



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

CAV et sécurité routière



Synthèse

SF 52

Centre de compétence impartial depuis 1952, le CRR (Centre de recherches routières) est au service de l'ensemble du secteur routier. 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, Newsletters CRR et Dossiers, rapports d'activités). 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: www.crr.be.

Synthèse SF 52

CAV et sécurité routière

Centre de recherches routières

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

Bruxelles

2024

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 de 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. Quoiqu'il en soit, il faudra attendre de voir comment la technologie des véhicules autonomes va évoluer et quel impact cela aura sur l'organisation des transports en général et sur l'infrastructure en particulier. Par conséquent, les membres du groupe de travail ou le CRR ne peuvent en aucun cas être tenus pour responsables des décisions prises sur la base de ce texte.

Remerciements

Nous remercions tout particulièrement les participants aux discussions captivantes:

Koen Schietecatte, Clara Rybin, Kristof Rombaut, Johan Demol, Jonathan Denivelle, Gauthier Michaux, An Volckaert, Sven Neckebroek, Steven Soens, Eric Kenis, Paul Lecocq, Denis Cornet, Christophe Nicodème, Rik Nuyttens, Ali Yeganeh

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.

CAV et sécurité routière / Centre de recherches routières.
– Bruxelles: CRR, 2024. 94 p. - (Synthèse ; SF 52).

Dépôt légal: D/2023/0690/6

Photo de couverture: Metamorworks, 2017
© CRR – Tous droits réservés

Editeur responsable: Luk Geeroms, Boulevard de la Woluwe 42 – 1200 Bruxelles

Table des matières

1 Introduction	3
2 Informations générales	5
2.1 Gains potentiels en matière de sécurité routière	5
2.2 Nouveaux risques	6
2.3 Complexité	7
2.4 Déplacements automatiques (ADS) vs aide à la conduite (ADAS), niveaux SAE	8
2.5 Operational Design Domain (Hillen, 2020) (ODD)	12
2.6 Questions sociétales	15
2.7 Questions éthiques	15
2.8 Dynamique	16
3 Éléments de recherche et essais	19
3.1 Analyse des causes	19
3.2 Évaluer la sécurité des véhicules automatisés et des véhicules autonomes?	21
3.3 Environnement de conception et essais sur la voie publique	22
3.4 Confiance des consommateurs dans les véhicules autonomes	24
3.5 Connectivité et communication	26
3.6 Code de bonnes pratiques d'expérimentation en Belgique	27
3.7 Convention de Genève	28
3.8 Convention de Vienne sur la signalisation routière	29
3.9 Que disent les chiffres?	30
4 Objectifs de la politique de sécurité routière	35
4.1 Vers zéro tué sur les routes	38
4.2 L'Organisation mondiale de la Santé et les Nations unies	38
4.3 Politique de l'Union européenne	39
4.4 Belgique: All for zero	41
4.5 Réglementation	43
5 Le rôle de l'infrastructure dans les aspects de sécurité routière des véhicules autonomes	45
5.1 Connectivité, CCAM, Communication	45
5.2 Transfert des commandes (<i>disengagement</i>)	46
5.3 Panneaux de signalisation et marquages routiers	48
5.4 Revêtement routier et obstacles	52
5.5 Zones de refuge	52
5.6 Classification des routes	53
5.7 Digital Twin/Digital Map	55
5.8 Infrastructure numérique	57
5.9 Communication entre le VA et les usagers de la route vulnérables	58
5.10 Conditions météorologiques	59
5.11 Étude de cas sur les systèmes d'aide à la conduite (ADAS) et la Safe System Approach (homme – environnement – véhicule)	60

6 Conclusion	63
7 Bibliographie	67
Annexe 1 – Conditions météorologiques	77
Annexe 2 – Abréviations	81
Annexe 3 – Vision des chercheurs sur les «human factors»	83

■ Liste des figures

Figure 1.1	Rapport de synthèse du CRR – CAV et infrastructure routière, état des lieux et prospective, 2021 (Redant & Van Geelen, 2021)	3
Figure 2.1	Illustration de l'interprétation du comportement humain par un véhicule autonome. Ces deux personnes sont-elles simplement en train de discuter ou sont-elles sur le point de traverser? (Brooks, 2017)	7
Figure 2.2	Niveaux SAE (SAE International, 2021a)	8
Figure 2.3	Capteurs dans les véhicules automatisés (Viasnoff, 2022)	9
Figure 2.4	Fonctionnalités pour différents niveaux d'automatisation (Pinton, 2020)	10
Figure 2.5	Sécurité routière en fonction du type de véhicule (How can automated, s.d.)	11
Figure 2.6	Transition d'une automatisation élevée à une automatisation complète de la conduite dans différents contextes (ITF, 2015)	12
Figure 2.7	Panneau de signalisation recommandant de désactiver l'ACC (Westerscheldetunnel, Pays-Bas) (Adaptive cruise control, 2021)	13
Figure 3.1	Composantes de la sécurité routière	19
Figure 3.2	(Mobileye SuperVision, 2023)	24
Figure 3.3	Why autonomous vehicles need a large-system approach to safety (Sun et al., 2021)	25
Figure 3.4	Capteurs de Drive Pilot (Mercedes-Benz Group, 2023)	29
Figure 3.5	ADAS étudiés dans l'étude PARTS (PARTS, 2022)	32
Figure 3.6	Gains en termes de sécurité grâce aux systèmes FCW et AEB (PARTS, 2022)	32
Figure 3.7	<i>Real world benefits of crash avoidance technologies</i> (IIHS & HLDI, 2023)	33
Figure 4.1	Représentation graphique de la <i>Safe System Approach</i> (ITF, 2016)	36
Figure 4.2	Objectifs pour 2030 et 2050 en Belgique selon le plan interfédéral <i>All for zero</i> (All for zero, 2021)	41
Figure 4.3	Dix objectifs généraux du plan interfédéral <i>All for zero</i> (All for zero, 2021)	42
Figure 5.1	<i>Reasons for disengagement</i> , basées sur des essais sur la voie publique en Californie (09/2014-11/2015) (Dixit et al., 2016)	47
Figure 5.2	<i>Reasons for disengagement</i> , basées sur des essais sur la voie publique en Californie, 2021 (Zhang et al., 2021)	47
Figure 5.3	Quelques variantes du panneau «descente dangereuse» (Verkeersbord SB250 A3, 2023 ; Finnish Transport Infrastructure Agency, s.d. ; Roadsigns in Norway, 2023 ; National Driving School, 2023)	50
Figure 5.4	Les <i>Contrast lane markers</i> augmentent la fiabilité des systèmes LKA (<i>Lane Keeping Assistance</i>) et LDW (<i>Lane Departure Warning</i>), en particulier sur les revêtements de couleur claire et par forte luminosité (VSI Labs, 2021)	50

Figure 5.5	Illustration des éléments qui déterminent le régime de vitesse (ITS.be, 2022)	51
Figure 5.6	Régime de vitesse différent sur la voie principale et sur la voie parallèle (Clem, 2022)	51
Figure 5.7	Catégorisation de l'infrastructure pour les véhicules autonomes: niveaux ISAD proposés dans le projet INFRAMIX (Infrastructure categorization, 2017) (Infrastructure categorisation, 2017)	53
Figure 5.8	SRL (<i>Smart Road Level</i> selon PIARC) (Garcia Garcia, 2021)	54
Figure 5.9	Smart Road Levels (PIARC) (Garcia Garcia, 2021)	54
Figure 5.10	Exemple d'un véhicule équipé de plusieurs écrans d'information pour communiquer avec les piétons (Volkswagen Tiguan) – projection d'un passage pour piétons (Duff, 2015 ; Light staging and exterior HMI, 2018)	58

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Conditions préalables au <i>Lane Keeping Assistance</i> (LKA) pour quatre voitures différentes	14
Tableau 3.1	Taux moyen d'accidents corporels évités par configuration (Pilet et al., 2021)	34
Tableau 3.2	Taux moyen d'accidents mortels évités par configuration (Pilet et al., 2021)	34



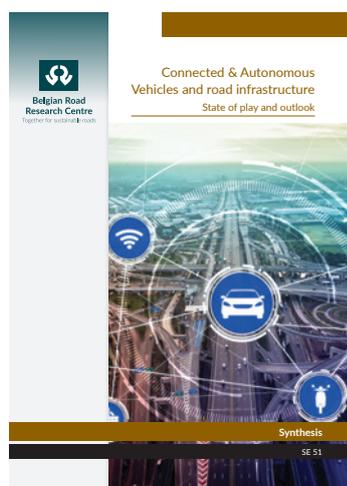
Chapitre 1

Introduction

Un système de circulation se compose de plusieurs éléments (humain, véhicule et infrastructure). L'introduction des *Connected & Autonomous Vehicles* (CAV) accroît encore l'importance de la dimension numérique (déjà présente sous la forme de systèmes de navigation et de *Cooperative Intelligent Transport Systems* (C-ITS). La qualité des interactions entre les éléments du système (éventuellement soutenues par des fonctionnalités numériques) détermine en grande partie le fonctionnement du système de transport et la **sécurité routière** qui y est associée.

L'**infrastructure routière** physique fait évidemment partie du système de circulation sur la voie publique. Il n'y a pas encore si longtemps, le rôle de l'infrastructure routière dans le développement des déplacements autonomes était peu mis en lumière. A juste titre, les gestionnaires routiers se sont interrogés sur les investissements qui permettraient d'encourager et de mettre en bonne voie le développement des véhicules autonomes, et sur l'existence d'investissements qui hypothéqueraient ce développement.

Le CRR a étudié cette question en long et en large dans le cadre d'un groupe de travail créé à cet effet et composé d'experts externes. L'étude bibliographique et les discussions du groupe de travail ont abouti au document «Connected & Autonomous Vehicles et infrastructure routière – Etat des lieux et prospective», publié en 2021 (Redant & Van Geelen, 2021).



Dans ce document, nous avons également prêté attention à la sécurité routière, mais ce n'était pas l'essence même du rapport.

Après la publication du rapport et les réactions qu'il a suscitées, le groupe de travail a poursuivi ses activités.

En tant qu'institution de connaissance indépendante attentive à la sécurité routière et à l'infrastructure routière physique, le CRR a jugé utile d'essayer d'**approfondir** le sujet de la sécurité routière.

Figure 1.1 – Rapport de synthèse du CRR – CAV et infrastructure routière, état des lieux et prospective, 2021 (Redant & Van Geelen, 2021)

Le **présent rapport** est le résultat de l'étude du thème de la sécurité routière. Les véhicules de pointe sont-ils vraiment sûrs? Quel est le rôle de l'infrastructure routière? Nous avons tenté de mieux comprendre les aspects qui comptent, en nous concentrant plus particulièrement sur la composante infrastructure routière.

Le rapport commence par des informations générales pertinentes (chapitre 2). Ensuite, le chapitre 3 aborde les éléments de la recherche et les essais. La politique de sécurité routière et ses objectifs sont examinés au chapitre 4. Au chapitre 5, nous essayons de mieux comprendre la composante infrastructure, et nous discutons des niveaux SAE, ADAS et ADS. Nous terminons par une conclusion (chapitre 6).



Chapitre 2

Informations générales

2.1 Gains potentiels en matière de sécurité routière

La réduction du nombre de victimes de la route est l'une des principales raisons de l'engagement en faveur des véhicules autonomes¹. Plusieurs facteurs jouent un rôle dans la cause et les conséquences ultimes des accidents de la route. L'analyse des accidents de la route révèle que le conducteur joue un rôle prépondérant (le facteur humain joue un rôle dans plus de 90 % des accidents de la route, dont un tiers sont liés à une vitesse excessive²), et de nombreux développements sont axés sur des systèmes qui simplifient ou prennent (en partie) en charge les 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).

A première vue, les gains liés au remplacement du facteur humain par une machine «infaillible» semblent énormes.

Les systèmes dans les véhicules autonomes visent à exécuter plusieurs tâches simultanément (observation de l'environnement immédiat et détection simultanée de potentielles situations conflictuelles, réception d'informations provenant de sources externes, traitement rapide des informations, etc.). Aujourd'hui, ces systèmes viennent principalement en renfort du conducteur humain. Au fur et à mesure que la fiabilité et la fonctionnalité de ces systèmes augmenteront (la sécurité restant une condition préalable absolue), ils pourraient un jour se substituer au conducteur humain.

Une machine:

- n'est pas distraite par un téléphone portable (10 à 30 % des accidents sont dus à la distraction);
- ne roule pas sous influence (un quart des accidents dans l'UE sont liés à l'alcool);
- ne dépasse pas la vitesse prescrite (la vitesse est un facteur dans 30 % des accidents mortels) (Association des constructeurs européens d'automobiles [ACEA], 2019a).

Il ne faut pas oublier que la prévention d'un accident a une portée plus large que les seules personnes directement impliquées; une multitude de parents et d'amis se voient également épargner des souffrances.

Pour illustrer le **potentiel** des véhicules autonomes à rendre la circulation plus sûre: une étude néerlandaise a calculé que 10 % des accidents de voiture sont dus à la distraction téléphonique. En définitive, les véhicules autonomes pourraient théoriquement éviter 13 000 accidents par an, dont environ 2 500 avec blessures et 79 mortels (de Boer, 2021).

D'autre part, ce facteur humain ne peut pas toujours être imputé au conducteur d'un véhicule et/ou il n'est pas toujours possible de remplacer ce facteur humain «variable» par l'automatisation (il n'est pas encore possible d'automatiser le comportement des piétons et des cyclistes dans le trafic).

¹ L'étude bibliographique permet de dégager les motivations suivantes pour le développement des véhicules autonomes et la transition vers ceux-ci: renforcement de la sécurité routière, prospérité économique, réduction de la congestion, mobilité, occupation de l'espace, efficacité énergétique et respect de l'environnement, et capacité de la route (Redant & Van Geelen, 2021).

