB, Bruxelles.

5.3.2 A l'échelle mondiale (aperçu)

- *Shared Personalized Autonomous Connected vEhicles project* (<https://space.uitp.org>) SPACE a été lancé par l'UITP en mars 2018 dans le but de placer les transports en commun au centre de la révolution des véhicules automatiques (VA);
- Le site web donne un aperçu des tests existants et des concepts futurs, répartis en différents habitats: *rural - low density, small isolated city, suburban* et *urban (high density)*;
- *De Lijn*, la STIB et la VUB font partie des cinquante partenaires du projet (ouvert à tous les partenaires de l'UITP).



Figure 5.1 – Coupe de la Progress map des initiatives en matière de transports en commun autonomes (UITP, s.d.)

5.3.3 Europe

- Cooperative C-ITS Corridor (A, D, NL, <https://intercor-project.eu>): Road Works Warning, Sensor Data from Vehicles;
- Dutch Integrated Test Site for Cooperative Mobility Setting (NL, Helmond): partie de la N270 et de l'A270 équipée de caméras avec détection et suivi de véhicules et de services ITS-G5;
- A9 Autobahn (D): Digital Motorway test bed. Test de la technologie V2V et V2I;
- UK Cite (GB, www.ukcite.co.uk) voie publique équipée d'infrastructures pertinentes et disponibles pour des tests de communication V2X;
- Corridor Rotterdam – Frankfurt/Wenen (NL & D, <https://c-its-korridor.de/>) RWW et utilisation des données des véhicules pour la gestion du trafic;
- New generation ParkShuttle in Rotterdam region (Capelle aan den IJssel), <https://www.2getthere.eu/>;
- A12 au Tyrol (A): test des systèmes coopératifs;
- AstaZero (S, www.astazero.com) dedicated test site which simulates different traffic environments (highway, urban, rural) and which allows to simulate different traffic scenarios and incidents;
- Site de test Stora Holm (S, www.storaholm.se);
- DriveMe (S): projet Volvo sur le ring de Göteborg (banlieue, 70 km/h, pas de piétons, nombreux flux de trafic distincts). Pas d'installations spécifiques, test de systèmes d'aide à la conduite (ADAS, no connectivity);
- Tre VTT (FIN, www.vttresearch.com) concentration sur automation scenarios en environnement urbain;
- Nordicway (DK, <http://vejdirektoratet.dk/EN/roadsector/Nordicway/Pages/Default.aspx>) test de services C-ITS;
- Navette La Défense, Paris (F, <https://www.transportshaker-wavestone.com/la-navette-autonome-la-conquete-de-la-defense/>);
- Navette Lyon, (F, <https://www.keolis.com/en/our-services/transport-solutions/autonomous-shuttles>);

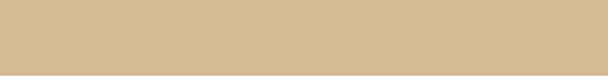
- Transpolis (F, www.transpolis.fr) nouveau site d'essai avec environnement urbain simulé pour tester des nouvelles technologies;
- Scoop (F, <https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility/cef-transport/2014-eu-ta-0669-s>) avec 3 000 véhicules qui communiquent sur 2 000 km de routes interconnectées, validation des services C-ITS;
- Siscoga (E, site d'essai espagnol).

5.3.4 Projets

- Arcade platform, <https://knowledge-base.connectedautomateddriving.eu/>;
- Avenue, Autonomous vehicles for Public Transportation Services, <https://h2020-avenue.eu/>;
- CoEXist, Working towards a shared road network, <https://www.h2020-coexist.eu/>;
- Concorda, Connected Corridor for Driving Automation, <https://connectedautomateddriving.eu/project/concorda/>;
- DIRIZON, <https://www.dirizon-cedr.com/>;
- DRAGON, DRiving Automated vehicle Growth On National roads, <https://www.cedr.eu/strategic-plan-tasks/research/cedr-call-2014/call-2014-mobility/>;
- Inframix, <https://www.inframix.eu/>;
- Intercor, Interoperable Corridors deploying cooperative intelligent transport systems, <https://intercor-project.eu/>;
- Levitate, Societal Level Impacts of Connected and Automated Vehicles, <https://levitate-project.eu/>;
- Mediator, <https://www.swov.nl/en/news/mediator-european-research-autonomous-vehicles>;
- RIMA, Robotics for Inspection and Maintenance, <https://rimanetwork.eu/>;
- Skillful, <https://skillfulproject.eu/>;
- STAPLE, Site Automation Practical Learning, <https://www.stapleproject.eu/>;
- TransAID, Transition areas for infrastructure-assisted driving, <https://www.transaid.eu/>;
- Drive 2 the future, <https://www.drive2thefuture.eu/>;
- SHOW, SHared automation Operating models for Worldwide adoption, <https://show-project.eu/>;
- Autonomous Shuttle Service for the Brussels Health Campus, <http://www.avlab.brussels>.



Figure 5.2 – Test de la navette autonome sur le Brussels Health Campus (Vrije Universiteit Brussel [VUB], 2019)



Chapitre 6

Bibliographie

- 3M. (2019, mai 15). Machine vision and contrast: How automated vehicles see the roads. *Intertraffic*. Récupéré de <https://www.intertraffic.com>
- Ackermann, T. (2017, novembre). *The MEGAFON study and PTO's future roles*. Présentation sur Progress event of Mobility 4.0: Public transport at the heart of the transition, Bruxelles, Belgique. Récupéré de <http://www.stib-mivb.be/irj/go/km/docs/resource/Presentations/RDV-2017/Till-Ackermann.pdf>
- Adapting infrastructure for a driverless future. (2016, octobre 1). *WSP*. Récupéré de <https://www.wsp.com/en-GL>
- Adventure Cycling Association. (s.d.). *Road weary: When technology & engineering fails cyclists* [Presentation]. Récupéré de https://ecf.com/sites/ecf.com/files/Sullivan.V_Road_Weary_When_Technology_and_Engineering_Fails_Cyclists.pdf
- Albright, B. (2017, mars 7). Self-driving vehicles will impact service, logistics industries. *Field Technologies Online*. Récupéré de <https://www.fieldtechnologiesonline.com/>
- Alpha SQUAD official. (2018, septembre 12). *BMW self riding motorcycle: BMW autonomous driving bike/BMW self riding bike/BMW R 1200 GS* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=XMuMoZIVYqs>
- Ambrosius, E. (2018, décembre). *Autonomous driving and road markings*. Presentation for the IRF & UNECE ITS event on governance and infrastructure for smart and autonomous mobility, Genève, Suisse. Récupéré de https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2018/wp29grva/s1p5_Eva_Ambrosius.pdf
- Arcadis. (2018). *Citizens in motion: Who's driving your future?*. Récupéré de <https://www.arcadis.com/en/global/our-perspectives/connected-and-autonomous-vehicles/citizens-in-motion/>
- Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA). (2019). *Automated driving: Roadmap for the development of automated driving in the European Union*. Récupéré de https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_Automated_Driving_Roadmap.pdf
- Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) & European Association of Automotive Suppliers (CLEPA). (2019). *Perspectives of the European automotive industry on future C-ITS spectrum needs for cooperative, connected and automated mobility (ACEA-CLEPA Paper)*. Récupéré de https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA-CLEPA_paper-Spectrum_needs-November_2019.pdf
- Autonome voertuigen: Nieuw paard van Troje? [Blog post]. (s.d.). Récupéré de <https://www.mobiel21.be/blog/autonome-voertuigen>