² Le pourcentage mentionné (facteur humain impliqué dans les accidents de la route) repose sur le nombre d'incidents signalés; ce qui est inconnu ou moins connu, c'est le nombre exact de quasi-accidents qui ont été évités par les humains (Islam et al., 2019; Treat et al., 1979).

2.2 Nouveaux risques

Ce qui précède montre qu'il y a potentiellement beaucoup à gagner en matière de sécurité routière. Il semble que les véhicules autonomes peuvent constituer un tournant dans la réduction drastique des accidents de la route et aider à atteindre l'objectif de sécurité routière de zéro accident à l'horizon 2050.

Toutefois, le transfert des tâches de conduite d'un conducteur humain à une machine s'accompagne de **nouveaux risques pour le système de circulation**. Les situations imprévues que les conducteurs humains peuvent généralement anticiper de manière adéquate constituent parfois un défi de taille pour les algorithmes des voitures autonomes.

La transition vers des véhicules entièrement autonomes entraîne de nouveaux défis, avec un mélange de véhicules automatisés et de véhicules conduits par l'homme qui interagissent dans la circulation, certaines personnes prenant encore plus de risques en supposant que le véhicule automatisé les verra et réagira pour éviter les collisions potentielles (Forum international des transports [FIT], 2016).

En particulier en **environnement urbain**, des développements sont encore nécessaires pour que les systèmes d'aide à la conduite et l'automatisation puissent contribuer à la sécurité routière de tous les usagers de la route (piétons et cyclistes inclus), qu'ils soient ou non automatisés ou connectés.

Entre autres, l'estimation correcte et opportune des intentions et des interactions avec les cyclistes, les piétons et les usagers de la micro-mobilité impose des exigences élevées aux systèmes d'aide à la conduite (la détection par des capteurs et l'interprétation correcte par des algorithmes ne sont pas encore acquises pour les systèmes d'aide à la conduite).

L'analyse des collisions arrière impliquant des véhicules autonomes montre que le conducteur du véhicule classique est souvent surpris par les actions de freinage du véhicule autonome qui le précède (Pokorny et al., 2021). Tous les véhicules ne sont pas équipés de l'AEB (*Automatic Emergency Braking*) ou de l'ACC (*Adaptive Cruise Control*), qui peuvent aider à éviter les collisions arrière.

Des projets pilotes de navettes et de taxis robots (notamment aux États-Unis) suggèrent qu'il est possible de gérer de nouvelles interactions sans causer de préoccupations majeures du point de vue de la sécurité (situations conflictuelles et accidents). Une bonne compréhension de ces interactions devrait permettre de limiter systématiquement les risques. Plusieurs projets pilotes (principalement hors Europe) peuvent contribuer à rendre les véhicules autonomes plus fiables dans des environnements urbains complexes.

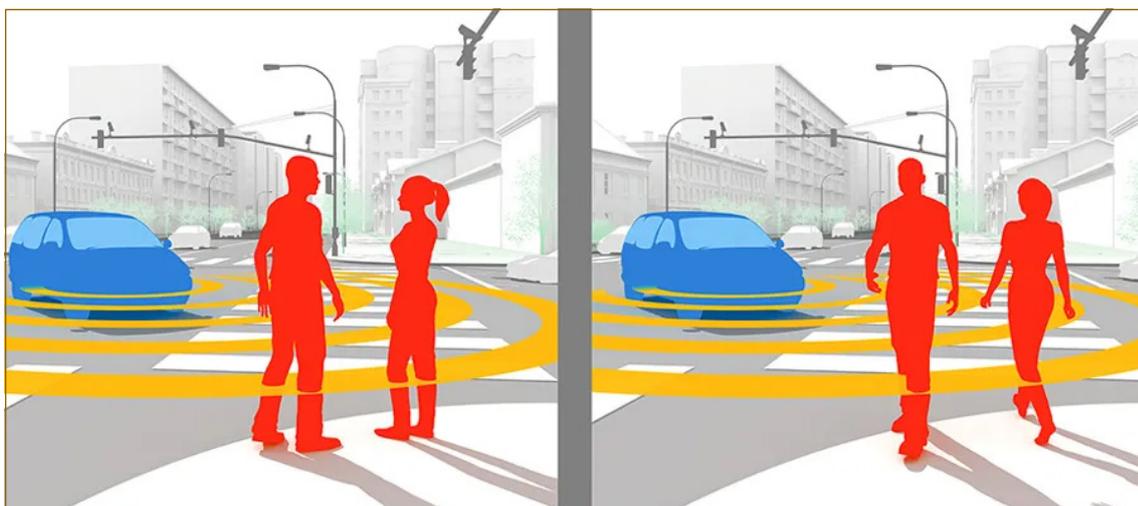


Figure 2.1 – Illustration de l'interprétation du comportement humain par un véhicule autonome. Ces deux personnes sont-elles simplement en train de discuter ou sont-elles sur le point de traverser? (Brooks, 2017)

2.3 Complexité

La force des voitures réside dans leur capacité à se déplacer en toute sécurité sur des distances relativement longues, dans des environnements très variés. Cependant, en ce qui concerne les véhicules autonomes, un **défi supplémentaire** se pose pour faire les choix les plus sûrs pour tout le monde dans toutes les situations, et les faire au moins aussi bien que les conducteurs humains actuels. Ces circonstances sont très diverses et souvent loin d'être optimales. Le contexte est toujours différent: le type d'usagers de la route diffère, la configuration de la route, le type de profils routiers et les aménagements de traversée piétonne sont différents, les objets le long de la route ont des fonctions différentes et doivent être reconnus correctement.

La complexité croissante des systèmes augmente le risque d'**erreurs**. Ces erreurs peuvent avoir des causes multiples (Wang et al., 2020):

1. Erreur de perception (**perception error**): un matériel défectueux, des bugs dans les algorithmes logiciels, des erreurs de communication entre le matériel et le logiciel peuvent entraîner une mauvaise appréciation des situations.
2. Sur la base des informations interceptées par le véhicule, une décision doit être prise, pour l'heure toujours principalement par un conducteur humain; à l'avenir, de plus en plus par le système. Des informations erronées, des informations tardives ou des situations non prévues dans l'algorithme peuvent conduire à de mauvaises décisions (**decision error**).
3. Même si les situations de circulation sont correctement évaluées et que la bonne décision est prise par l'homme ou l'algorithme, des problèmes mécaniques du véhicule ou une exécution incorrecte par l'homme (par exemple, en raison d'une expérience de conduite décroissante) (**action error**) peuvent toujours provoquer des accidents qui sont inévitables.

2.4 Déplacements automatiques (ADS) vs aide à la conduite (ADAS), niveaux SAE

Driving automation fait à la fois référence aux *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS) et aux *Automated Driving Systems* (ADS). Les fonctions ADAS d'un véhicule **assistent les conducteurs humains**, tandis que les ADS pourraient éventuellement être en mesure de **conduire un véhicule sans intervention humaine**. Le secteur a identifié six niveaux d'automatisation de la conduite. On les trouve sur le site web de *Society of Automotive Engineers International* (SAE) (ADS Team, s.d.).

- Les fonctions ADAS (niveaux 0-2) sont disponibles dans les voitures neuves (ou sous forme de module marché secondaire) vendues aujourd'hui et comprennent le freinage d'urgence automatique et le régulateur de vitesse adaptatif. Lorsqu'elles sont utilisées correctement³, ces fonctions sont susceptibles d'améliorer la sécurité des occupants (et des autres usagers de la route) et de prévenir les collisions;
- La technologie ADS (niveau SAE 3-5) capable de conduire un véhicule dans des circonstances bien définies est en cours de développement.

 SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION™ Learn more here: sae.org/standards/content/j3016_202104						
Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.						
	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	
Copyright © 2021 SAE International.						
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 2.2 – Niveaux SAE (SAE International, 2021a)

³ § 2.5 Operational Design Domain.

Aujourd'hui, il n'existe pas encore de **véhicules grand public** entièrement **autonomes** sur le marché. Les nouvelles voitures sont équipées d'une série de systèmes qui aident le conducteur à accomplir ses tâches de conduite (ADAS – *Advanced Driver Assistance Systems*). On ne parle pas encore d'ADS (*Automated Driving Systems*). Un conducteur doit encore être attentif. Même les véhicules les plus avancés qui arrivent sur le marché aujourd'hui (SAE L3) attendent toujours d'un conducteur humain qu'il soit capable de reprendre le contrôle dans des situations critiques. Le règlement (UE) 2019/2144 (Règlement [UE] 2019/2144, 2019) impose systématiquement ces systèmes d'aide à la conduite comme condition d'homologation des nouveaux véhicules. Pour l'instant, la fonction de ces systèmes se limite à informer le conducteur humain ou à intervenir éventuellement dans des situations d'urgence (par exemple, AEB⁴). Le **conducteur humain** garde le contrôle.

Dans l'intervalle, les fournisseurs de solutions de mobilité ont organisé des projets pilotes en différents endroits (p. ex. aux États-Unis et en Chine) avec des **taxis robots autonomes** accessibles au public (avec ou sans chauffeur de secours). Le véhicule se conduit principalement tout seul et ce n'est qu'en cas de situation conflictuelle que le chauffeur de secours présent dans le véhicule ou un opérateur à distance intervient.

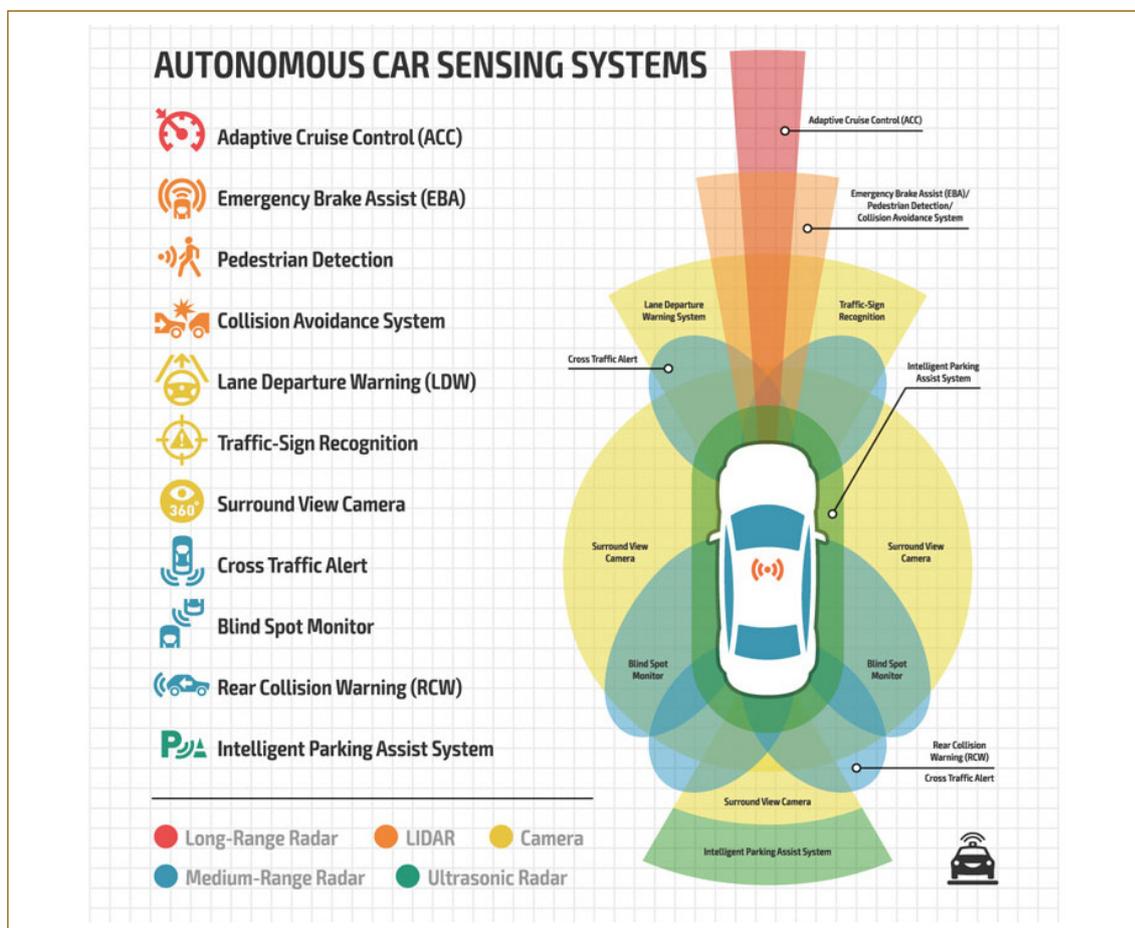


Figure 2.3 – Capteurs dans les véhicules automatisés (Viasnoff, 2022)

⁴ AEB: *Automatic Emergency Braking*. Pour de nombreuses fonctions, différents noms et abréviations sont utilisés, souvent spécifiques au constructeur automobile. Ainsi, *Automatic Emergency Braking* (AEB), *Auto(nomous) Emergency Braking* (AEB), *Emergency Brake Assist* (EBA) sont toutes des dénominations différentes d'une seule et même fonctionnalité.

La **fiabilité** de ces systèmes est accrue systématiquement, de nouvelles fonctionnalités sont ajoutées aux voitures et les tâches de conduite sont transférées du conducteur humain au véhicule, jusqu'au niveau où les véhicules peuvent conduire de manière presque autonome et où l'intervention du conducteur humain n'est nécessaire que dans des situations particulières⁵. L'homme vient alors pour ainsi dire en soutien de la machine.

Dans un premier temps, ces systèmes ne fonctionnent que lorsque toutes les conditions préalables sont réunies (dans le cadre d'un ODD⁶ délimité, par exemple *Highway Pilot*) pour ensuite fonctionner dans toutes les conditions de conduite.