- Backhaus, W. (2020, mars). *Strengthening capacities of road authorities to plan for the transition phase of co-existence of conventional and connected and automated vehicles*. Présentation sur le joint dissemination of H2020, CEDR projects and other initiatives related to CAVs and infrastructure event, Bruxelles, Belgique. Récupéré de <https://www.fehrl.org/>
- Bannon, E. (2016, novembre 13). Lessons from Norway's electric surge. *Transport & environment (TE)*. Récupéré de <https://www.transportenvironment.org>
- Besluit van de Vlaamse Regering van 5 juli 2013 betreffende het kader voor het invoeren van intelligente vervoerssystemen op het gebied van wegvervoer en voor interfaces met andere vervoerswijzen. (2013, juillet 24). (Numac No 2013035655). Récupéré de <https://www.etaamb.be/nl/index.html>
- Blue Planet Studio. (s.d.). *Concept de technologie de transport intelligente pour le futur trafic automobile sur route: Le système intelligent virtuel effectue une analyse numérique de l'information pour connecter les données du véhicule sur la rue de la ville: Innovation futuriste* [Stockfoto]. Shutterstock. Récupéré de <https://www.shutterstock.com/fr/image-photo/smart-transport-technology-concept-futurecar-1784203961>
- Bösch, P.M., Becker, F., Becker, H. & Axhausen, K.W. (2018). Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transport policy*, 64, 76-91. Récupéré de <https://doi.org/10.1016/j.transpol.2017.09.005>
- Brown, T. (2018). The last mile to automation: How autonomous vehicles could solve the last mile delivery problem. *IT chronicles*. Récupéré de <https://itchronicles.com>
- Brussels Airport & De Lijn. (2018, Avril 20). *Brussels Airport en De Lijn starten proefproject met zelfrijdende bus: Begin 2020 test op terreinen luchthaven* [Communiqué de presse]. Récupéré de <https://delijn.prezly.com/brussels-airport-en-de-lijn-starten-proefproject-met-zelfrijdende-bus>
- Bruxelles Mobilité. (2019, octobre 24). Good Move: Les premiers résultats de l'enquête publique sont là!. *Good Move*. Récupéré de <https://goodmove.brussels/fr>
- Bruxelles Mobilité, VIAS Institute & Wikibus. (2017, octobre). *Workshop véhicules autonomes: Synthèse, Spa-Francorchamps, Belgium*. Récupéré de <https://goodmove.brussels/fr/orientations/>
- Bureau de Normalisation (NBN). (2002-2010). *Dispositifs de retenue routiers* (NBN EN 1317[-1-3]: 2010; NBN ENV 1317-4: 2002). Bruxelles: Auteur.
- Bureau de Normalisation (NBN). (2019). *Sécurité passive des structures supports d'équipements de la route: Prescriptions et méthodes d'essai* (NBN EN 12767: 2019). Bruxelles: Auteur.
- BV. (2020, avril 22). Stuttgart schafft dieserverbod af: Hoe corona een boom onder de lage-emissiezone legt. *Auto55*. Récupéré de <https://www.auto55.be/>
- C-ITS Platform. (2016). *C-ITS Platform: Final report*. Récupéré de <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/its/doc/c-its-platform-final-report-january-2016.pdf>
- Carlson, P. (2019, janvier 1). How automated vehicles will change pavement marking. *ForConstructionPros.com*. Récupéré de <https://www.forconstructionpros.com>
- Carreras, A., Daura, X., Erhart, J. & Ruehrup, S. (2018, septembre). *Road infrastructure support levels for automated driving*. Paper for the 25th ITS world congress on quality of life, Copenhagen, Danemark. Récupéré de https://www.inframix.eu/wp-content/uploads/ITSWC2018-ASF-AAE-Final-paper_v4.pdf

- Carter, J. (2019, octobre 30). Zombie technologies of electric vehicles: Wireless charging. *Electric autonomy Canada*. Récupéré de <https://electricautonomy.ca>
- CFO Redactie. (2016, mai 27). Scenario-based planning: De grip op onzekerheid versterken. *CFO*. Récupéré de <https://cfo.nl>
- Chen, F., Balieu, R. & Kringos, N. (2017, juin). *Sustainable implementation of future smart road solutions: A case study on the electrified road*. In A. Loizos, I.L. Al-Qadi & A. Scarpas (Eds.), *Proceedings of the 10th international conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields (BRRCA 2017)*, Athens, Greece (pp. 2201-2207). Boca Raton, USA: CRC Press.
- Clapaud, A. (2017, mai). *Qui dit voiture autonome dit route intelligente*. L'atelier BNP Paribas: Smart city. Récupéré de <https://www.aif.fr>
- Claeys, T. (2018, novembre 27). Is er ruimte voor autonome voertuigen binnen stadslogistiek?: VIL onderzoekt potentieel van zelfrijdende voertuigen als pakjesbezorgers. *Value chain*. Récupéré de <https://www.valuechain.be/>
- Clément-Werny, C., Belloche, S., Ferrando, J., Mathieu, Y. & Durand-Fleury, T. (2019). *Véhicules et mobilités autonomes: Quelles attentes citoyennes pour demain?* (Connaissances CEREMA). Bron, France: Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA).
- Commission européenne (CE). (2016a, avril 19). *Digitising European industry: Reaping the full benefits of a digital single market* (Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité Economique et Social européen et au Comité des Régions No COM[2016] 180, final). Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Commission européenne (CE). (2016b, novembre 30). *A European strategy on cooperative intelligent transport systems, a milestone towards cooperative, connected and automated mobility* (Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité Economique et Social européen et au Comité des Régions No COM[2016] 766, final). Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Commission européenne (CE). (2018, mai 17). *On the road to automated mobility: AN EU strategy for mobility of the future* (Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité Economique et Social européen et au Comité des Régions No COM[2018] 283, final). Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html> Concorda pilot Amsterdam in volle gang. (2019, September 30). *Praktijkproef Amsterdam*. Récupéré de <https://www.praktijkproefamsterdam.nl/actueel/nieuws/concorda-pilot-amsterdam-volle-gang>
- Concorda pilot Amsterdam in volle gang (2019, septembre 30). *Praktijkproef Amsterdam*. Récupéré de <https://www.praktijkproefamsterdam.nl/actueel/nieuws/concorda-pilot-amsterdam-volle-gang>
- Conférence Européenne des Directeurs des Routes (CEDR). (s.d.). *MANTRA: Making full use of automation for national transport and road authorities: NRA core business*. Récupéré de <https://www.mantra-research.eu/>
- Continental. (2019, janvier 8). *Continental's vision: Seamless mobility combines autonomous shuttles and delivery robots* [Press release]. Récupéré de <https://www.continental.com/en>
- Corot, L. (2017, juillet 11). Renault va faire communiquer la voiture avec les bornes de péage. *L'usine nouvelle*. Récupéré de <https://www.usinenouvelle.com>

- Couplez, V. (2019, septembre 17). Les camions de chantier plus légers, plus sûrs et confortables: Évolution vers les véhicules mixtes de chantier. *InfraStructure*. Récupéré de <https://infrastructure.pmg.be/fr/home>
- COWI & PTV Group. (2019). *The Oslo study: How autonomous cars may change transport in cities*. Récupéré de <https://www.cowi.com/about/news-and-press/new-report-how-self-driving-transport-will-affect-the-oslo-region>
- Créer et gérer des emplacements de stationnement résevés: Le règlement de stationnement en Région de Bruxelles-Capitale. (2019). *La CeMathèque*, (49), 27. Récupéré de <http://mobilite.wallonie.be/home/centre-de-documentation/cematheque.html>
- Decreet van 29 maart 2013 betreffende het kader voor het invoeren van intelligente vervoerssystemen op het gebied van wegvervoer en voor interfaces met andere vervoerswijzen*. (2013, avril 16). (Numac No 1013035341). Récupéré de <https://www.etaamb.be/nl/index.html>
- Deelstep is door beperkte levensduur vervuilender dan andere transportmiddelen. (2020, mars 10). *Het Laatste Nieuws (HLN)*. Récupéré de <https://www.hln.be>
- Directive 2010/40/UE du Parlement Européen et du Conseil du 7 juillet 2010 concernant le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents dans le domaine du transport routier et d'interfaces avec d'autres modes de transport. (2010). *Official journal of the European Union*, L207, 1-13. Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Dirnwöber, M. (2018, novembre). *Inframix: Road infrastructure ready for mixed vehicle traffic flows*. Présentation sur l'European conference on results from road transport research, Bruxelles, Belgique. Récupéré de <https://www.inframix.eu/wp-content/uploads/H2020RTR-nov-2018-INFRAMIX.pdf>
- Dunkerley, F., Whittaker, B., Laird, J. & Daly, A. (2018). *Latest evidence on induced travel demand: An evidence review*. Récupéré du site Web de Assets Publishing Service, UK Government: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/762976/latest-evidence-on-induced-travel-demand-an-evidence-review.pdf
- Dutch Safety Board. (2019). *Who is in control?: Road safety and automation in road traffic*. Récupéré de <https://www.onderzoeksraad.nl/en>
- Duvall, T., Hannon, E., Katseff, J., Safran, B. & Wallace, T. (2019, mai 22). A new look at autonomous-vehicle infrastructure. *McKinsey & Company*. Récupéré de <https://www.mckinsey.com>
- Erhart, J. (2018, septembre). *Road infrastructure support levels for automated driving*. Présentation au 25th ITS world congress on quality of life, Copenhagen, Danemark. Récupéré de <https://www.inframix.eu/presentations/>
- ERTRAC Working Group «Connectivity and Automated Driving». (2017). *Automated driving roadmap* (version 7.0, final). Récupéré de <https://www.ertrac.org>
- EU wijst voorstel wifi-gebaseerde standaard voor verbonden auto's af. (2019, juin 8). *Techzine*. Récupéré de <https://www.techzine.be>
- European Commission (EC). (s.d.). *New safety features in your car*. Récupéré de <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/34588/attachments/1/translations/en/renditions/native>

- European Commission (EC). (2019). *Continuously open call for applications for the selection of members of the «single platform for open road testing and pre-deployment of cooperative, connected, automated and autonomous mobility»* (version 1.0). Récupéré de https://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/2019-02-26-call-applications-single-platform_fr
- European Commission (EC), Innovation and Networks Executive Agency (INEA). (2019). *Automated road transport: On the way to connected and automated mobility: Horizon 2020*. Récupéré de https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/art_brochure-2019.pdf
- European Road Federation (ERF). (s.d.). *Recommendations to define the technical performance of road markings: Supporting scientific literature*. Récupéré de <https://erf.be/press-releases/recommendations-to-define-the-technical-performance-of-road-markings/>
- European Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC). (2019a). *Connected automated driving roadmap* (version 8). Récupéré de <https://www.ertrac.org>
- European Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC). (2019b, avril 4). *Connected automated driving roadmap: 2019 update*. Présentation sur ERTRAC conference, Bruxelles, Belgique. Récupéré de <https://www.ertrac.org/uploads/images/ERTRAC2019-Connected-Automated-Driving-Roadmap%20-2019-04-04.pdf>
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (2019). *Intelligent transport system (ITS): Vulnerable road users (VRU) awareness. Part 1: Use cases definition: Release 2* (ETSI Technical Report No ETSI TR 103 300-1, V2.1.1). Récupéré de https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103300_103399/10330001/02.01.01_60/tr_10330001v020101p.pdf
- Faggella, D. (2020, mars 14). *The self-driving car timeline: Predictions from the top 11 global automakers*. *Emerj*. Récupéré de <https://emerj.com>
- Faludi, A. (1973). *Planning theory* (Urban and Regional Planning Series, 1st edition). Oxford: Pergamon Press.
- Farah, H. (2016). *State of the art on infrastructure for automated vehicles: Research report summarizing the scientific knowledge, research projects, test sites, initiatives, and knowledge gaps regarding infrastructure for automated vehicles*. Récupéré du site Web de la TUDelft: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:27b22b96-159b-4c45-bcca-b0fefc9969be?collection=research>
- Federal Ministry of Transport, Innovation and Technology & Federal Agency for Technological Measures (austriatech). (2019, novembre). *Results report of the 4th high level meeting on automated & connected mobility «beyond SAE levels: Towards safe & sustainable mobility»*, Vienne, Autriche. Récupéré de <https://www.austriatech.at/assets/Uploads/Publikationen/PDF-Dateien/9b75e638e4/High-Level-Meeting-on-Automated-and-Connected-Mobility-Report-2019.pdf>
- Federal Service for Mobility and Transport (2020, février). *Legal framework for the introduction of autonomous buses in Belgium: Vision of the Federal Service for Mobility and Transport*. Presentation on the ITS.be workshop autonomous shuttles, n.l. Récupéré de <http://www.its.be/sites/default/files/SPF%20mobility.pdf>
- Fernique, L. (s.d.). *Grand livrable la vie robomobile 2018. Mobilité intelligente (M3.0)*. Récupéré de <https://www.mobilite-intelligente.com>
- Feys, M., Rombaut, E., Macharis, C. & Vanhaverbeke, L. (2020, novembre). *Understanding stakeholders' evaluation of autonomous vehicles in fleets of shared vehicles and integrated with public transport services in an urban setting* [Paper submitted for publication]. IEEE Forum on integrated and sustainable transportation system (ISTS 2020), Delft, Les Pays-Bas.

- Filippi, A., Moerman, K., Daalderop, G., Alexander, P.D., Schober, F. & Pfliegl, W. (s.d.). *Ready to roll: Why 802.11p beats LTE and 5G for V2x* [white paper]. Récupéré de <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public/1510309207.ab5935c545ee430a94910921b8ec75f3c17bab6c.its-g5-ready-to-roll-en.pdf>
- Frederik, Jesse. (2020, février 24). Your car has a weight problem and we need to regulate it. *The Correspondent*. Récupéré de <https://thecorrespondent.com/310/your-car-has-a-weight-problem-and-we-need-to-regulate-it/41009665950-d1c675d3>
- Friedrich, B. (2015). *The effect of autonomous vehicles on traffic*. In M. Maurer, C. Gerdes, B. Lenz & H. Winner (Eds.), *Autonomous driving: Technical, legal and social aspects* (Chapitre 16, pp. 317-334). Récupéré de <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-48847-8>
- Friedrich, M. & Hartl, M. (2016). *Schlussbericht MEGAFON: Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs*. Récupéré de the University of Stuttgart website: https://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/MEGAFON_Abschlussbericht_VO28_20161212.pdf
- Fundamentele relatie. (2020). Récupéré juin 4, 2020, de Fandom: https://verkeer.fandom.com/wiki/Fundamentele_relatie
- Gabriel12. (s.d.). *Paris, France- 2nd October, 2019: Busy mix of roadway traffic around place Saint Michel in Central Paris* [Stockfoto]. Shutterstock. Récupéré de <https://www.shutterstock.com/fr/image-photo/paris-france-2nd-october-2019-busy-1532785715>
- Gavanas, N. (2019). Autonomous road vehicles: Challenges for urban planning in European Cities. *Urban science* 3(2), 61. Récupéré de <https://doi.org/10.3990/urbansci3020061>
- Gemeinsam Lösungen finden. (2019, mei 8). *Austriatech*. Récupéré de <https://www.austriatech.at>
- Geneva Convention on Road Traffic. Septembre 19, 1949. Récupéré de <https://www.worlddriversassociation.com/pdf/CONVENTION%20ON%20ROAD%20TRAFFIC1949.pdf>
- Germanchev, A., Eastwood, B. & Hore-Lacy, W. (2019). *Infrastructure changes to support automated vehicles on rural and metropolitan highways and freeways. Module 2: Road audit* (Austroads Technical Report No AP-T348-19). Récupéré de <https://austroads.com.au>
- Gowling WLG. (2018, août 15). How will infrastructure need to change for connected and autonomous vehicles (CAVs)?. *Lexology*. Récupéré de <https://www.lexology.com>
- Gowling WLG & UK Autodrive. (2018). *Paving the way: Building the road infrastructure for connected and autonomous vehicles*. Récupéré de <https://gowlingwlg.com/getmedia/af950092-954a-43ac-ad8f-b6df65734014/building-the-road-infrastructure-of-the-future.pdf.xml?ext=.pdf>
- Hagenzieker, M.P., van der Kint, S., Vissers, L., Van Schagen, I.N.L.G., de Bruin, J., van Gent, P., Commandeur, J.J.F. (2020). Interactions between cyclists and automated vehicles: Results of a photo experiment. *Journal of transportation safety & security* 12(1), 94-115. Récupéré de <https://doi.org/10.1080/19439962.2019.1591556>
- Hannon, E., Knupfer, S., Stern, S., Summers, B. & Nijssen, J.T. (2019). *An integrated perspective on the future of mobility. Part 3: Setting the direction toward seamless mobility* (Sustainability & Resource Productivity Practice). Récupéré du site Web de McKinsey & Company: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/the%20road%20to%20seamless%20urban%20mobility/an-integrated-perspective-on-the-future-of-mobility-part-3-vf.ashx>

- Harari, Y.N. (2018). *21 lessons for the 21st century*. London: Random House.
- Heilig, M., Mallig, N., Schröder, O., Kagerbauer, M. & Vortisch, P. (2018). Implementation of free-floating and station-based carsharing in an agent-based travel demand model. *Travel behavior and society*, 12, 151-158. Récupéré de <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2017.02.002>
- High Level Group on the Competitiveness and Sustainable Growth of the Automotive Industry in the European Union (GEAR 2030). (2017). *GEAR 2030: Final report*. Récupéré de https://ec.europa.eu/growth/content/high-level-group-gear-2030-report-on-automotive-competitiveness-and-sustainability_en
- Hill, A. (Ed.). (2019). Big ideas: What's the future of mobility going to look like? [Édition spéciale]. *ITS International*, 25(May/June). Récupéré de <http://digital.itsinternational.com/2019/global/may-jun/html5/index.html>
- Hormann, J. & Bakker, S. (2019). *Stappenplan iVRI: Handreiking voor wegbeheerders*. Récupéré du site Web de la Kennisplatform CROW: <https://www.crow.nl/downloads/pdf/verkeer-en-vervoer/verkeersmanagement/verkeersregelinstallaties/stappenplan-ivri>
- How connectivity will make roads and cars safer in 2019. (2019, janvier 31). *Austriatech*. Récupéré de <https://www.austriatech.at>
- Hughes, H. (2018, septembre 27). *Connected and autonomous vehicles (CAV): Implications for road authorities and TII* [présentation]. Dublin: Transport Infrastructure Ireland (TII). Récupéré de https://www.tii.ie/tii-library/conferences_and_seminars/
- Huizenga, R. & Berge, Ø. (2019). Oslo-studie: De impact van autonome voertuigen op het vervoer in de stad. *NM magazine*, 14(2), 28-29. Récupéré de <https://www.nm-magazine.nl>
- I-DREAMS. (s.d.). Récupéré de <https://idreamsproject.eu/wp/>
- Immers, B., Tampère, C. & Logghe, S. (2009). *10 verbeteropties op weg naar een performant en duurzaam transportsysteem voor België*. Récupéré du site Web de la Fédération belge et luxembourgeoise de l'automobile et du cycle. Récupéré de http://www.febiac.be/documents_febiac/2009/etude-touring/master%20v05.pdf
- Inframix. (2017). *Infrastructure categorization: ISAD levels*. Récupéré de <https://www.inframix.eu/infrastructure-categorization/>
- InterCor: *Interoperable corridors deploying cooperative intelligent transport systems* [brochure]. (2020, January). Récupéré de <https://intercor-project.eu/library/#>
- International Association of Public Transport (UITP). (s.d.). *SPACE: The road to better mobility*. Récupéré de <https://space.uitp.org/>
- International Transport Forum (ITF). (2015). *Urban mobility system upgrade: How shared self-driving cars could change city traffic* (ITF Corporate Partnership Board [CPB] Report). Récupéré de https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb_self-drivingcars.pdf
- International Transport Forum (ITF). (2017). *Transition to shared mobility: How large cities can deliver inclusive transport services* (ITF Corporate Partnership Board [CPB] Report). Récupéré de <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/transition-shared-mobility.pdf>