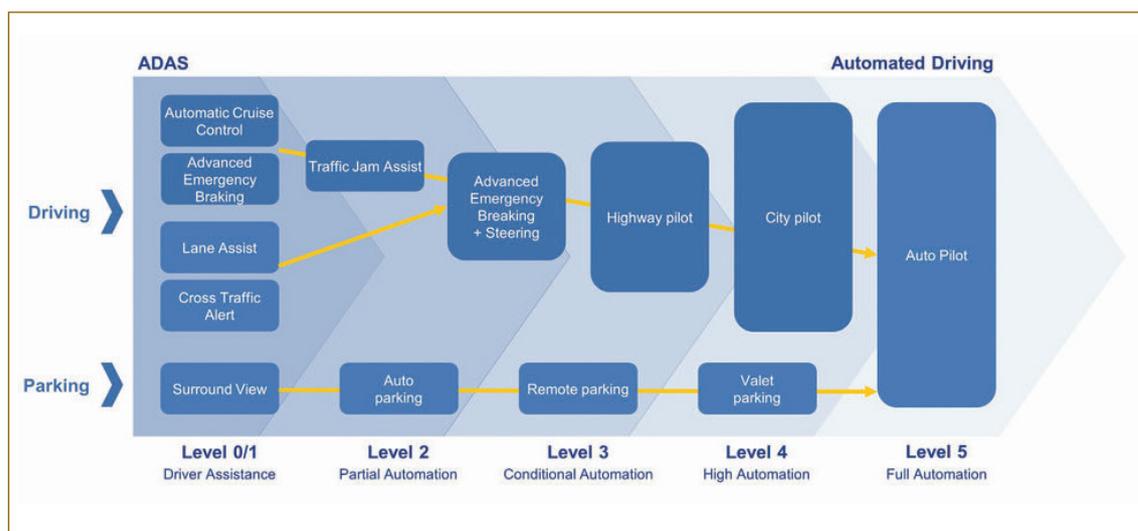


Figure 2.4 – Fonctionnalités pour différents niveaux d'automatisation (Pinton, 2020)

Selon la classification SAE, pour les ADAS, il s'agit des **niveaux SAE 1 et 2**, c'est-à-dire les niveaux auxquels le véhicule peut déjà fournir une aide limitée au conducteur (par exemple, l'*Adaptive Cruise Control*) ou intervenir dans des situations de conflit potentiel (par exemple, *Automatic Emergency Braking*).

À partir du niveau SAE 3 (le niveau le plus bas d'ADS), les véhicules automatisés sont capables de gérer eux-mêmes certaines tâches de conduite dans des circonstances définies en se basant sur leur perception de l'environnement de conduite (SAE International, 2018). Toutefois, un conducteur doit toujours être présent et, dès que le véhicule l'exige, ce conducteur doit être en mesure de reprendre le contrôle du véhicule (par exemple, *Traffic Jam Chauffeur*).

Les véhicules de niveau SAE 4 ou 5 devraient en principe être capables d'effectuer toutes les tâches de conduite de manière autonome. Dans le cas du **niveau SAE 4** (fonctionnel dans certaines conditions), les systèmes d'automatisation doivent permettre à un véhicule de détecter et de gérer les situations conflictuelles de manière autonome ou de s'arrêter en toute sécurité. Les véhicules de niveau SAE 5 (hypothétiques pour l'instant) devraient pouvoir fonctionner en toute sécurité dans toutes les conditions.

⁵ § 5.2 Prise de contrôle (*disengagement*).

⁶ ODD: *Operational Design Domain*, § 2.5

Le niveau SAE 3 est considéré comme problématique par certains (Torchinsky, 2022). La fonctionnalité SAE L3 n'est pour l'instant autorisée que dans des conditions de conduite limitées et très spécifiques et exige qu'un conducteur humain puisse reprendre les commandes à tout moment. Cependant, la spécification reste vague quant au moment et à la manière dont le contrôle doit être transféré du véhicule au conducteur humain. Cela peut donner lieu à des situations dangereuses. C'est pourquoi certains préconisent de passer immédiatement de SAE L2 à SAE L4 (p. ex., Litzler, 2019).

Pour une utilisation optimale des systèmes ADAS, les conducteurs doivent se familiariser également avec les fonctionnalités et les conditions préalables afin de garantir un fonctionnement sûr⁷.

L'évolution décrite ci-dessus repose sur l'hypothèse de véhicules fonctionnant de manière autonome. Toutes sortes de capteurs dans le véhicule analysent l'environnement et prennent des mesures en fonction de ces observations et des algorithmes de traitement. Aux niveaux d'automatisation inférieurs, l'action se limite principalement à informer le conducteur. Au fur et à mesure que le niveau d'automatisation augmente, il est possible d'intervenir de plus en plus activement dans le comportement du véhicule (p. ex. avec l'*Advanced Cruise Control*, la vitesse du véhicule est adaptée à la vitesse du véhicule qui précède et à l'écart qui a été paramétré).

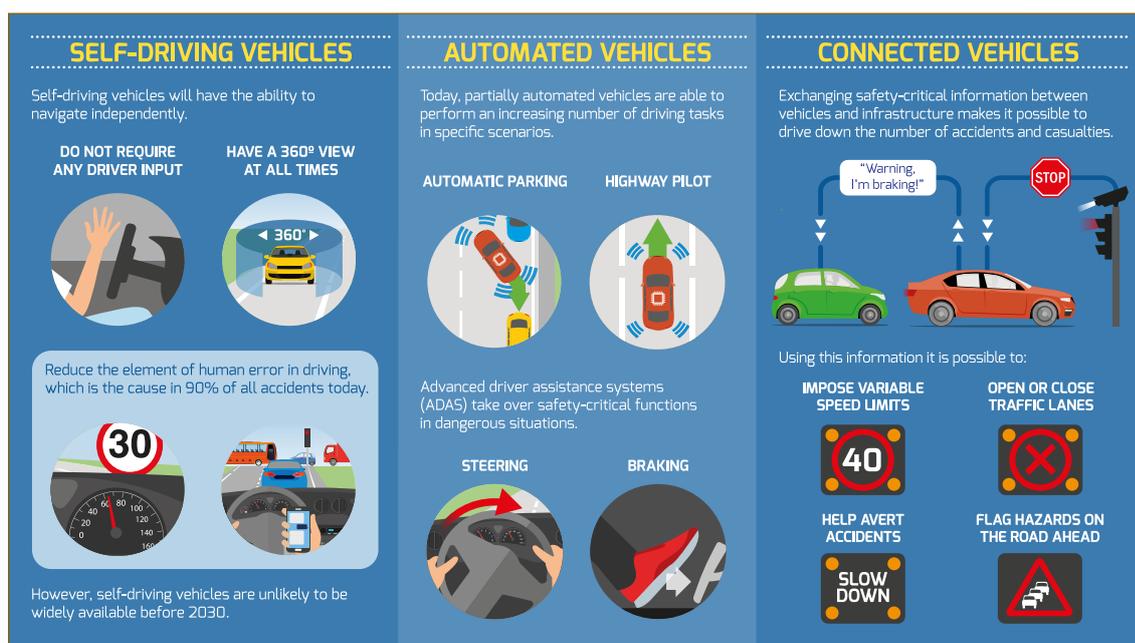


Figure 2.5 – Sécurité routière en fonction du type de véhicule (How can automated, s.d.)

⁷ La VSV organise des formations sur ces systèmes pour les moniteurs d'auto-école (Vlaamse Stichting Verkeerskunde [VSV], 2023). En 2022, la VRT a consacré une émission du programme **Kijk Uit** aux systèmes de sécurité routière (Police fédérale belge, 2022).

2.5 Operational Design Domain (Hillen, 2020) (ODD)

Les systèmes d'aide à la conduite dont sont équipés les véhicules qui arrivent aujourd'hui sur le marché ne fonctionnent généralement que dans des conditions spécifiques, connues sous le nom de **Operational Design Domain**⁸. Ces conditions préalables peuvent être liées à une grande variété de paramètres (lieu, régime de vitesse, conditions météorologiques, densité du trafic, revêtement routier, signalisation, règles et usages locaux, etc.)

Il y a encore du chemin à parcourir avant que les véhicules soient capables de gérer de manière totalement automatisée l'ensemble des conditions routières et environnementales qu'un conducteur humain est à même de gérer (figure 2.6).

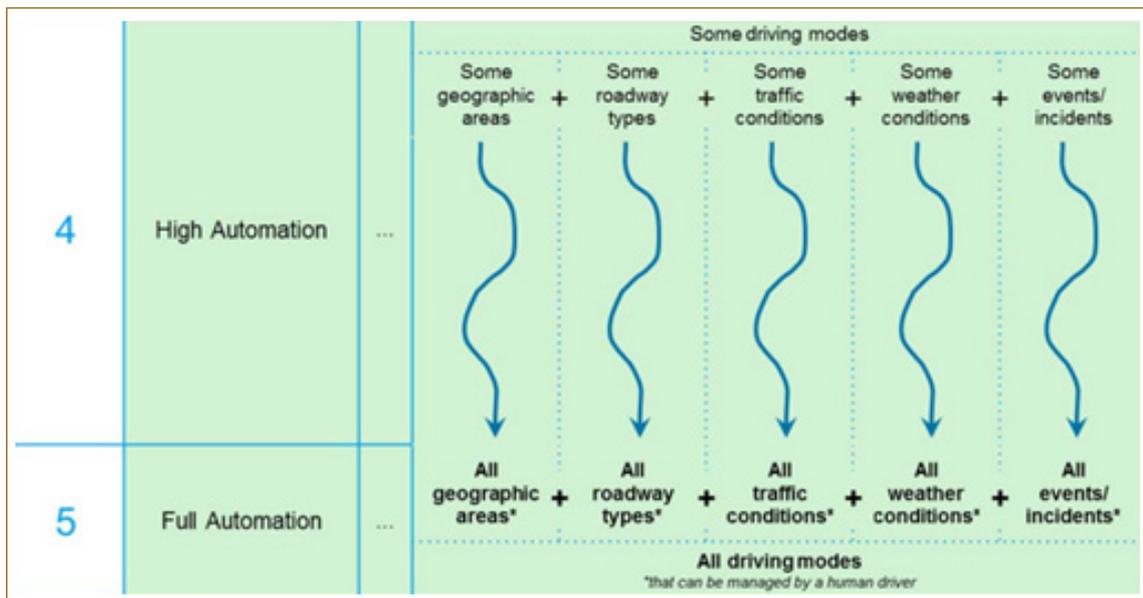


Figure 2.6 – Transition d'une automatisation élevée à une automatisation complète de la conduite dans différents contextes (ITF, 2015)

Les constructeurs automobiles sont confrontés au défi de développer des systèmes qui fonctionnent de manière fiable dans le plus grand nombre de circonstances possible. Par ailleurs, les utilisateurs de véhicules équipés de systèmes d'aide à la conduite doivent être conscients du fait que ces systèmes ne fonctionnent pas de manière fiable en toutes circonstances, voire qu'il est recommandé de désactiver ces systèmes si les conditions préalables sont transgressées.

⁸ SAE J3016 (2021), the Operational Design Domain (ODD) for a driving automation system is defined as "Operating conditions under which a given driving automation system, or feature thereof, is specifically designed to function, including, but not limited to, environmental, geographical, and time-of-day restrictions, and/or the requisite presence or absence of certain traffic or roadway characteristics." (SAE International, 2021b).

C'est ainsi qu'un panneau de vigilance a été placé dans le Westerscheldetunnel (figure 2.7) après des informations selon lesquelles des véhicules freinent brusquement dans le tunnel (Adaptive cruise control, 2021).



Figure 2.7 – Panneau de signalisation recommandant de désactiver l'ACC (Westerscheldetunnel, Pays-Bas)
(Adaptive cruise control, 2021)

Il n'existe **pas encore d'accord formel** sur les paramètres déterminants pour l'ODD. Les constructeurs automobiles peuvent en grande partie décider de la base sur laquelle ils définissent un ODD.

Les gestionnaires routiers ont toutefois besoin d'une approche uniforme. Si les conditions préalables au fonctionnement d'une fonctionnalité bien précise peuvent être **standardisées**, le gestionnaire routier a plus de points de repère pour en tenir compte lors de l'aménagement des routes.

Dans certaines circonstances, les gestionnaires routiers peuvent recommander de désactiver un **système ADAS** si son utilisation risque de compromettre la sécurité routière.

L'introduction sur la route de systèmes encore en développement ou immatures est considérée par l'Onderzoeksraad voor veiligheid aux Pays-Bas comme une étape nécessaire pour poursuivre le développement de ces systèmes. Après des études approfondies, le conseil affirme qu'il est question d'une **black box**. Lors de l'autorisation de nouvelles voitures, les autorités n'ont pas suffisamment de contrôle sur le fonctionnement des nouveaux systèmes dans différentes circonstances. Ce conseil précise également que pour certains des systèmes d'aide à la conduite, l'effet de ces systèmes sur la sécurité routière n'est pas clair et qu'il n'y a pas de suivi et d'évaluation appropriés de ces systèmes (Onderzoeksraad voor Veiligheid, 2019).

Dans l'attente d'une réglementation internationale, le gouvernement allemand a adopté en juillet 2021 une loi autorisant la conduite entièrement autonome (SAE L4). Cette législation n'est pas une autorisation générale, mais permet au gestionnaire routier d'autoriser l'activation de systèmes de conduite autonome dans une zone ou sur une route bien définie et – bien sûr – uniquement pour les véhicules dotés de cette fonctionnalité (New autonomous driving law, 2021 ; Pingol, 2021).

Le tableau ci-dessous illustre les différentes conditions préalables au fonctionnement optimal d'un système de maintien de trajectoire tel qu'il est présenté dans le manuel pour un certain nombre de modèles de véhicules actuels.

	Voiture 1	Voiture 2	Voiture 3	Voiture 4
Vitesse	65-180 km/h	àpd 65 km/h	àpd 60 km/h	60-180 km/h
Action, avertissement	Correction volant	Vibration du volant	Correction volant + vibration du volant	Correction volant, bourdonnement des haut-parleurs, visuel
Fonctionnement perturbé par	Marquages absents, non visibles ou multiples (zones de chantier)	D'autres objets peuvent être perçus comme des marquages.	Chaussée dégradée, pas de délimitation entre les voies, autres objets, chantiers routiers, sommets de côtes et descentes	Marquages non visibles (au moins d'un côté), obstruction de la caméra
		Manœuvres brusques	Conduite sportive	Conditions de circulation (par exemple, véhicules en mouvement non alignés avec le vôtre, véhicules circulant transversalement ou en sens inverse sur la même voie, virage à faible rayon de courbure)
	Faible distance par rapport au véhicule qui précède			Distance appropriée par rapport au véhicule qui précède
		Conditions météorologiques difficiles	Mauvaises conditions météorologiques	Conditions de visibilité inadéquates (fortes pluies, grêle, brouillard dense, fortes chutes de neige, formation de givre sur le pare-brise)
	Routes étroites, routes sinueuses	Routes étroites	Virages serrés	Routes non rectilignes, routes avec des virages qui ne sont pas larges
				Indicateur de direction actif

Tableau 2.1 – Conditions préalables au Lane Keeping Assistance (LKA) pour quatre voitures différentes

2.6 Questions sociétales

Les premières expériences avec des voitures sans conducteur remontent déjà à 100 ans. Toutefois, ce n'est que depuis le début du siècle que diverses organisations, pour des motifs variés et avec des degrés de réussite divers, se sont activement engagées dans le développement de la technologie des véhicules autonomes. Aussi, il n'est pas rare que les avancées technologiques s'accompagnent de **questions sociétales**.

L'étude des véhicules autonomes et de la sécurité routière, avec un accent particulier sur l'infrastructure routière, doit inclure une prise de conscience de la *big picture*. En effet, le développement des véhicules autonomes n'est qu'une des évolutions de la mobilité qui doit être prise en compte. La politique de mobilité, la durabilité, le développement urbain et la numérisation sont autant d'éléments qui entrent en jeu. Dans ce contexte, diverses questions sociétales doivent être prises en compte lors du développement des déplacements autonomes (par exemple, l'**économie du partage**, les **questions environnementales** et l'**applicabilité des mesures** en lien avec l'accessibilité des villes).

2.7 Questions éthiques

Pour les constructeurs automobiles, les véhicules autonomes ne sont pas une fin en soi. La recherche et le développement de véhicules plus sûrs et moins polluants sont fortement encouragés par la recherche et le développement autour des véhicules autonomes. Il n'est pas rare que des innovations significatives soient mises en œuvre (sur une base volontaire) par l'ensemble de l'industrie automobile et/ou qu'elles soient légalement intégrées et rendues obligatoires dans tous les modèles de véhicules. A ce jour, les systèmes de sécurité passive sont quasiment généralisés. Les systèmes de sécurité active et les véhicules autonomes, tant privés que partagés, sont en quelque sorte une forme omniprésente de cette tendance; en réduisant ou en éliminant l'inconstance du facteur le plus incertain (l'homme), on s'efforce de construire des véhicules plus sûrs.

L'éthique est au cœur des dilemmes qui peuvent se poser (Wittock & Wittock, 2021):

1. Comment programmer un algorithme ADS en cas d'accident inévitable? Les conséquences de l'accident pèsent-elles plus lourdement sur les occupants que sur les autres usagers de la route?
2. La technologie devrait-elle être rendue obligatoire si elle augmente effectivement la sécurité de manière significative?
3. Quel est le rapport entre les investissements des fonds publics? Quelle priorité accorder aux transports autonomes privés par rapport aux transports publics (autonomes ou non), par exemple?
4. Quel pouvoir de décision accorder à un véhicule autonome? Les humains pourraient-ils perdre certaines aptitudes s'ils doivent être en mesure de prendre le contrôle du véhicule uniquement en cas d'urgence?

Le premier dilemme éthique soulevé semble devenir moins pertinent à mesure que l'**intelligence artificielle** trouve sa place dans les véhicules autonomes. L'algorithme contrôle alors la voiture en se basant sur des millions de kilomètres de comportement routier, en copiant le comportement positif d'autres conducteurs dans de nouvelles situations⁹.

Le troisième dilemme nécessite quelques éclaircissements. Il semble y avoir un contraste entre transport privé autonome et transports en commun non autonomes. Cela ne tient pas compte du fait que les transports en commun deviennent également, au moins en partie, autonomes. Les taxis robots qui circulent déjà dans certaines villes en sont la preuve «vivante». Le dilemme pourrait donc être mieux défini comme suit: «Quelle priorité d'investissement dans les équipements pour le transport privé autonome par rapport aux transports en commun autonomes?».

■ 2.8 Dynamique

Le développement et le déploiement des véhicules autonomes est un processus dynamique. Pendant un certain temps encore, il faudra continuer à tenir compte d'un **mélange de véhicules** avec des niveaux d'automatisation différents et de véhicules d'usagers de la route qui ne sont que peu, voire pas, équipés en nouvelles technologies.

La composition du mélange de véhicules évolue dans le temps, mais on ne sait pas exactement à quel rythme se fera la transition vers des véhicules autonomes de niveau SAE plus élevé. En termes de sécurité routière, cela nécessite une approche holistique de la sécurité de tous les types d'usagers de la route: des usagers conventionnels et non connectés (par exemple, les piétons, les voitures anciennes) aux usagers hyperconnectés (véhicules autonomes de niveau SAE 5). Il est essentiel de **contrôler ce qui est sûr** pour chaque mode de déplacement, à la fois séparément pour un type donné et entre les types.

En termes d'**infrastructure**, l'approche consiste à développer des véhicules autonomes capables d'emprunter les **routes existantes, qui ne sont pas toujours dans un état optimal**. En principe, aucune route spéciale ne sera construite pour le passage à la mobilité autonome. Il n'existe pas de norme physique unique pour la route prête à accueillir la voiture autonome.

Toutefois, un consensus général s'est dégagé sur le fait que l'**entretien des routes gagnera en importance** avec le déploiement des véhicules autonomes. Les véhicules les plus avancés dotés d'une fonctionnalité de conduite autonome deviendront de moins en moins dépendants des marquages routiers. Cependant, de mauvaises conditions météorologiques ne permettent pas de lire correctement les marquages routiers. Malgré les progrès technologiques, on s'accorde toujours à dire qu'une **signalisation** claire et **uniforme** (panneaux de signalisation et marquages routiers) peut contribuer à un fonctionnement plus fiable des nouvelles technologies automobiles. Cela profite à l'ensemble des différents véhicules et usagers de la route¹⁰.

Cependant, il reste important que le développement des véhicules autonomes tienne compte des situations réelles et de l'infrastructure qui ne répond pas à des normes prédéfinies. Aux niveaux SAE inférieurs, il est encore possible de reprendre en charge la conduite du véhicule. Dans les normes SAE L4 et L5, le véhicule doit également être capable de fonctionner dans des conditions de conduite non idéales.

¹⁰ § 5.3 sur le groupe de travail à ce sujet (sous-groupe de travail EGRIS *Road markings & signs*).

Il reste **urgent** de rendre le système de circulation plus sûr. L'objectif de réduire à zéro le nombre de blessés graves et de décès sur les routes d'ici 2050 doit être atteint au cours des prochaines décennies et, pour ce faire, toutes les mesures possibles doivent être prises. En effet, les statistiques montrent une certaine stagnation (voire une augmentation, comme aux États-Unis) du nombre de blessés graves et de tués sur les routes. (National Highway Traffic Safety Administration [NHTSA], s.d.; World Health organization [WHO] & United Nations [UN] Regional Commissions, 2021)

En Europe, il existe un engagement fort en faveur de la *Safe System Approach*; en Belgique, le gouvernement fédéral et les gouvernements régionaux misent sur *All for Zero*¹¹. Entre-temps, le symposium ARTS 2022 (Highlights, 2023) a révélé qu'aux États-Unis, habituellement considérés comme pionniers en matière de véhicules autonomes, on prend peu à peu conscience des faits suivants:

- l'automatisation n'est **pas une panacée** offerte sur un plateau d'argent par l'industrie, mais elle constitue un **outil potentiel** pour contrer l'augmentation du nombre de tués sur les routes;
- une politique fédérale est nécessaire, afin d'éviter la disparité des réglementations;
- il est nécessaire de coordonner les performances humaines et celles de l'*Automated driving* (AD) afin d'optimiser les points forts plutôt que d'attendre des humains qu'ils résolvent systématiquement les situations difficiles en matière d'AD;
- une attention croissante est portée au soutien des infrastructures pour la conduite automatisée (soutien numérique, capteurs, séparations physiques, etc.).

¹¹ § 4 Objectifs de la politique de sécurité routière



Chapitre 3

Éléments de recherche et essais

Pour connaître le potentiel des solutions, il convient, dans un premier temps, de bien comprendre la nature des problèmes. Dans un deuxième temps, la recherche débouche sur des solutions possibles qui, dans un troisième temps, doivent se concrétiser dans la pratique et faire leurs preuves.

En ce qui concerne spécifiquement la transition vers les véhicules autonomes, la connaissance des causes d'accident constitue le **fondement** du processus visant à réduire réellement le nombre d'accidents:

- Quelles sont les causes d'accident existantes et comment évoluent-elles?
- Quelles sont les causes d'accident qu'un véhicule autonome peut résoudre?
- Comment tester cela dans la pratique?
- Comment intensifier?

Au chapitre 2, nous avons fait état du potentiel de la sécurité routière, mais aussi de l'apparition de nouveaux risques. Pour réaliser les bons investissements, pour apprécier le rôle de l'infrastructure à sa juste valeur, il faut procéder à une analyse pertinente.

La sécurité routière est généralement évaluée en fonction du nombre et de la gravité des accidents de la route et du nombre de victimes de la route. Une **analyse approfondie** des accidents permet d'identifier les principales causes d'un accident. Ces causes sont réparties en trois grandes catégories: les causes humaines, les causes liées aux véhicules et les causes environnementales.

3.1 Analyse des causes (Oorzaakanalyse, s.d.)

Le premier objectif de l'analyse des causes est d'identifier la **cause première** d'un problème ou d'un événement.

Souvent, plusieurs facteurs entrent en ligne de compte dans les accidents de la route. L'analyse des accidents montre que neuf fois sur dix, le facteur humain est à l'origine des conséquences d'un accident de la route ou y contribue. Dans environ 60 % des cas, des facteurs purement humains jouent un rôle. Les actions visant à accroître la sécurité routière (leçons de conduite, contrôles de la vitesse et de l'alcoolémie, etc.) se concentrent donc souvent sur ce facteur humain prépondérant.

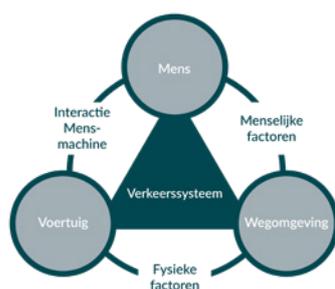


Figure 3.1 – Composantes de la sécurité routière

Le deuxième objectif est de comprendre pleinement comment ces causes profondes peuvent être résolues ou compensées afin qu'elles n'entraînent plus d'accidents (ou qu'elles soutiennent les solutions visant à atténuer les conséquences d'un accident), ou de tirer des enseignements des problèmes sous-jacents à la cause profonde.

Dans le cas d'accidents dont la cause peut être principalement imputée à des facteurs humains, il peut s'agir d'une combinaison de **facteurs sous-jacents** des composantes et de leurs combinaisons (par exemple, l'interaction des facteurs humains avec le véhicule/*Human Machine Interface* (HMI)). Une partie de la solution (limiter ou éliminer les causes humaines d'accident) peut alors consister à améliorer cette interaction en modifiant la HMI ou en formant l'utilisateur. Il s'agit également d'étudier les mesures susceptibles de résoudre ou de compenser (atténuer) le problème, cf. les routes qui pardonnent.

Exemple de combinaison de facteurs pouvant ressortir de l'examen d'un rapport d'accident: la vitesse pratiquée était de 150 km/h, alors que la vitesse autorisée était de 120 km/h. La chaussée était rendue glissante par la pluie, le conducteur était distrait par un message du GSM sur son ordinateur de bord et il conduisait sous influence (drogues).

Pour chacun des facteurs mentionnés, les véhicules autonomes peuvent potentiellement apporter une solution:

- *Vitesse pratiquée: le VA peut être paramétré de manière à ce que le véhicule ne dépasse pas la limitation de vitesse.*
- *Chaussée glissante: le VA analyse lui-même la glissance de la chaussée et adapte son comportement de conduite en conséquence.*
- *Distraction par le GSM: avec la conduite entièrement autonome, ce risque n'existe plus. Aux niveaux inférieurs de la conduite autonome, le conducteur doit maintenir son attention sur la route et il peut toujours être distrait par son GSM. Néanmoins, le comportement du véhicule (p. ex. LKA) et celui du conducteur (p. ex. Advanced Driver Distraction Warning) sont surveillés par des systèmes d'aide à la conduite et le risque d'accidents liés à la distraction diminue encore par rapport à un véhicule traditionnel.*
- *Conduite sous influence: avec la conduite entièrement autonome, ce risque n'existe plus; aux niveaux SAE inférieurs, cela peut rester problématique, même s'il existe des véhicules capables de tester l'aptitude du conducteur à prendre le volant.*

Le troisième objectif est de tirer des enseignements de cette analyse et de prévenir systématiquement les problèmes futurs ou de répéter les succès. Il s'agit de rechercher des liens entre différents accidents, en mettant l'accent sur la prévention de nouveaux accidents similaires. Il faut ensuite faire quelque chose de cette analyse. La modification des processus et des systèmes peut permettre d'éviter des problèmes à l'avenir.