- International Transport Forum (ITF). (2018). *Safer roads with automated vehicles?* (ITF Corporate Partnership Board [CPB] Report). Récupéré de <https://www.itf-oecd.org/safer-roads-automated-vehicles-0>
- ISO/TC 22 on Road Vehicle. (2019, January 17). *Draft NWIP to be proposed by ISO/TC 241 on Road Traffic Safety (RTS): Ethical considerations for driverless vehicles* (No N 3842). Geneva, Switzerland: International organization for Standardization; La Plaine Saint-Denis, France: Association Française de Normalisation (AFNOR).
- Johnson, C. (2017). *Readiness of the road network for connected and autonomous vehicles*. Récupéré du site Web de la Royal Automobile Club Foundation for Motoring (RAC Foundation): https://www.racfoundation.org/wp-content/uploads/2017/11/CAS_Readiness_of_the_road_network_Avril_2017.pdf
- Kansen, M., van der Waard, J. & Savelberg, F. (2018). *Sturen in parkeren*. Récupéré de the Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) website: <https://www.kimnet.nl/publicaties/rapporten/2018/06/18/sturen-in-parkeren>
- Kelechava, B. (2016, novembre 3). *Defining self-driving cars and automated vehicle systems in SAE J 3016*. American National Standards Institute (ANSI). Récupéré de <https://blog.ansi.org>
- Keolis. (s.d.). *Autonomous shuttles: Keolis, pioneer of the 100% electric, autonomous vehicle*. Récupéré de <https://www.keolis.com/en/our-services/transport-solutions/autonomous-shuttles>
- Kerner, L. (2016, février). *Are we in a tech bubble?* [présentation]. Récupéré de <https://www.slideshare.net/loukerner/bubble-cartoon>
- Klochikhin, E. (2019, janvier 25). *Autonomous vehicles and the hidden parking problem: Where will we park self-driving cars?.* Medium. Récupéré de <https://medium.com/predict/autonomous-vehicles-and-the-hidden-parking-problem-where-will-we-park-self-driving-cars-e5f2ea1a1f0d>
- KPMG International. (2018). *Autonomy delivers: An oncoming revolution in the movement of goods*. Récupéré de <https://advisory.kpmg.us/articles/2018/autonomy-delivers-an-oncoming-revolution-in-the-movement-of-goods.html>
- KPMG International. (2019a). *KPMG 2019 autonomous vehicles readiness index: Assessing countries' preparedness for autonomous vehicles*. Récupéré de <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2019/02/2019-autonomous-vehicles-readiness-index.pdf>
- KPMG International. (2019b). *KPMG's 20th consecutive global automotive executive survey 2019: Executive summary*. Récupéré de <https://automotive-institute.kpmg.de/GAES2019/downloads>
- Krabbendam, V. (2019, janvier 17). *Consortium kiest ITS-G5 voor communicatie truck platooning*. *Zelfrijdendvervoer.nl*. Récupéré de <https://www.zelfrijdendvervoer.nl>
- Kunert, M., Large, D., Burnett, G., Meijer, R., Paardekooper, J.-P., van Dam, E., ... & Cieslik, I. (2018). *PROSPECT: Proactive safety for pedestrians and cyclists. Deliverable D5.1: VRU motion and intent modelling, situation analysis and collision risk estimation*. Récupéré du site Web de CORDIS EU Research Results, Commission européenne (CE): <https://cordis.europa.eu/project/id/634149/results>
- Leeb, R. (Ed.). (2019). *Mobilität 2050: Verkehrsinfrastruktur 4.0 = Mobilité 2050: Infrastructure de transport 4.0* [édition spéciale]. *Strasse und Verkehr = Route et trafic*, 105(1-2). Récupéré de <http://www.vss.ch/metanavigation/download/>

- Liao, F., Molin, E., Timmermans, H. & van Wee, B. (2020). Carsharing: The impact of system characteristics on its potential to replace private car trips and reduce car ownership. *Transportation*, 47(2), 935-970.
- Lindström, A., Van den Berghe, W., Maes, J., Machata, K., Eenink, R., Linder, Astrid, ... Fric, J. (2018). *Safety through automation?: Ensuring that automated and connected driving contribute to a safer transportation system* [Position paper]. Récupéré du site web du Forum of European Road Safety Research Institutes (FERSI): <https://fersi.org/wp-content/uploads/2019/02/180202-Safety-through-automation-final.pdf>
- Litzler, J-B. (2019, juillet 15). Déçue par sa navette autonome, La Défense arrête l'expérience. *Le figaro*. Récupéré de https://immobilier.lefigaro.fr/article/decue-par-sa-navette-autonome-la-defense-arrete-l-experience_21ebcd88-a4d5-11e9-a13f-3957458a90bd/
- Lohmann, R. (s.d.). Rivium business park first to introduce autonomous shuttles in mixed traffic. *2getthere*. Récupéré de <https://www.2getthere.eu>
- Lombardo, J. (2018, janvier 17). How will autonomous vehicles impact how we build roads?. *ForConstructionPros.com*. Récupéré de <https://www.forconstructionpros.com>
- Lytrivis, P., Papanikolaou, E., Amditis, A., Dirnwöber, M., Froetscher, A., Protzmann, R., ... Kerschbaumer, A. (2018, Avril). Advances in road infrastructure, both physical and digital, for mixed vehicle traffic flows. In *Solutions for society, economy and environment*. Proceedings of the 7th transport research arena (TRA 2018), Vienne, Autriche.
- Mannion, P. (2019, février 10). *Vulnerable road user detection: State-of-the-art and open challenges*. Récupéré du site web de l'arXiv, Cornell University: <https://arxiv.org/pdf/1902.03601.pdf>
- Marchesini, P. & Weijermars, W. (2010). *The relationship between road safety and congestion on motorways: A literature review of potential effects* (SWOV Report No R-2010-12). Récupéré du site Web de la Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV): <https://www.swov.nl>
- Marks, J. (2018a, juin 5). How to ensure the safety of self-driving cars: Part 1/5. *Medium*. Récupéré de https://medium.com/@olley_io/how-to-ensure-the-safety-of-self-driving-cars-part-1-5-2fcc891ea90b
- Marks, J. (2018b, juin 5). How to ensure the safety of self-driving cars: Part 2/5. *Medium*. Récupéré de https://medium.com/@olley_io/how-to-ensure-the-safety-of-self-driving-cars-part-2-5-b4eafb067534
- Marks, J. (2018c, juin 5). How to ensure the safety of self-driving cars: Part 3/5. *Medium*. Récupéré de https://medium.com/@olley_io/how-to-ensure-the-safety-of-self-driving-cars-part-3-5-73157e8de29c
- Marks, J. (2018d, juin 5). How to ensure the safety of self-driving cars: Part 4/5. *Medium*. Récupéré de https://medium.com/@olley_io/how-to-ensure-the-safety-of-self-driving-cars-part-4-5-66ce9f24fce5
- Marks, J. (2018e, juin 5). How to ensure the safety of self-driving cars: Part 5/5. *Medium*. Récupéré de https://medium.com/@olley_io/how-to-ensure-the-safety-of-self-driving-cars-part-5-5-1ec043d67e4f
- Martens, M. (2014, septembre 11). Mens en auto moeten leren samenwerken. *VerkeersNet*. Récupéré de <https://www.verkeersnet.nl>