3.2 Évaluer la sécurité des véhicules automatisés et des véhicules autonomes?

Avec l'automatisation croissante, les véhicules prennent de plus en plus le rôle du conducteur. A l'heure actuelle, l'**aptitude à la conduite des conducteurs** est évaluée une première fois lors de leur formation, en tenant compte des règles et usages locaux. Par la suite, cette aptitude à la conduite est encore évaluée de manière ad hoc au moyen d'actions de contrôle, de systèmes de surveillance automatisés, d'infractions constatées, etc. L'**aptitude à rouler d'un véhicule** est évaluée conformément aux exigences utilisées pour l'homologation et, par la suite, lors du contrôle technique périodique. Une homologation et un certificat de contrôle technique positif sont nécessaires pour autoriser un véhicule à circuler sur la voie publique. Pour les systèmes ADAS, le contrôle continu du bon fonctionnement semble être une préoccupation majeure, plutôt qu'un contrôle périodique. Il est également préférable de faire calibrer avec précision les systèmes ADAS après une collision ou des dommages à la carrosserie ou aux vitres.

La sécurité passive des véhicules est notamment évaluée par les **essais de choc Euro NCAP** (volontaires) qui donnent une indication des conséquences potentielles d'une collision pour les occupants et les autres usagers de la route. Les essais de choc Euro NCAP sont une initiative volontaire de l'industrie automobile. L'industrie sponsorise chaque année une série de tests sur des modèles de véhicules populaires. En outre, un constructeur automobile est libre de soumettre ses modèles de véhicules à des tests. L'organisation n'a pas la capacité de tester tous les modèles et variantes de véhicules possibles.

Les systèmes embarqués devenant de plus en plus obligatoires et remplaçant de plus en plus les conducteurs humains, il est nécessaire d'évaluer la **fonctionnalité et la fiabilité** de ces systèmes et éventuellement de les confronter à des exigences minimales avant de les autoriser dans les voitures.

Toutefois, il **n'existe pas à ce jour de méthode normalisée** pour évaluer la sécurité de fonctionnement d'un véhicule autonome.

Les évaluations peuvent être basées sur le test de composants ou de fonctions individuels. Le règlement (UE) 2019/2144, 2019 exige des constructeurs automobiles qu'ils équipent progressivement de **série** les nouveaux véhicules d'un certain nombre de possibilités avancées (LKA, AEB, détection de la somnolence, ISA, etc.). La fiabilité de ces systèmes doit pouvoir être démontrée selon des critères définis. Par exemple, pour l'ISA, on part du principe que dans 80 % des cas, le régime de vitesse doit être reconnu correctement.

Euro NCAP a ajouté une composante **Safety Assist** à ses évaluations. Dans le cadre de cette évaluation, la disponibilité et le fonctionnement d'un certain nombre de *safety features* sont évalués sur la base de plusieurs scénarios standard dans un dispositif d'essai, en tenant compte également de conditions moins idéales. Ainsi, l'évaluation des systèmes LKA prend également en compte le fonctionnement du système en cas d'absence de marquage des bords. L'évaluation *Safety Backup* porte sur le dysfonctionnement du système, l'intervention du conducteur et la prévention des accidents.

Cependant, l'évaluation des gains en termes de sécurité des VA par l'**analyse d'accidents réels** ne semble pas non plus être une solution concluante. Malgré tout, les accidents de la route impliquant des VA sont relativement rares. Il faudrait énormément de temps avant de pouvoir démontrer, sur la base de données d'accidents, qu'un VA est plus sûr qu'un véhicule conventionnel¹².

¹² 390 accidents de la circulation pour 1E09 km parcourus (0,00004 %) (De Bruyne, 2021) / Google car en Californie (US) période 2000-2015: 11 accidents pour 2,7E06 km parcourus (0,0004 % / 10 fois supérieur) (selon Pritchard, 2015) – également beaucoup d'informations (similaires) dans (ITF, 2018).

Pour démontrer statistiquement que les véhicules motorisés autonomes ont un taux d'accidents mortels similaire à celui du trafic actuel, il faudrait parcourir un total de 440 millions de km sans qu'aucun décès ne soit à déplorer. Il faudrait encore des années d'essais avec un nombre limité de véhicules. La **conduite expérimentale** ne peut à elle seule fournir des preuves suffisantes de la sécurité des véhicules autonomes. Les développeurs de cette technologie et les testeurs externes devront mettre au point des méthodes innovantes pour démontrer la sécurité et la fiabilité. Même ces méthodes ne permettront peut-être pas d'établir avec certitude la sécurité des véhicules autonomes¹³.

La sécurité est une préoccupation majeure dans les **projets pilotes**. Il convient de démontrer au préalable la manière dont les situations conflictuelles seront gérées sans compromettre la sécurité des usagers de la route. Dans ce cadre, des scénarios de plus en plus stricts sont envisagés.

Dans le cas d'essais sur la voie publique, les rapports d'accidents et le transfert du contrôle au conducteur humain (**disengagement**) peuvent constituer une mesure d'évaluation du fonctionnement des systèmes d'aide à la conduite (Petrovič, 2020 ; Wang et al., 2020).

Cependant, l'utilisation de l'indicateur de *disengagement* se heurte également à des réticences (Yoshida, 2019). Par conséquent, les concepteurs de VA pourraient être tentés de mettre en place des systèmes plus tolérants. En revanche, les *disengagements* et les informations sur les raisons pour lesquelles le contrôle a été transféré au conducteur humain sont utiles pour identifier les limites d'un fonctionnement fiable des ADAS et ADS et pour accroître systématiquement la fiabilité de ces systèmes dans ces cas extrêmes.

Les études sur les effets des ADAS sont donc également basées sur des **simulations** dans un environnement de conception. Les simulateurs de conduite simulent un environnement de conduite, qui peut être utilisé pour analyser le comportement d'un véhicule autonome ou d'un conducteur (par exemple en modifiant l'environnement de conduite et en comparant le comportement). Cette méthode de recherche peut également être utilisée dans les situations transitoires, lorsqu'un véhicule autonome transfère ses tâches à un conducteur. Cependant, le développement et la simulation de tels environnements de conception ne vont pas de soi non plus (Feng et al., 2021). Les méthodes de simulation existantes sont basées sur des «moyennes statistiques». Les constructeurs automobiles utilisent des modèles de simulation très sophistiqués avec une grande complexité et de nombreuses variations, mais il s'avère extrêmement difficile de simuler la **complexité d'un environnement de circulation réel** avec une multitude d'événements aléatoires.

3.3 Environnement de conception et essais sur la voie publique

À l'échelle mondiale, de plus en plus de **projets pilotes** avec des véhicules autonomes sont mis sur pied. Surtout hors Europe¹⁴, il s'agit d'essais à grande échelle où un service de taxis entièrement automatisés est proposé dans une ville ou un quartier. En Belgique, les projets pilotes se limitent pour l'instant à l'expérimentation de navettes sur un trajet fixe (Louvain-La-Neuve, Terhills, Malines, etc.) ou à l'expérimentation avec des véhicules individuels (Detroz et al.). Grâce à l'expérience acquise dans le cadre de ces projets pilotes, les connaissances en matière de sécurité routière augmenteront au fur et à mesure que la distance parcourue par ces véhicules augmentera.

¹³ Il faudrait encore 12,5 ans pour tester 100 véhicules motorisés autonomes qui circuleraient 365 jours, 24 heures sur 24, à une vitesse moyenne de 40 km/h (Kalra & Paddock, 2016).

¹⁴ États-Unis, Chine, etc.

Cependant, il est impossible d'évaluer physiquement tous les scénarios possibles (combinaison de différents environnements, véhicules et implication du conducteur). L'estimation de la sécurité des véhicules autonomes nécessite une **combinaison de simulations et de projets pilotes**. Seul(e)s, les simulations ou les projets pilotes sont trop unilatérales(-raux) pour obtenir une image globale du potentiel de sécurité. Les conditions d'essai, par exemple, ne sont pas toujours représentatives du comportement imprévisible des usagers de la route sur la voie publique.

Projet pilote Waymo – États-Unis (Bellan, 2022).

Depuis 2016, Waymo teste des taxis autonomes (*ride-hailing services*) dans un quartier précis de Phoenix, en Arizona. Au début, il y avait toujours un *safety-driver* comme chauffeur «de secours» dans le véhicule. Depuis 2020, ce n'est plus nécessairement le cas. En 2022, la zone dans laquelle ces véhicules opèrent a été étendue à d'autres quartiers et à l'aéroport de Phoenix. Récemment encore, l'utilisation de ces services était réservée aux employés. Les développements se sont accélérés en 2022 et 2023. En 2022, l'utilisation des véhicules a été ouverte à un public plus large. En 2023, les zones d'essai ont été étendues (Phoenix, Los Angeles, San Francisco), ce qui a conduit à l'admission d'applications commerciales.

Projet pilote Mobileye – Allemagne (Mobileye kicks off, 2023).

Le feu vert début 2023 de TÜV SÜD qui a été donné à Mobileye pour déployer des voitures autonomes dans toute l'Allemagne, permet à Mobileye d'intensifier ses projets pilotes MaaS à Darmstadt et Munich¹⁵. Les taxis robots et navettes autonomes sont à équiper de la technologie Mobileye, ce qui nécessite des tests approfondis. Dans un premier temps, un *backup safety-driver* est toujours présent dans ces véhicules. Par la suite, si les agréments et les autorisations nécessaires sont obtenus, les essais auront également lieu sans ce back-up.

Le système avancé d'aide à la conduite est connu sous le nom de «*Mobility SuperVision™*». Il contient des éléments technologiques qui ont été testés, validés et adoptés par les principaux constructeurs automobiles. En ajoutant progressivement de la puissance de calcul et des capteurs actifs au système, Mobileye œuvre pour proposer des véhicules autonomes aux consommateurs.

¹⁵ MaaS concerne la planification, la réservation et le paiement de tous les transports possibles par le biais d'applications. Par exemple, le vélo, la voiture, le scooter, le train, le tramway ou le taxi (fluvial) partagés. Et même sa propre voiture ou son vélo. Mais surtout des combinaisons de tous ces types de transport (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, s.d.).

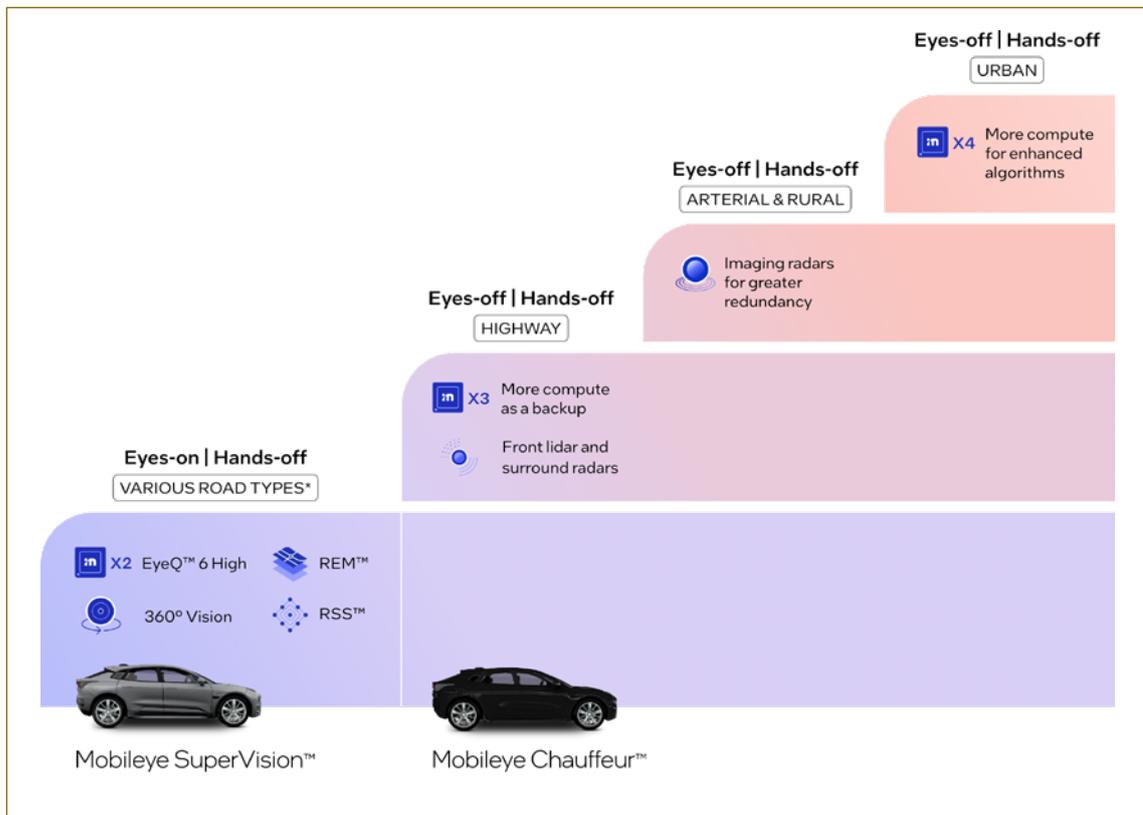


Figure 3.2 – (Mobileye SuperVision, 2023)

3.4 Confiance des consommateurs dans les véhicules autonomes

Il n'est pas si évident de se prononcer sur l'impact de l'automatisation des véhicules sur la sécurité routière. Les accidents impliquant des véhicules autonomes font l'objet d'une attention supérieure à la moyenne, donnant peut-être une image plutôt négative. La prise de conscience du fait que les véhicules autonomes, comme les conducteurs humains, peuvent commettre des erreurs dans l'accomplissement de leurs tâches semble s'accroître. En revanche, alors que les erreurs des conducteurs sont perçues comme inévitables, les erreurs des véhicules autonomes ne sont (presque) pas tolérées.

Les expériences avec des véhicules autonomes qui reçoivent des évaluations positives sont nécessairement limitées dans le temps et l'espace et ne permettent pas de généraliser. Néanmoins, il semble que la **confiance des consommateurs** dans la sécurité des véhicules autonomes augmente (figure 3.3).

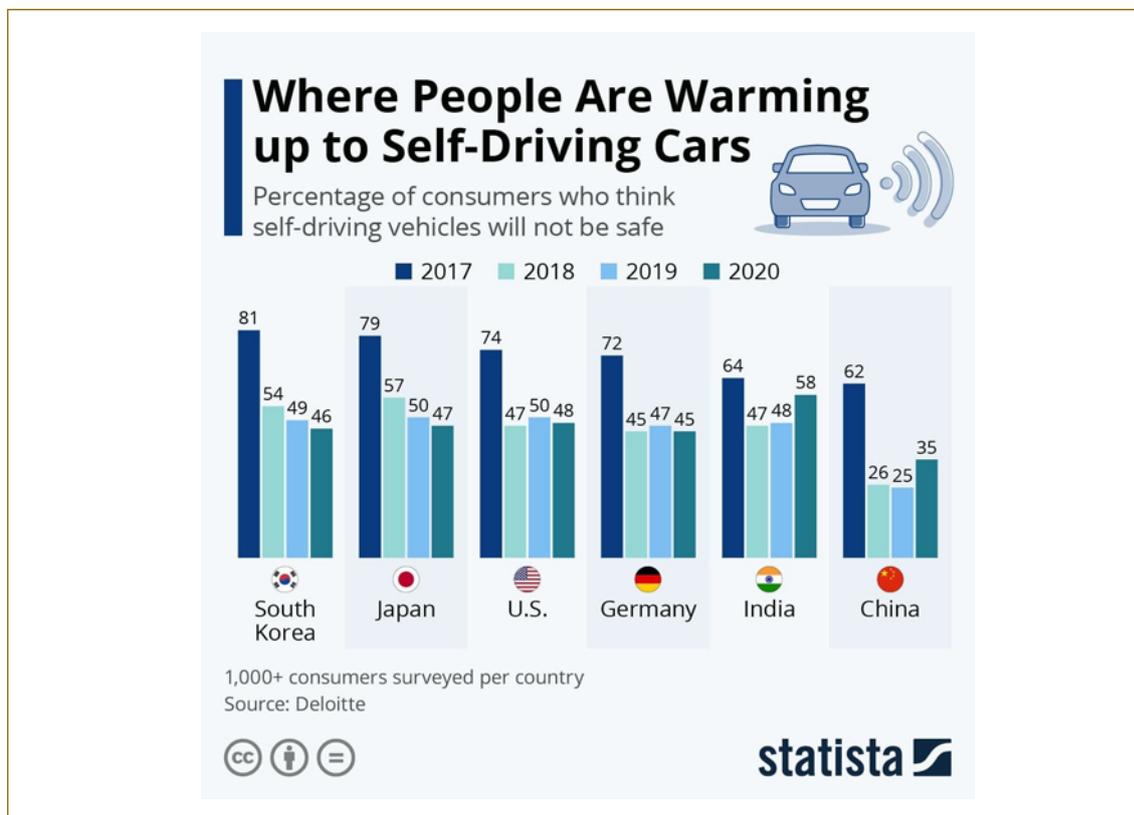


Figure 3.3 – Why autonomous vehicles need a large-system approach to safety (Sun et al., 2021)

Tester les véhicules sur la voie publique est la **façon** la plus **honnête** de démontrer la sécurité des véhicules. Il n'est pas nécessaire pour cela de conduire en mode entièrement autonome. Les essais avec un conducteur humain, au cours desquels l'algorithme (en «**mode shadow**») observe le comportement humain et le compare aux actions qu'il entreprendrait lui-même, peuvent également fournir beaucoup d'informations utiles. Ils permettent également d'ajuster l'algorithme.

Des données chiffrées objectives, par exemple, peuvent contribuer à dissiper le scepticisme du public quant à la sécurité routière des véhicules autonomes. Les avis négatifs peuvent être considérés sous un angle différent.

Pour renforcer la confiance des consommateurs, une évaluation par **Euro NCAP** est également un bon début. À l'origine, les tests Euro NCAP consistaient à évaluer la sécurité passive des véhicules au moyen d'essais de choc dans lesquels des mannequins prenaient la place du conducteur. À un stade ultérieur, une évaluation de l'impact d'un accident sur les autres occupants et sur un usager de la route vulnérable touché a également été ajoutée. Parallèlement, Euro NCAP évalue également les véhicules en fonction des **systèmes d'assistance** (actifs) (2020 assisted driving tests, 2020 ; Euro NCAP, 2020).

3.5 Connectivité et communication

En général, les experts s'accordent à dire que la connectivité **peut aider** les véhicules autonomes à fonctionner de manière plus fiable, plus efficace et plus sûre. Ainsi, les constructeurs automobiles semblent aujourd'hui douter que les systèmes ISA basés uniquement sur la reconnaissance du régime de vitesse par les capteurs du véhicule soient suffisamment fiables (Van Doorselaet, 2022). Afin d'atteindre un niveau de fiabilité acceptable, d'autres sources de données devraient également être exploitées (*crowdsourcing, digital maps, etc.*), dont les informations devraient ensuite parvenir dans le véhicule d'une manière ou d'une autre.

D'autre part, le besoin de connectivité est remis en question par les expériences de projets pilotes de taxis robots (États-Unis, Chine). Dans ces projets, la connectivité n'est pas critique pour la sécurité et toutes les décisions sont prises dans le véhicule. La connectivité est destinée à permettre l'intervention de la centrale de trafic à la demande du véhicule et à proposer une assistance à la clientèle.

La question de savoir si la sécurité doit dépendre de cette connectivité ne fait donc pas l'unanimité. Cependant, entre «dépendre de» et «contribuer à», il existe toute une série de variantes.

En tout état de cause, il sera important de fixer des normes claires en matière de connectivité, de sécurité opérationnelle et de sécurité (cybersécurité et fiabilité). Au sein du CEN/TC278 (*Road Transport and Traffic Telematics*), de l'ISO/TC204 (*Intelligent Transport Systems*) et de l'ETSI TC *Intelligent Transport Systems*, on élabore notamment des normes pour l'échange de données¹⁶.

La communication, aujourd'hui essentiellement visuelle, entre les conducteurs de véhicules, les piétons et les cyclistes est difficile à saisir dans les algorithmes et les systèmes automatisés. Les véhicules utilisés dans les projets pilotes ont des marges de sécurité importantes et ne sont pratiquement pas impliqués dans des accidents avec des piétons ou des cyclistes. Les systèmes actuels peuvent intervenir correctement en cas de quasi-collisions dans de nombreuses circonstances. En revanche, l'échange d'informations pour évaluer les comportements et y répondre correctement sans brusquerie reste un défi à part entière. Des études suggèrent que les piétons et les cyclistes pourraient (involontairement) modifier leur comportement dans les interactions avec les VA ou qu'il faudrait peut-être les entraîner à en tenir compte. Si le comportement des cyclistes et des piétons change effectivement, il est évidemment extrêmement difficile d'automatiser des systèmes basés sur ce comportement changeant.

Lorsque les véhicules sont **connectés**, d'autres facteurs doivent également être pris en compte. Il n'est pas inconcevable que la communication soit interrompue ou que des informations erronées soient transmises, de manière malveillante ou non. Comme dans d'autres applications (aviation, énergie), il semble donc préférable de ne pas **faire dépendre** le fonctionnement des fonctions critiques pour la sécurité de cette connectivité.

¹⁶ P. ex. European Committee for Standardization, 2018-2022: spécifications de l'échange de données pour certains services STI

¹⁷ AEB piéton et AEB cycliste plus d'infos (AEB pedestrian, 2023)

3.6 Code de bonnes pratiques d'expérimentation en Belgique (Heyndrickx, 2016)

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

Ce 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. 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 vaste gamme de véhicules, allant des petits modules et navettes automatisés aux véhicules routiers plus traditionnels tels que les voitures, les camionnettes, les bus ou les camions.

Pour effectuer des essais sur la voie publique ou dans d'autres lieux publics, il faut remplir un formulaire de demande. Ce document servira de base à l'évaluation par le SPF Mobilité et Transports en vue de l'octroi de l'autorisation pour les véhicules prototypes.

En outre, l'utilisation de l'infrastructure nécessite une **autorisation régionale** de la part du gestionnaire routier régional ainsi qu'une précision des conditions dans lesquelles cette autorisation est accordée (intensité du trafic, conditions météorologiques, en heures de pointe ou non, etc.).

La **composante «infrastructure»** n'est abordée dans le code de bonnes pratiques que dans la partie «Autorités compétentes»:

- «Toute exigence spécifique en matière d'infrastructure considérée comme nécessaire dans le cadre des essais, comme la signalisation routière, est à convenir avec le(s) gestionnaire(s) de voirie.»

Avant que les véhicules puissent être testés sur la **voie publique** ou dans d'autres lieux publics, les organisations doivent démontrer que les véhicules et/ou les technologies ont été préalablement et suffisamment testé(e)s sur des **routes fermées** ou des pistes d'essai. Ces essais doivent avoir donné des résultats satisfaisants pour permettre d'entreprendre des essais sur la voie publique ou dans d'autres lieux publics sans faire courir de risques supplémentaires aux usagers de la route.

Les systèmes de capteurs et de contrôle du véhicule doivent être suffisamment développés pour **réagir** de manière appropriée **à tous les types d'usagers de la route** susceptibles d'être rencontrés au cours de l'essai en question. Les organisations doivent accorder une attention particulière aux usagers de la route les plus vulnérables, tels que les personnes handicapées, les malvoyants et les malentendants, les piétons, les cyclistes (cyclomoteurs), les motocyclistes, les enfants et les cavaliers.

Si la situation l'exige (par exemple, en raison des conditions météorologiques, mais aussi **de l'infrastructure**), les conducteurs doivent être en mesure de reprendre le volant. La partie «Processus de transition entre le mode automatique et le mode manuel» ne traite pas des situations (et donc de l'infrastructure).

Il est fait état de l'importance que revêt la transition entre le mode manuel et le mode automatique pour la sécurité des essais de véhicules automatisés et de l'importance de la garantie de périodes transitoires minimales entre les modes manuel et automatique, avec un risque minimal, pour le processus de développement du véhicule et la mise en place des essais prévus. Le texte se termine par: «Il va de soi que cet aspect doit être développé et testé sur une piste d'essai fermée avant que des essais puissent être réalisés sur la voie publique ou en d'autres lieux publics.»

3.7 Convention de Genève

La Convention de Genève sur la circulation routière (Convention de Genève sur le trafic routier, 1949) est un traité international visant à faciliter la circulation routière internationale et à accroître la sécurité routière par l'adoption de règles de circulation uniformes. Elle contient des accords, entre autres, sur le code de la route, sur l'autorisation mutuelle par les parties signataires de véhicules provenant d'autres États signataires et sur les permis de conduire (inter)nationaux.

Le 14 juillet 2022, l'**article 34 bis** de la Convention de Vienne (Vienna Convention on Road Traffic, 2022), qui autorise la circulation des véhicules autonomes en Europe, est entré en vigueur. Cela pourrait accélérer la recherche une fois que les états membres l'auront intégré dans leur législation nationale. L'article en question autorise le conducteur à lâcher le volant dans le cadre de la conduite autonome de niveau SAE 3. Cependant, le conducteur doit garder les yeux sur la route et être capable de reprendre le contrôle du véhicule à tout moment. Plusieurs conditions doivent également être remplies: il doit y avoir une séparation physique entre les deux sens de circulation, la vitesse est limitée à 60 km/h et il ne doit pas y avoir de piétons ou de cyclistes sur la route¹⁸.

Drive pilot de Mercedes

En décembre 2021, Mercedes-Benz est devenu le premier constructeur automobile au monde à répondre aux exigences réglementaires strictes du règlement international UN 157 (Nations unies, 2021) pour un système de niveau 3 permettant une conduite automatisée sous conditions.

Cela permet au constructeur automobile de proposer cette fonctionnalité (conduite mains libres jusqu'à 60 km/h) sur le marché allemand, où l'utilisation de certaines fonctionnalités SAE L3 est autorisée sur plusieurs (portions d'autoroutes (13 191 km au total). Pour ce faire, le véhicule utilise de multiples capteurs.

En 2016, les **technologies de conduite automatisée** ont fait une percée avec l'entrée en vigueur d'un amendement à la Convention en matière de circulation routière qui autorise le transfert des tâches de conduite au véhicule, à condition que ces technologies soient conformes aux règlements des Nations unies sur les véhicules ou qu'elles puissent être neutralisées ou désactivées par le conducteur (50 years on, 2018).

¹⁸ Le 30 mai 2022, avant même l'entrée en vigueur de l'article 34 bis, il était déjà proposé de porter cette limitation de vitesse à 130 km/h si le véhicule est également capable de changer de voie en toute sécurité à des vitesses supérieures à 60 km/h (United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Inland Transport Committee, Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles, 2022).