- Martinez, L. & Viegas, J. (2016, janvier 10-14). *Concepts and impacts of new urban shared mobility alternatives: An agent-based simulation model for the city of Lisbon, Portugal*. Présentation sur la 95th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA. Récupéré de <https://www.itf-oecd.org/concepts-and-impacts-new-urban-shared-mobility-alternatives>
- McKinsey & Company. (s.d.). *What steps must cities take to realize the full benefits of autonomous vehicles?*. Récupéré de <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/a-new-look-at-autonomous-vehicle-infrastructure#>
- McKinsey & Company. (2016). *Automotive revolution: Perspective towards 2030: How the convergence of disruptive technology-driven trends could transform the auto industry*. Récupéré de <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/disruptive-trends-that-will-transform-the-auto-industry>
- McNulty, J. (2019, janvier 31). Mean streets: Self-driving cars will «cruise» to avoid paying to park. *ScienceDaily*. Récupéré de <https://www.sciencedaily.com>
- Mearian, L. (2016, décembre 8). New Audis can now talk to traffic lights. *Computerworld*. Récupéré de <https://www.computerworld.com>
- Metamorworks. (s.d.). *Cockpit van autonome auto: Een voertuig met zelfrijdende modus en een vrouw bestuurder ontspannen* [Stockfoto]. Shutterstock. Récupéré de <https://www.shutterstock.com/nl/image-photo/cockpit-autonomous-car-vehicle-running-self-631212983>
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (MVG), Administratie Wegen en Verkeer (AWV) & Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (OCW). (2001). *Catalogus schade aan wegverhardingen*. Récupéré de https://wegenenverkeer.be/sites/default/files/uploads/documenten/Schadecatalogus_0.pdf
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (MVG), Agentschap Wegen en Verkeer (AWV), Afdeling Expertise Verkeer en Telematica, Team Veiligheid en Ontwerp. (2018). *Vademecum weginfrastructuur (VWI). Deel autosnelwegen*. Récupéré de <https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten/ontwerprichtlijnen/autosnelwegen>
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). (s.d.). «Michi-no-Eki» rest areas. Récupéré de https://www.mlit.go.jp/road/road_e/q7_restareas.html
- Morlion, P. (2018, janvier 6). Met de zelfrijdende auto krijgen onze mobiliteitsministers een historische kans op een visionair beleid [Opinion]. *Knack*. Récupéré de <https://www.knack.be>
- Morsink, P., Klem, E., Wilmink, I. & de Kievit, M. (2016). *Zelfrijdende auto's: Ontwikkelagenda ZRA en wegontwerp* (version 03, finale). Récupéré du site Web de la Kennisplatform CROW: <https://www.crow.nl/downloads/pdf/verkeer-en-vervoer/wegontwerp/zelfrijdende-autos-verkenning-van-implicaties-op-h.aspx?ext=.pdf>
- Mouyal, N. (2018, février 15). Harvesting energy from roads: New technologies capture ambient energy and convert it to electric power. *IEC e-tech*. Récupéré de <https://etech.iec.ch>
- Nasir, M.K., Noor, R.M., Kalam, M.A. & Masum, B.M. (2014). Reduction of fuel consumption and exhaust pollutant using intelligent transport systems. *The scientific world journal*, 836375. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1155/2014/836375>
- National Association of City Transportation Officials (NACTO). (2017). *Blueprint for autonomous urbanism. Module 1: Designing cities edition*. Récupéré de <https://cdn.atlantaregional.org/wp-content/uploads/blueprint-for-autonomous-urbanism.pdf>

- National Association of City Transportation Officials (NACTO). (2019). *Blueprint for autonomous urbanism* (Second edition). Récupéré de <https://nacto.org/publication/bau2/>
- La navette autonome, à la conquête de La Défense. (2017, September 25). *Wavestone transportshaker*. Récupéré de <https://www.transportshaker-wavestone.com>
- Nesnow, G. (2018, février 9). 73 mind-blowing implications of driverless cars and trucks. *Medium*. Récupéré de <https://medium.com/@DonotInnovate/73-mind-blowing-implications-of-a-driverless-future-58d23d1f338d>
- O'Brian, C. (2019, juillet 29). The drive to dominate autonomous shuttles. *The innovator*. Récupéré de <https://innovator.news>
- Ohern, M. (2016, mai 25). Platooning and dedicated truck lanes. *Jefferson policy journal*. Récupéré de <https://jeffersonpolicyjournal.com/>
- Oster, C. (s.d.). *The nexus of AVs, bikes, and pedestrians: Similar problems, similar solutions*. Presentation for the University of Delaware, Joseph R. Biden, Jr. School of Public Policy & Administration, Newark, DE, USA. Récupéré de https://ecf.com/sites/ecf.com/files/Oster.C_The_nexus_of_AVs_bikes_and_pedestrians.pdf
- Over tien jaar hebben we de zelfrijdende auto onder controle. (2018, décembre 24). *De Tijd*. Récupéré de <https://www.tijd.be>
- Papanikolaou, E. (Ed.). (2018). *INFRAMIX: Road infrastructure ready for mixed vehicle traffic Flows. Deliverable D.2.1: Requirements catalogue from the status quo analysis* (version 6.0). Récupéré du site Web d'INFRAMIX: <https://inframix.eu/>
- Parkin, J., Crawford, F., Flower, J., Alford, C. & Parkhurst, G. (s.d.). *Interactions of autonomous vehicles and cyclists: Results from real-world and simulator trials*. Présentation pour l'University of the West of England (UWE Bristol), Centre for Transport & Society, Bristol, UK. Récupéré de https://ecf.com/sites/ecf.com/files/Parkin.J_Interactions_of_autonomous_vehicles_and_cyclists.pdf
- Paulsen, J.T. (2018). *Physical infrastructure needs for autonomous & connected trucks: An exploratory study* (Mémoire, Norwegian University of Science and Technology [NTNU], Trondheim, Norvège). Récupéré de https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2562799/19642_FULLTEXT.pdf?sequence=1
- Perkins Coie & Association for Unmanned Vehicle Systems International (AUVSI). (2019). *2019 autonomous vehicles survey report*. Récupéré de <https://www.perkinscoie.com>
- Pizzuto, L., Thomas, C., Wang, A. & Wu, T. (2019, January 25). How China will help fuel the revolution in autonomous vehicles. *McKinsey & Company*. Récupéré de <https://www.mckinsey.com>
- Puylaert, G. (2019, mai 9). Waarom wetgeving voor autonoom vervoer Europees geregeld moet worden. *Biind*. Récupéré de <https://www.biind.nl>
- Quelle stratégie pour une réponse adéquate aux besoins?: À Londres: Des bornes de rechargement dans les réverbères. (2019). *La CeMathèque*, (49), 23. Récupéré de <http://mobilite.wallonie.be/home/centre-de-documentation/cematheque.html>
- Raposo, A. & Ciuffo, B. (Eds.). (2019). *The future of road transport: Implications of automated, connected, low-carbon and shared mobility*. Récupéré du site Web du EU Science Hub, Commission européenne (CE): <https://ec.europa.eu/jrc/en/facts4eufuture/future-of-road-transport>

- Redactie Automobiel Management. (2019a, février 26). Autonome auto maakt de stad leefbaarder. *Automobiel Management (AM)*. Récupéré de <https://www.automobielmanagement.nl>
- Redactie Automobiel Management. (2019b, mars 4). Duitse auto-industrie investeert €60 miljard in EV en zelfrijdende auto. *Automobiel Management (AM)*. Récupéré de <https://www.automobielmanagement.nl>
- Redactie Automobiel Management. (2019c, mars 11). PSA: Geen niveau 4 en 5 autonome voertuigen voor particulier. *Automobiel Management (AM)*. Récupéré de <https://www.automobielmanagement.nl>
- Redactie Automobiel Management. (2019d, avril 15). De autonome auto is nog ver weg. *Automobiel Management (AM)*. Récupéré de <https://www.automobielmanagement.nl>
- Redactie e-Drivers. (2019, octobre 31). Inductie laden van uw elektrische auto. *E-drivers.com (ED)*. Récupéré de <https://e-drivers.com/inductie-laden-van-uw-elektrische-auto/>
- Région de Bruxelles-Capitale. (2019). *Plan énergie climat 2030: The right energy for your Region* (version définitive). Récupéré de https://leefmilieu.brussels/sites/default/files/user_files/pnec_rbc_fr.pdf
- Règlement Délégué (UE) N° 305/2013 de la Commission du 26 novembre 2012 complétant la directive 2010/40/UE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne la mise à disposition harmonisée d'un service d'appel d'urgence (eCall) interopérable dans toute l'Union européenne. (2013). *Journal officiel de l'Union européenne*, L 91, 1-4. Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Règlement Délégué (UE) N° 885/2013 de la Commission du 15 mai 2013 complétant la directive 2010/40/EU du Parlement européen et du Conseil (directive «STI») en ce qui concerne la mise à disposition de services d'informations concernant les aires de stationnement sûres et sécurisées pour les camions et les véhicules commerciaux. (2013). *Journal officiel de l'Union européenne*, L 247, 1-5. Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Règlement Délégué (UE) N° 886/2013 de la Commission du 15 mai 2013 complétant la directive 2010/40/EU du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les données et procédures pour la fourniture, dans la mesure du possible, d'informations minimales universelles sur la circulation liées à la sécurité routière gratuites pour les usagers. (2013). *Journal officiel de l'Union européenne*, L247, 6-10. Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Règlement Délégué (UE) 2015/962 de la Commission du 18 décembre 2014 complétant la directive 2010/40/UE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne la mise à disposition, dans l'ensemble de l'Union, de services d'informations en temps réel sur la circulation. (2015). *Official journal of the European Union*, L157, 21-31. Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Règlement Délégué (UE) 2017/1926 de la Commission du 31 mai 2017 complétant la directive 2010/40/UE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne la mise à disposition, dans l'ensemble de l'Union, de services d'informations sur les déplacements multimodaux. (2017). *Journal officiel de l'Union européenne*, L272, 1-13. Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Règlement n° 79 de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies (CEE-ONU): Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des véhicules en ce qui concerne l'équipement de direction (Additif 78: Règlement n° 79, révision 2). (2008). *Journal officiel de l'Union européenne*, L137, 25-51. Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>