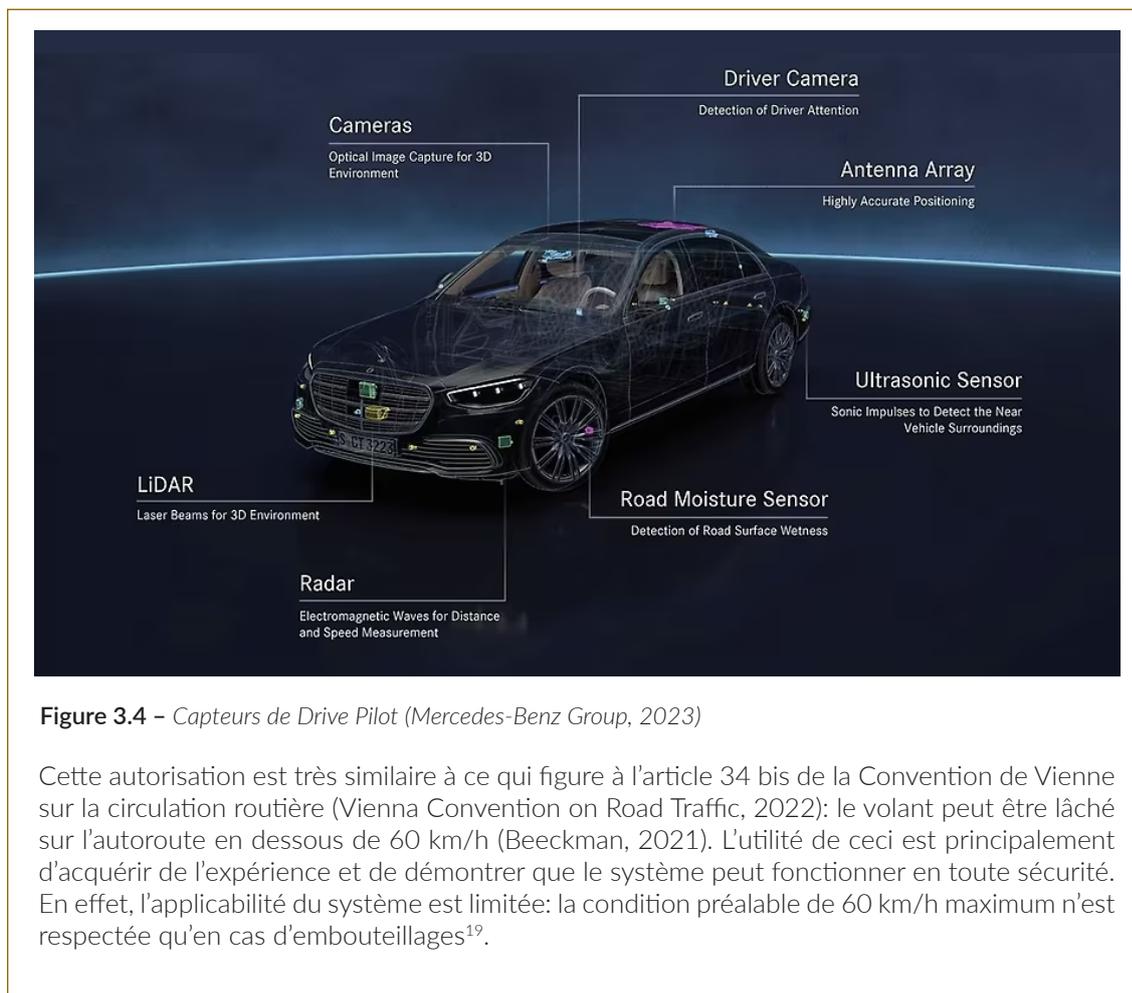


Figure 3.4 – Capteurs de Drive Pilot (Mercedes-Benz Group, 2023)

Cette autorisation est très similaire à ce qui figure à l'article 34 bis de la Convention de Vienne sur la circulation routière (Vienna Convention on Road Traffic, 2022): le volant peut être lâché sur l'autoroute en dessous de 60 km/h (Beeckman, 2021). L'utilité de ceci est principalement d'acquiescer de l'expérience et de démontrer que le système peut fonctionner en toute sécurité. En effet, l'applicabilité du système est limitée: la condition préalable de 60 km/h maximum n'est respectée qu'en cas d'embouteillages¹⁹.

3.8 Convention de Vienne sur la signalisation routière

La *Convention de Vienne sur la signalisation routière*, 1968, ratifiée par plus de 60 pays dans le monde (dont la Belgique), prescrit un **système harmonisé** de signalisation routière basé sur l'utilisation de formes, de couleurs et de symboles. Elle reprend également les exigences en matière de marquages routiers et définit les différents types de marquage et leurs couleurs.

Ces dernières années, de nombreux pays ont introduit de nouvelles règles de circulation et de nouveaux panneaux de signalisation. L'*Expert Group on Road Signs and Signals*²⁰ travaille à une mise à jour de la Convention de 1968, notamment pour éliminer, dans la mesure du possible, les divergences qui sont apparues systématiquement. Le traité évolue également pour répondre aux **nouveaux besoins en matière de sécurité routière**.

¹⁹ Dans des conditions normales (pas d'embouteillages, pas de travaux), la vitesse conseillée sur l'Autobahn est de 130 km/h, et la vitesse minimale y est de 90 km/h sur la voie centrale et de 110 km/h sur la voie de gauche, depuis 1978.

²⁰ Voir UNECE/Road Traffic Safety/Global Forum for Road Traffic Safety (WP.1)/Expert Group on Road Signs and Signals. <https://unece.org/transport/road-traffic-safety>

3.9 Que disent les chiffres?

Il n'est pas encore possible de tirer des conclusions complètes sur la base des statistiques, en raison du peu de données disponibles. Au fur et à mesure que des véhicules autonomes seront testés et contrôlés, d'autres chiffres seront disponibles. La comparaison de chiffres n'a de sens que si elle est contextualisée, par exemple en termes de progrès technologique.

Articles 2019/2020

Des chiffres tirés d'articles de 2020 (Petrovic, 2020; Wang et al., 2020) basés sur des données de 2014-2018 indiquent ce qui suit:

- les véhicules autonomes sont **plus souvent impliqués dans** des accidents que les véhicules non autonomes;
- la plupart des accidents se produisent de surcroît lorsque le véhicule autonome est en mode «automatique»;
- dans la plupart des accidents, la **cause n'était pas le véhicule autonome** mais l'autre usager de la route non automatisé (usager de la route vulnérable (VRU) ou un véhicule non automatisé);
- la **gravité des accidents** impliquant des véhicules autonomes est moindre par rapport à la moyenne;
- l'analyse du type de collision démontre qu'en moyenne, les véhicules autonomes sont davantage impliqués dans des **collisions arrière** (lorsque le véhicule non automatisé emboutit le véhicule automatisé);
 - l'explication réside peut-être dans le fait que les conducteurs sont trop peu familiarisés avec le comportement de conduite prudent d'un véhicule autonome (respect total du code de la route);
- les véhicules automatisés sont moins impliqués dans des **collisions latérales ou des accidents impliquant des piétons**. Les véhicules autonomes sont plus susceptibles d'aborder avec prudence les situations de conflit potentiel et seraient donc mieux à même d'éviter ce type d'accident.

Étude en Chine

Une **étude chinoise** réalisée en 2022 a compilé différentes données d'accidents avec des statistiques plus récentes (Ren et al., 2022). De multiples facteurs influençant la gravité des accidents ont été étudiés (composantes environnementales, composantes routières et composantes liées au véhicule).

- La présence de **pistes cyclables** augmente la probabilité d'accidents de gravité élevée (en raison de la gravité moyenne plus élevée des accidents impliquant des cyclistes) par rapport à une route où ne circule que du trafic motorisé. D'autre part, les capteurs et algorithmes sophistiqués des véhicules autonomes semblent plus à même de détecter les cyclistes à temps que les conducteurs humains des véhicules conventionnels, rendant ainsi (l'augmentation de) la probabilité d'un accident entre un cycliste et un véhicule autonome plus faible qu'entre un cycliste et un véhicule conventionnel.
- La **pluie, l'occupation mixte de l'espace et la conduite de nuit** entraîneraient des blessures graves en «mode autonome», mais leurs effets ne sont pas significatifs en «mode de conduite conventionnel».
- La **multiplication des voies** augmenterait le risque d'accident grave en mode conventionnel en raison des mauvaises décisions prises par les conducteurs humains. En effet, les véhicules

autonomes peuvent prévenir efficacement de telles erreurs.

- La multiplication des voies augmente le risque d'accident grave, car elle est généralement synonyme de vitesse plus élevée.
- Les avantages des véhicules autonomes, tels que l'évitement des erreurs de conduite et une vitesse plus appropriée, leur permettent d'être plus performants que les conducteurs humains dans un scénario à plusieurs voies.
- La probabilité d'un accident grave sur les routes dotées d'un **passage pour piétons** des deux côtés est supérieure de 27 % par rapport à une chaussée sans passage pour piétons ou une route dotée d'un seul passage pour piétons sur le côté.
 - De nombreuses études sur l'interaction entre les piétons et les véhicules autonomes ont montré que la capacité des véhicules autonomes à détecter, comprendre et répondre de manière appropriée aux réactions des piétons n'est pas encore optimale.
 - En l'absence d'une communication entre le piéton et le conducteur (par exemple, contact visuel), le comportement du piéton devient plus imprévisible.
- L'impact du **daily vehicle flow (DVF)** sur la gravité des accidents en mode de conduite autonome était plus faible qu'en mode conventionnel.
 - Les véhicules autonomes équipés de dispositifs de détection avancés peuvent percevoir une plus grande distance et sont plus à même que les humains de reconnaître des cibles spécifiques (par exemple, un visage, un texte, etc.).

Étude PARTS

Une **analyse d'accidents liés aux ADAS** a également été réalisée dans le cadre de PARTS (Partnership for Analytics Research in Traffic Safety [PARTS], 2022).

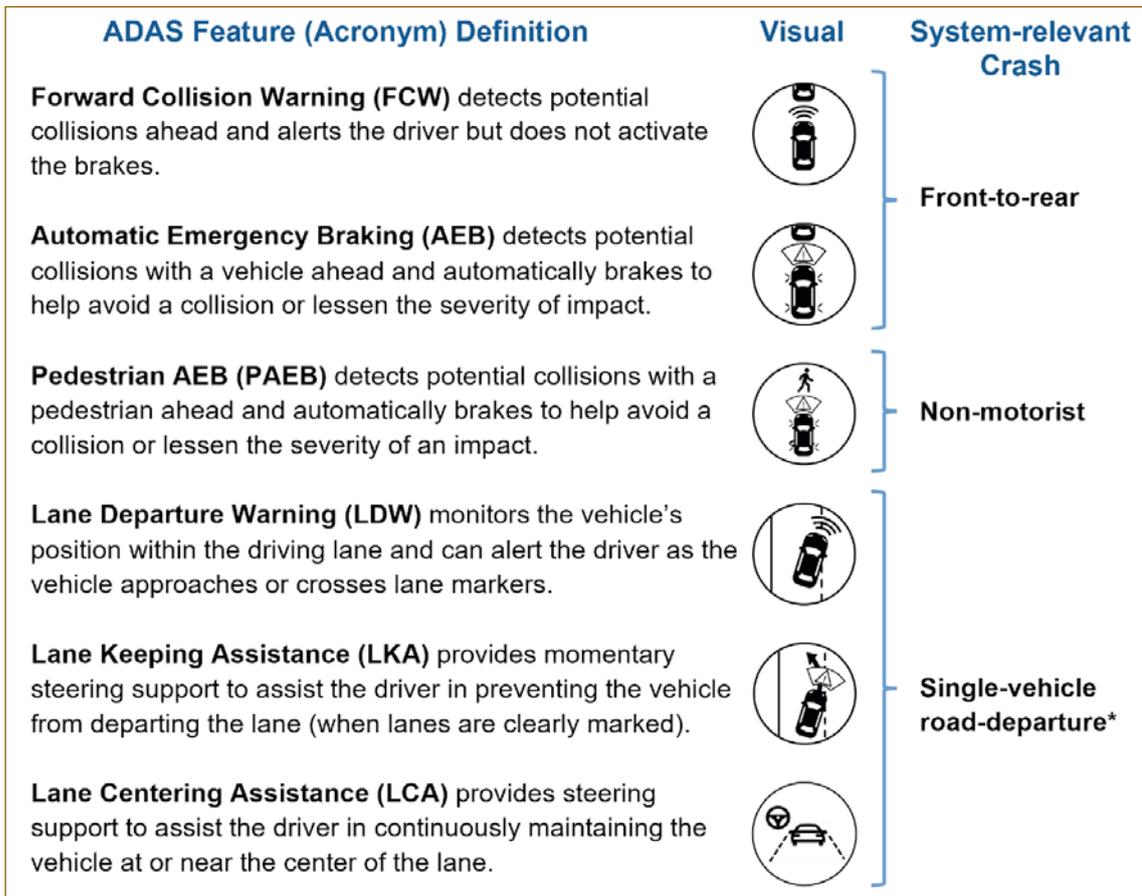


Figure 3.5 – ADAS étudiés dans l'étude PARTS (PARTS, 2022)

En particulier, les véhicules équipés des systèmes FCW (**Forward Collision Warning**) + AEB (**Automatic Emergency Braking**) ont montré une réduction substantielle de tous les accidents, de l'ordre de la moitié. Les réductions pour les accidents corporels étaient légèrement plus élevées que pour l'ensemble des accidents. Pour les accidents graves uniquement, les systèmes FCW + AEB permettent encore une réduction estimée à 42 %. Le FCW à lui seul réduit encore le nombre d'accidents graves de 21 %.