- Règlement (UE) 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données, et abrogeant la directive 95/46/CE (règlement général sur la protection des données). (2016). *Journal officiel de l'Union européenne*, L 119, 1-88. Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Règlement (UE) 2019/881 du Parlement européen et du Conseil du 17 avril 2019 relatif à l'ENISA (Agence de l'Union européenne pour la cybersécurité) et à la certification de cybersécurité des technologies de l'information et des communications, et abrogeant le règlement (UE) n° 526/2013 (règlement sur la cybersécurité). (2019). *Journal officiel de l'Union européenne*, L 151, 15-69. Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Règlement (UE) 2019/2144 du Parlement européen et du Conseil du 27 novembre 2019 relatif aux prescriptions applicables à la réception par type des véhicules à moteur et de leurs remorques, ainsi que des systèmes, composants et entités techniques distinctes destinés à ces véhicules, en ce qui concerne leur sécurité générale et la protection des occupants des véhicules et des usagers vulnérables de la route, modifiant le règlement (UE) 2018/858 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant les règlements (CE) n° 78/2009, (CE) n° 79/2009 et (CE) n° 661/2009 du Parlement européen et du Conseil et les règlements (CE) n° 631/2009, (UE) n° 406/2010, (UE) n° 672/2020, (UE) n° 1003/2010, (UE) n° 1005/2010, (UE) n° 1008/2010, (UE) n° 1009/2010, (UE) n° 19/2011, (UE) n° 109/2011, (UE) n° 458/2011, (UE) n° 65/2012, (UE) n° 130/2012, (UE) n° 347/2012, (UE) n° 351/2012, (UE) n° 1230/2012 et (UE) 2015/166 de la Commission. (2019). *Journal officiel de l'Union européenne*, L325, 1-40. Récupéré de <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Résolution du Parlement européen du 15 janvier 2019 sur les véhicules autonomes dans les transports européens (No P8_TA[2019]0005). (2019). Récupéré de https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2019-0005_FR.pdf
- Ricker, L. & Akdemir, S. (2020, février). *Autonomous shuttle @STIB*. Présentation pour l'ITS-workshop autonomous shuttles, Bruxelles, Belgique. Récupéré de <http://www.its.be/sites/default/files/STIB.pdf>
- Robinson, T.L., Wallbank, C. & Baig, A. (2017). *Automated driving systems: Understanding future collision patterns: Development of methodology and proof of concept*. (TRL Published Project Report [PPR] No 851). Récupéré du site Web du Transportation Research Laboratory (TRL): <https://trl.co.uk>
- Rombaut, E., Feys, M. Vanobberghen, W., De Cauwer, C. & Vanhaverbeke, L. (2020, November). *Experience and acceptance of an autonomous shuttle in the Brussels Capital Region* [Article soumis pour publication]. IEEE Forum on integrated and sustainable transportation system (ISTS 2020), Delft, Les Pays-Bas.
- Rosevear, J. (2018, septembre 6). Self-driving cars: Understanding the 6 autonomous levels. *The motley fool*. Récupéré de <https://www.fool.com>
- Ruiz, D. (2019, mai 17). Why language matters in the self-driving revolution [Blog post]. Récupéré de <https://blogs.terrapinn.com/highwaysuk/daniel-ruiz-chief-executive-zenic/>
- SAE International releases updated visual chart for its "levels of driving automation" standard for self-driving vehicles. (2018, décembre 11). *SAE International*. Récupéré de <https://www.sae.org/>
- Sanderson, N. (2019, août 28). Canada's micro-mobility era is off with a bang, as provinces strive to regulate demand, safety. *Electric autonomy Canada*. Récupéré de <https://electricautonomy.ca>

- Sécurité routière: des technologies sauvant des vies dans les nouveaux véhicules. (2019, avril 16). *Actualité Parlement européen*. Récupéré de <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20190410IPR37528/securite-routiere-des-technologies-sauvant-des-vies-dans-les-nouveaux-vehicules>
- Service public fédéral Mobilité et Transports (SPF Mobilité et Transports). (s.d.). Personnes à mobilité réduite. Récupéré de <https://mobilit.belgium.be/fr/pmr>
- Service public fédéral Mobilité et Transports (SPF Mobilité et Transports). (2016). Accord de coopération du 15 juillet 2014 relatif à la Directive 2010/40/UE du Parlement européen et du Conseil du 7 juillet 2010 concernant le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents dans le domaine du transport routier et d'interfaces avec d'autres modes de transports. *Moniteur belge*, 12.08.2016 (Ed. 2), C – 2016/14240, 52061-52063. Récupéré de <http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/welcome.pl>
- Service public fédéral Mobilité et Transports (SPF Mobilité et Transports). (2016b). *Véhicules autonomes : Code de bonnes pratiques d'expérimentation en Belgique*. Récupéré de https://mobilit.belgium.be/sites/default/files/resources/files/code_of_practice_fr_2016_09.pdf
- Smolnicki, P.M. (2017, octobre). *Connected & automated urban mobility, zombie cars and kitchen knives: Will autonomous automobiles, self-driving car-sharing and ride-hailing, and driverless shuttles harm cities?*. Paper pour le 53rd ISOCARP/OAPA congress on smart communities, Portland, OR, USA. Récupéré de <https://pdfs.semanticscholar.org/f524/d5271557269a0d565c742db0d47eaabaf77d.pdf>
- Society of Motor Manufacturers and Traders (SMMT). (2017). *Connected and autonomous vehicles* [SMMT position paper]. Récupéré de <https://www.smmt.co.uk/wp-content/uploads/sites/2/SMMT-CAV-position-paper-final.pdf>
- Somers, A. (2019a). *Infrastructure changes to support automated vehicles on rural and metropolitan highways and freeways. Module 1: Audit specification* (Austroads Technical Report No AP-T347-19). Récupéré de <https://austroads.com.au>
- Somers, A. (2019b). *Infrastructure changes to support automated vehicles on rural and metropolitan highways and freeways. Module 3: Asset standards* (Austroads Research Report No AP-R604-19). Récupéré de <https://austroads.com.au>
- Somers, A. (2019c). *Infrastructure changes to support automated vehicles on rural and metropolitan highways and freeways. Module 4: Emerging asset information technology* (Austroads Research Report No AP-R605-19). Récupéré de <https://austroads.com.au>
- Somers, A. (2019d). *Infrastructure changes to support automated vehicles on rural and metropolitan highways and freeways. Module 5: Project findings and recommendations* (Austroads Research Report No AP-R606-19). Récupéré de <https://austroads.com.au/>
- Sortie du thermique (véhicules diesel et essence). (2020, mai 26). *Bruxelles environnement*. Récupéré de <https://environnement.brussels/>
- Soteropoulos, A., Berger, M. & Ciari, F. (2019). Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: An international review of modelling studies. *Transport reviews*, 39(1), 29-49. Récupéré de <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1523253>
- Specifieke parkeerplaatsen voor deelsteps in de maak. (2019, novembre 19). *Bruzz*. Récupéré de <https://www.bruzz.be/mobiliteit/specifieke-parkeerplaatsen-voor-deelsteps-de-maak-2019-11-19>

- Stam, K. (2020, février). *Autonomous shuttle project* [Presentation]. Récupéré de <http://www.its.be/sites/default/files/maria%20middelaes.pdf>
- TED. (2015, June 26). Chris Urmson: *How a driverless car sees the road* [Video]. Récupéré de YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=tiwVMrTLUWg>
- Thibault, M., Böhm, M., Ollinger, E., Hedhli, A., Patey, I., Wedlock, M., ... Botha, R. (2019). *Connected vehicles: Challenges and opportunities for road operators* (PIARC Report No 2019R11EN). Récupéré de <https://www.piarc.org/en>
- Tillema, T., Gelauff, G., van der Waard, J., Berveling, J. & Moorman S. (2017). *Paden naar een zelfrijdende toekomst: Vijf transitiestappen in beeld* (KiM No 17-A04). Récupéré du site Web du Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM): <https://www.kimnet.nl/publicaties/presentaties/2017/07/01/paden-naar-een-zelfrijdende-toekomst>
- Transport & Environment (TE). (2019, septembre). *Low-emission zones are a success: But they must now move to zero-emission mobility* [Briefing]. Récupéré de <https://www.transportenvironment.org>
- Transport Systems Catapult. (2017). *Future proofing infrastructure for connected and automated vehicles* (Transport Systems Catapult Technical Report, V1.1). Récupéré de <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/media.ts.catapult/wp-content/uploads/2017/04/25115313/ATS40-Future-Proofing-Infrastructure-for-CAVs.pdf>
- Transportation for America (T4America). (2018). *Parking & street design: Shared active transportation playbook*. Récupéré de <https://playbook.t4america.org/parking-street-design/>
- Treat, J.R., Tumbas, N.S., McDonald, S.T., Shinar, D., Hume, R.D., Mayer, R.E., ... Castellan, N.J. (1979). *Tri-level study of the causes of traffic accidents: Executive summary* (No DOT HS-805 099). Washington: US Department of Transportation (DOT), National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA).
- Uber haalt Jump-fietsen weg uit verschillende Brusselse gemeenten wegens vandalisme. (2019, septembre 5). *Knack*. Récupéré de <https://datanews.knack.be/ict>
- Upton, N. (2017, January 5). Connecting the connected car: What needs to happen now [Blog post]. *TechTarget*. Récupéré de <https://internetofthingsagenda.techtarget.com>
- US Department of Transportation (DOT). (s.d.). *Connected vehicles: Vehicle-to-pedestrian communications* (No FHWA-JPO-15-242). Récupéré de https://www.its.dot.gov/factsheets/pdf/CV_V2Pcomms.pdf
- US Department of Transportation (DOT). (2018). *Preparing for the future of transportation: Automated vehicles 3.0*. Récupéré de <https://www.transportation.gov/av/3/preparing-future-transportation-automated-vehicles-3>
- Ush. (2020, février). *From pilot phase to market deployment: Current bottlenecks*. Présentation pour l'ITS event @Solvay, Bruxelles, Belgique. Récupéré de http://www.its.be/sites/default/files/Ush_ITS%20event%202012-02.pdf
- van de Weijer, B. (2019, octobre 10). Binnenkort op de weg: Zelfrijdende robottaxi's zonder reservemens achter het stuur. *De Volkskrant*. Récupéré de <https://www.volkskrant.nl>

- Van Den Bergh, J. (2013, juillet 17). *Projet de loi portant création du cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents et modifiant la loi du 10 avril 1990 réglementant la sécurité privée et particulière* (Chambre des représentants de Belgique: Rapport fait au nom de la Commission de l'Infrastructure, des Communications et des Entreprises publiques No 53 2943/002). Récupéré de <https://www.dekamer.be/kvvcr/index.cfm?language=fr>
- van der Walle, E. (ed.). (2017). *InterCor: Plan of action TESTFEST ITS-G5*, Dordrecht, July 3-6, 2017. Récupéré du site Web d'InterCor: https://intercor-project.eu/wp-content/uploads/sites/15/2017/06/Plan-of-Action-Testfest-ITS-G5_v-1.0-Participants.pdf
- Van Geem, C., Massart, T., Van Buylaere, A., Draps, M., Laforce, M. & Hindrijckx, M. (2020). *Inspection visuelle & gestion de réseaux routiers (villes et communes): Catalogue des dégradations* (Méthode de mesure CRR MF89, Rév. 1). Bruxelles: Centre de recherches routières (CRR).
- van Nes, C.N. & Duivenvoorden, C.W.A.E. (2017). *Veilig naar het verkeer van de toekomst: Nieuwe mogelijkheden, risico's en onderzoeksagenda voor de verkeersveiligheid bij automatisering van het verkeerssysteem* (SWOV Rapport No R-2017-2). Récupéré de <https://www.swov.nl>
- Van Schagen, I., van der Kint, S. & Hagenzieker, M. (2017). *Zelfrijdende voertuigen: Wat betekent dat voor fietsers en voetgangers?* (SWOV Rapport No R-2017-22). Récupéré de <https://www.swov.nl>
- Van Wijngaarden, M. (2019a, mai 23). *Ford zet robot in voor pakketbezorging met AV*. *Automobiel Management (AM)*. Récupéré de <https://www.automobielmanagement.nl>
- Van Wijngaarden, M. (2019b, mai 30). *Robottaxi wordt niet snel winstgevend*. *Automobiel Management (AM)*. Récupéré de <https://www.automobielmanagement.nl>
- Vanaf 2021 zelfrijdende busjes in Antwerpen. (2018, octobre 10). *Het Laatste Nieuws (HLN)*. Récupéré de <https://www.hln.be>
- Véhicules autonomes: Navya victime du retard au décollage. (2019, juin 25). *Le Point*. Récupéré de <https://www.lepoint.fr>
- Vellinga, N.E. & Vellinga, W.H. (2015). Enkele verkeersrechtelijke aspecten van toelating van (deels) zelfrijdende of autonome auto's tot het wegverkeer. *Verkeersrecht*, (3), 82-90. Récupéré de <https://www.crow.nl/downloads/pdf/portals/dutch-roads/artikel-autonome-voertuigen-uit-verkeersrecht.aspx?ext=.pdf>
- Venezia, M. (2015, décembre 16). What is the difference between GNSS and GPS? [Blog post]. Récupéré de <https://www.semiconductorstore.com/blog/2015/What-is-the-Difference-Between-GNSS-and-GPS/1550/>
- Vermaat, P., Reed, N., de Kievit, M., Wilmink, I., Zlocki, A. & Shladover, S.E. (2017). *DRAGON: Driving automated vehicle growth on national roads. Deliverable 4.1: WP4, findings report* (version 1.0). Récupéré de <https://www.cedr.eu>
- Verrips, A., Hoen, A. et al. (2016). *Kansrijk mobiliteitsbeleid*. Récupéré de the Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) website: <https://www.pbl.nl/publicaties/kansrijk-mobiliteitsbeleid>
- VIAS Institute. (2018, octobre 4). *Test with self-driving shuttle at the Lion's Mound, Waterloo* [Photo].

- VIAS Institute & Service public fédéral Mobilité et Transports. (2018, septembre 4). *Pour la première fois, une navette sans chauffeur a circulé sur la voie publique en Belgique: Ce jour marque d'une pierre blanche l'histoire de la mobilité et de la sécurité routière* [Communiqué de presse]. Récupéré de <https://www.vias.be/en/newsroom/shuttle-bus-drives-for-the-first-time-on-public-roads-in-belgium/>
- Virginia Department of Transportation (VDOT). (2017). *Connected and automated vehicle program plan*. Richmond, Virginia, USA: Auteur. Récupéré de <https://www.virginiadot.org>
- Visnic, B. (2019, avril 2). European Union approves mandatory vehicle speed-limiting feature. *SAE International*. Récupéré de <https://www.sae.org>
- Vlaamse Minister van Mobiliteit, Openbare Werken, Vlaamse Rand, Toerisme en Dierenwelzijn, Vlaamse Minister van Werk, Economie, Innovatie en Sport. (2018). *Bisconceptnota aan de regering betreffende geconnecteerde en geautomatiseerde mobiliteit in Vlaanderen* (No VR 2018 0203 DOC.0194/1BIS). Récupéré de https://www.ewi-vlaanderen.be/sites/default/files/conceptnota_-_geconnecteerde_en_geautomatiseerde_mobiliteit_in_vlaanderen.pdf
- Vlaamse Overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken. (s.d.). *Basisbereikbaarheid*. Récupéré de <https://www.vlaanderen.be/basisbereikbaarheid>
- VMS/Insight. (2019). *Het effect van ADAS op schadeherstel, onderhoud en reparatie: Highlights ADAS-onderzoek*. Récupéré de https://www.bovag.nl/getattachment/Pers/Persberichten/Bijna-een-kwart-minder-schade-door-ADAS/ADAS2019_highlights_def_e_los.pdf.aspx?lang=nl-NL
- Voronov, A., Hultén, J., Wedlin, J. & Englund, C. (2016). *Radar reflecting pavement markers for vehicle automation*. Récupéré de <https://www.ri.se/en/what-we-do/projects/radar-reflecting-pavement-markers-vehicle-automation>
- Vrije Universiteit Brussel (VUB). (2019). *Test self-driving shuttle on Brussels Health Campus* [Photo]
- Waarom Rotterdam zijn lage-emissiezone afbouwt. (2019, décembre 27). *Bruzz*. Récupéré de <https://www.bruzz.be>
- Wang, M., van Maarseveen, S., Happee, R., Tool, O. & van Arem, B. (2019). Benefits and risks of truck platooning on freeway operations near entrance ramp. *Transportation research record (TRR)*, 2673(8), 588-602. Récupéré de <https://doi.org/10.1177/0361198119842821>
- Wenen schort experiment met zelfrijdende minibus op na ongeval. (2019, juillet 19). *Het Laatste Nieuws (HLN)*. Récupéré de <https://www.hln.be>
- What are the risks of allowing direct access to car data?* (s.d.). Récupéré de <https://www.cardatafacts.eu/risk-direct-access-car-data/>
- Wilmink, I., Calvert, S., de Kievit, M., Landen, T. & Zlocki, A. (2017). *DRAGON: Driving automated vehicle growth on national roads. Deliverable 2.1: WP2, exploration of impacts, constraints and enablers of automated vehicles on NRAs (version 2)*. Récupéré du site Web de la Conférence européenne des Directeurs des Routes (CEDR): <https://www.cedr.eu>
- Woolsgrove, C. (2019). *Opportunities and threats of autonomous vehicles to other modes in urban areas*. Presentation for the European Cyclists' Federation (ECF), Dublin. Récupéré de https://ecf.com/sites/ecf.com/files/Woolsgrove.C_opportunities_and_threats_of_autonomous_vehicles_to_other_modes_in_urban_areas.pdf

Yoshida, H. (s.d.). *Automated driving service based at «Michi-no-eki» in rural mountainous areas* [Presentation]. Récupéré de https://www.sip-adus.go.jp/evt/workshop2017/file/evt_ws2017_s5_HidenoriYoshida.pdf

Zelfrijdende auto niet langer sneeuwblind. (2020, mars 2). *De ingenieur*. Récupéré de <https://www.deingenieur.nl>

Zenzic. (2019). *UK connected and automated mobility roadmap to 2030*. Récupéré de <https://zenzic.io/roadmap/>

Chapitre 7

Membres du groupe de travail

Cocu, Xavier	CRR
Cornet, Denis	SPW
De Mol, Johan	Imec - UGent
Debauche, Wanda	CRR
Defreyne, Peter	IXOR
Dzhambaz, Ertan	CRR
Gaillet, Jean-Francois	VIAS
Simon Gianordoli	ERF, Routes de France
Helmus, Vincent	SPW
Iliens, Liessa	AWV-VWT
Kenis, Eric	MOW
Keunen, Dries	The New Drive
Lannoo, Bart	UAntwerpen
Lefrancq, Martin	Bruxelles Mobilité
Leroy, Laurence	Bruxelles Mobilité
Marquet, Kurt	ITS.be
Massart, Arnaud	SPW
Mertens, Sandra	Louvain-La-Neuve
Michaux, Gauthier	SPW
Mollu, Kristof	AWV

Neckebroeck, Sven	Bruxelles Mobilité
Nicodème, Christophe	ERF
Noël, Marie-Hélène	STIB
Nuyttens, Rik	3M
Poncelet, Jean-Marie	SPW
Redant, Kris	CRR
Rombaut, Kristof	AWV-VWT
Schiettecatte, Koen	De Lijn
Schoutteet, Veerle	AWV
Soens, Steven	Febiac
Timmermans, Jean-Marc	Agoria
van Geelen, Hinko	CRR
Vandewauwer, Philippe	STIB
Vanhaverbeke, Lieselot	VUB
Volckaert, An	CRR
Wrzesińska, Dagmara	VIAS

Les membres ressortissants et adhérents reçoivent gratuitement les publications CRR. Cette publication est uniquement disponible en version électronique.

Plus d'informations:

<https://brrc.be/fr/publications>

Pour commander cette publication:

publication@brrc.be - Tél.: +32 (0)2 766 03 26

Référence: SF 51 – Prix: 14,00 € (Hors TVA de 6 %)

■ Autres publications dans la série «Synthèse»

La série «Synthèse» rassemble les publications CRR qui font l'état de la question sur des problèmes déterminés et proposent des voies de recherche.

Référence	Titre	Prix
F 50	Recyclage des plastiques dans les enrobés – Une analyse	12,00€
F 49	Synthèse des connaissances et pratiques à propos des chantiers de nuit	12,00€
F 48/14	Instruments pour les gestionnaires routiers	gratuit
F 47/10	Manuel relatif à la réalisation pratique des passages pour piétons	gratuit
F 46/09	La route: acteur de la mobilité durable	14,00€
F 45/09	Gestion de la sécurité des infrastructures routières: d'une politique curative à une politique préventive	14,00€
F 44/07	Véhicules plus longs et plus lourds – Rapport final	15,00€

■ Autres séries CRR

- Recommandations
- Méthode de mesure
- Compte rendu de recherche



Centre de recherches routières
Ensemble pour des routes durables

Etablissement reconnu par application de l'Arrêté-loi du 30 janvier 1947
boulevard de la Woluwe 42
1200 Bruxelles
Tél. : 02 775 82 20 - Fax : 02 772 33 74
www.crr.be

Les véhicules autonomes seraient une solution à de très nombreux problèmes de circulation et liés au transport qu'il est urgent de régler. Ou pas? Quand et dans quelles conditions toutes ces promesses seront-elles tenues? Le CRR et les représentants des gestionnaires routiers, du secteur automobile, des sociétés de transports en commun, des instituts de recherche, etc. tentent de faire le point sur cette question en plein essor. Principalement pour avoir une idée de la manière dont l'infrastructure pourrait ou devrait évoluer afin de ne pas constituer un frein au déploiement futur des véhicules autonomes, mais plutôt afin de pouvoir contribuer à la réussite de leur introduction.

Pour l'instant, cependant, l'utilisateur humain reste le point de départ de la conception et de la construction de l'infrastructure routière, cet usager de la route étant de plus en plus assisté par les développements technologiques. Pour que cette aide fonctionne de manière optimale, des ajustements majeurs des infrastructures ne semblent pas nécessaires dans l'immédiat. Une signalisation reconnaissable et harmonisée (éventuellement *communication technology ready*) et des revêtements routiers durables et de qualité semblent être les besoins les plus importants des concepteurs de véhicules autonomes à l'heure actuelle.

Les véhicules autonomes deviennent plus sûrs, plus respectueux de l'environnement, plus efficaces, plus accessibles, etc. Pour certains, ils deviennent également plus agréables à utiliser. Plus encore qu'une nouvelle façon de se déplacer, les véhicules autonomes peuvent jouer un rôle dans la mobilité de demain. Le partage ou non de (trajets en) véhicules autonomes peut compléter les transports en commun. Les essais avec des navettes qui opèrent aujourd'hui sur un itinéraire fixe limité, généralement en dehors du domaine public, pourraient évoluer à l'avenir vers des services flexibles à la demande. En fonction du rôle des véhicules autonomes dans le système de transport du futur, l'importance de certaines infrastructures (zones de dépôt et de prise en charge, parkings avec équipements supplémentaires, etc.). Beaucoup de choses dépendent des choix qui seront faits pour ce futur système de transport. Le texte présente un certain nombre d'évolutions possibles, surtout pour l'environnement urbain.

Dans ce rapport, nous prospectons l'avenir et discutons des possibilités d'anticiper. Le rapport donne un aperçu des mesures «*no regret*» dans le domaine de l'infrastructure routière. Nous esquissons en parallèle la **vue d'ensemble**: l'infrastructure routière constitue une condition essentielle aux déplacements, mais elle présente évidemment des interfaces étroites avec d'autres aspects de la société et avec le système de déplacement en particulier.

L'avenir prendra probablement une tournure quelque peu différente. Dans dix ans, il pourrait y avoir des opportunités dont nous ne pouvons même pas imaginer l'existence aujourd'hui. Toutefois, le déploiement progressif des véhicules autonomes nous oblige à réfléchir à l'avenir que nous souhaitons et à la façon dont nous apporterons une réponse au transport qui s'avère encore nécessaire. L'introduction des véhicules autonomes offre la possibilité de préparer cet avenir plutôt que de le subir.

Mots-clés ITRD

0132 – PREVISION ; 0698 – DEPLACEMENT (TRAJET) ; 1055 – INFRASTRUCTURE (TRANSPORT) ; 1145 – MODE DE TRANSPORT ; 1244 – VEHICULE AUTONOME ; 8588 – EXPOSE DE MISE AU POINT ; 8735 – SYSTÈME DE TRANSPORT INTELLIGENT ; 9105 – MOBILITE (PERS)