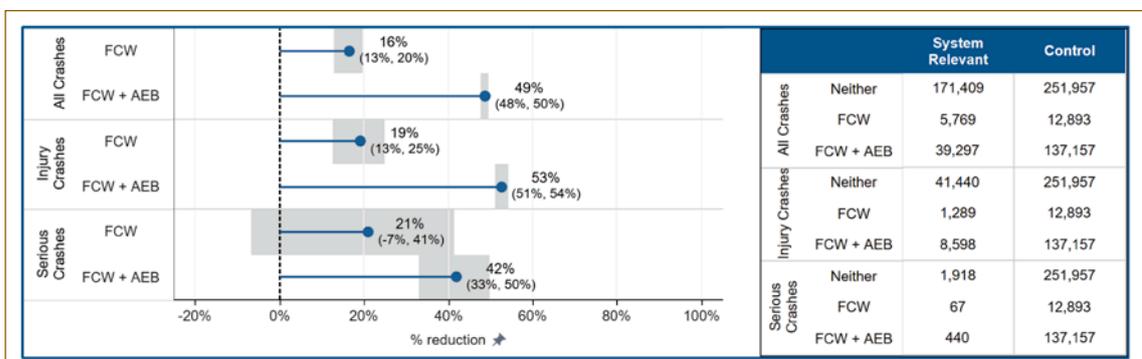


Figure 3.6 – Gains en termes de sécurité grâce aux systèmes FCW et AEB (PARTS, 2022)

Cette étude PARTS n'a pas trouvé de résultat statistiquement significatif pour le *Pedestrian Automatic Emergency Braking*.

Combinées au LWD (*Lane Departure Warning*), les fonctionnalités ADAS de gestion active de la voie (LKA – *Lane Keeping Assistance* et LCA – *Lane Centering Assistance*) ont réduit d'environ un dixième la probabilité de survenance de tous les accidents.

Deux **organisations scientifiques américaines**, le *Highway Loss Data Institute* (HLDI) et l'*Insurance Institute for Highway Safety* (IIHS), ont étudié conjointement les avantages réels des technologies d'évitement des collisions (*Insurance Institute for Highway Safety* [IIHS] & *Highway Loss Data Institute* [HLDI], 2023).

Elles ont observé des gains de sécurité relatifs importants avec le freinage automatique en marche arrière et l'alerte de collision avant. Logiquement, elles soutiennent que les technologies ne peuvent être efficaces que si elles sont utilisées, et que les réactions appropriées des conducteurs et l'acceptation des technologies sont cruciales pour leur succès.

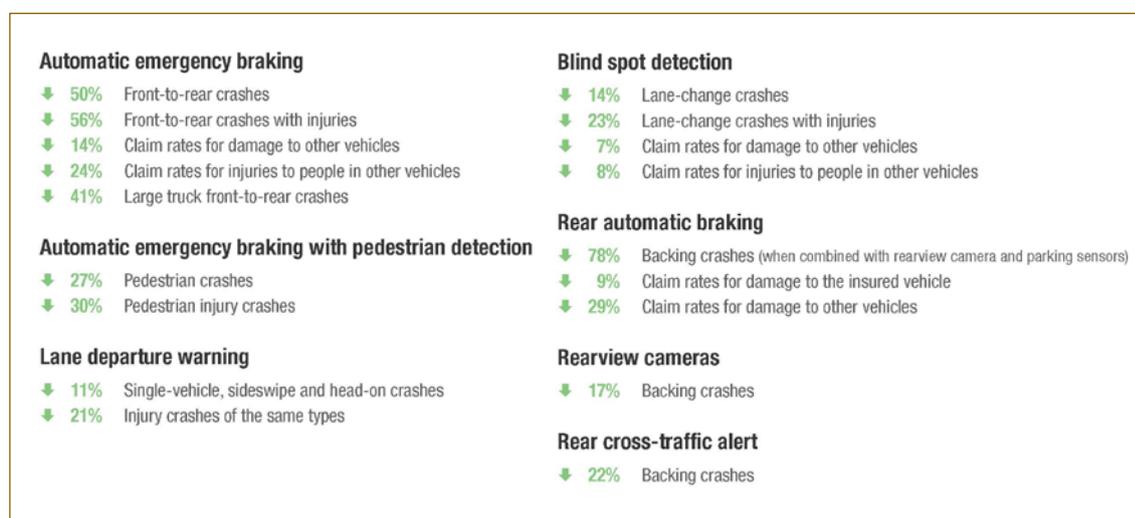


Figure 3.7 – Real world benefits of crash avoidance technologies (IIHS & HLDI, 2023)

Toutefois, l'IIHS affirme que les données relatives aux accidents n'ont pas montré d'avantages similaires pour les **systèmes d'automatisation partielle de niveau 2** que l'on rencontre sur le marché. Au contraire, une étude de l'IIHS a montré que certains concepts peuvent accroître les dangers de la route car les conducteurs ont tendance à relâcher leur attention au volant (Drivers let their focus slip, 2020; IIHS president, 2023).

Enfin, **une étude de simulation française (Pilet et al, 2021)** montre que l'on peut s'attendre à une réduction d'environ 60 % des accidents corporels et des accidents mortels si l'on remplace tous les véhicules légers sur les routes françaises par des VA. Il existe des différences en fonction de l'utilisateur actif impliqué: l'effet est plus faible pour les accidents entre véhicules légers et cyclistes ou deux-roues motorisés et plus élevé pour les accidents entre véhicules légers.

Les tableaux ci-dessous établissent une distinction en fonction du **niveau de substitution** par des véhicules autonomes (10 %, 50 %, 100 %). Deux valeurs sont données dans chaque cas: en cas de désaccord entre les experts, l'étude donne des moyennes de taux faibles d'accidents potentiellement évités (réponse défavorable des experts, UF) et plus élevés (réponse favorable des experts, F).

Replacement level	Confidence interval	Crash configurations				
		LV/Pedestrian (%)	LV/Cyclist (%)	LV/M2W (%)	LV/LV (%)	LV/Truck (%)
10% AV	UF mean	6.6	3.2	2.7	8.5	4.3
	F mean	6.8	4.8	7.3	10.9	
50% AV	UF mean	33.0	15.5	13.9	40.0	21.5
	F mean	34.1	23.9	37.4	48.5	
100% AV	UF mean	66.2	31.2	27.5	72.6	43.7
	F mean	68.5	47.7	75.0	82.6	
	UC UF	14.5	20.8	12.6	15.1	20.14
	UC F	14.5	24.5	13.1	14.3	

AV, Autonomous Vehicle; LV, Light Vehicle; M2W, Motorized-Two-Wheeler; UF, Unfavourable; F, Favourable; UC, Uncovered
 *% on 100% injury crashes within each configuration

Tableau 3.1 – Taux moyen d'accidents corporels évités par configuration (Pilet et al., 2021)

Replacement level	Confidence interval	Crash configurations				
		LV/Pedestrian (%)	LV/Cyclist (%)	LV/M2W (%)	LV/LV (%)	LV/Truck (%)
10% AV	UF mean	6.4	3.4	2.8	10.4	6.4
	F mean	7.0	4.2	7.4	11.7	
50% AV	UF mean	31.8	15.4	13.9	47.8	31.9
	F mean	34.8	19.6	37.1	53.0	
100% AV	UF mean	63.3	30.8	27.8	85.2	63.8
	F mean	69.3	39.6	74.0	92.1	
	UC UF	17.5	7.5	2.1	2.5	8.80
	UC F					

AV, Autonomous Vehicle; LV, Light Vehicle; M2W, Motorized-Two-Wheeler; UF, Unfavourable; F, Favourable; (here results are the same for F and UF); UC, Uncovered
 *% on 100% fatal crashes within each configuration

Tableau 3.2 – Taux moyen d'accidents mortels évités par configuration (Pilet et al., 2021)

Chapitre 4

Objectifs de la politique de sécurité routière

Nous avons vu au chapitre précédent que les causes des accidents peuvent être multiples et qu'il s'agit souvent d'une combinaison de facteurs. Les véhicules sont de plus en plus équipés de systèmes d'aide à la conduite (ADAS). À terme, cela pourrait aboutir au remplacement du conducteur par un système de conduite autonome (ADS).

Cependant, il faudra du temps avant que le changement de système vers la mobilité autonome puisse être pleinement réalisé et que les gains de sécurité routière présumés se concrétisent. Dans les documents politiques, qui présentent des objectifs à plus long terme, il faudra passer progressivement à des véhicules connectés et, dans un deuxième temps, à des véhicules entièrement autonomes. Dans des situations où les systèmes de conduite autonome ne sont pas encore suffisamment fiables, le *remote driving* peut – pour autant qu'une connexion fiable soit disponible – être une solution intermédiaire²¹.

Toutefois, le déploiement des véhicules autonomes ne peut être envisagé indépendamment du système de transport dans son ensemble. Aujourd'hui, pour comprendre les causes des accidents de la route, il faut prendre en compte l'ensemble du système.

Le terme utilisé dans les documents politiques pour l'**approche intégrale** est **Safe System Approach**, là où on parlait avant de *Human Error Approach*. Dans l'approche *Safe System*, il y a une harmonisation de la fonction, de la conception, de l'aménagement et des limitations de vitesse des routes de sorte que l'erreur humaine ne cause pas de décès ou de blessures graves. L'approche est basée sur la responsabilité partagée.

²¹ Le *remote driving* fait partie de ce que l'on appelle la «téléopération». La téléopération est le terme générique qui englobe la surveillance, l'assistance et le contrôle des véhicules autonomes par un téléopérateur extérieur (How does remote driving work?, 2022)

Safe System Approach (ITF, 2016)

La *Safe System Approach* réunit quatre principes qui guident la réflexion et la politique pour orienter la conception et le fonctionnement du réseau routier de manière à éviter les décès et les blessures graves (figure 4.1).

Quatre principes sont à la base d'un système sûr dans le trafic routier:

1. Les gens commettent des erreurs susceptibles d'entraîner des accidents de la route.
2. Le corps humain a une capacité physique limitée à tolérer les forces d'impact avant qu'une lésion corporelle ne se produise.
3. Il existe une responsabilité partagée entre ceux qui conçoivent, construisent, gèrent et utilisent les routes et les véhicules et ceux qui fournissent des soins post-accident pour éviter que les accidents n'entraînent des blessures graves ou mortelles.
4. Toutes les composantes du système doivent être renforcées pour multiplier leurs effets. En cas de défaillance d'une composante, les usagers de la route sont toujours protégés.

Pour que le système soit sûr, il faut comprendre et gérer de manière holistique l'interaction complexe et dynamique entre les vitesses, les véhicules, l'infrastructure routière et le comportement des usagers de la route. Contrairement à certaines approches, un *Safe System* n'accepte pas en principe de compromis entre la sécurité routière et d'autres priorités, compromis qui considérerait les tués et les blessés graves sur la route comme «un prix à payer».

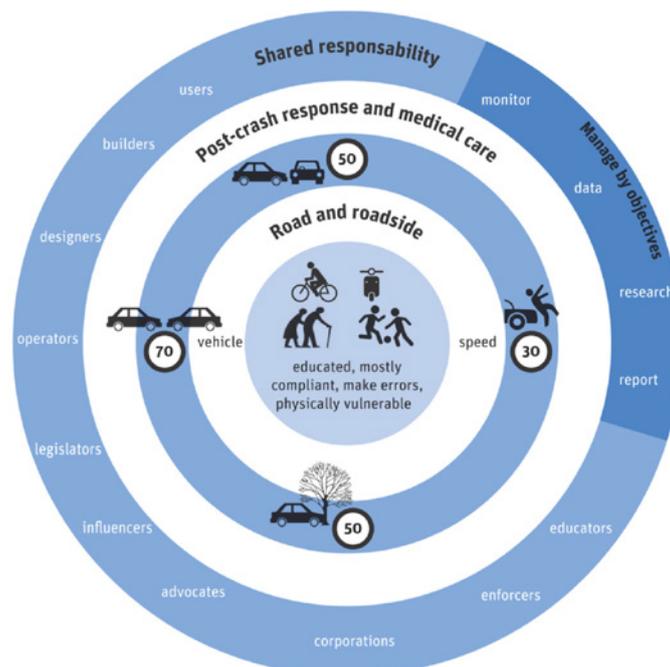


Figure 4.1 – Représentation graphique de la Safe System Approach (ITF, 2016)

Le centre de la figure 4.1 représente des usagers de la route qui requièrent une attention particulière parce qu'ils sont physiquement vulnérables et parce qu'il faut supposer que l'erreur est humaine.

Le deuxième cercle du modèle reflète la relation entre la vitesse, les routes et accotements et les véhicules en encourageant les usagers à se comporter de manière sûre dans le trafic et à prendre des mesures pour éviter qu'un accident n'entraîne des blessures graves. Ces deux résultats sont obtenus grâce à l'interaction de la conception physique, de l'aménagement des routes et des bords de route, des conditions d'utilisation et des véhicules, afin de permettre des vitesses de circulation sûres, une utilisation sûre des véhicules et des résultats sûrs. Les véhicules *Safe System* utilisent des **technologies actives** (par exemple des systèmes intelligents d'assistance à la vitesse ou des systèmes visant à éviter les accidents) pour aider le conducteur à prendre des mesures (ou intervenir s'il ne le fait pas), ainsi qu'une protection secondaire contre les collisions pour les occupants et les personnes à l'extérieur du véhicule.

Le troisième cercle représente le deuxième principe du *Safe System*, selon lequel le corps humain a une capacité physique limitée à tolérer les forces d'impact. Un système sûr tente de réduire le risque de lésions graves en anticipant les causes possibles et en contrôlant les trois composantes du deuxième cercle et leurs interactions afin d'éviter les collisions lorsque les forces d'impact dépassent des niveaux dangereux.

Le quatrième cercle du diagramme du *Safe System* concerne les soins médicaux après un accident. L'état de santé des victimes d'accidents dépend de la capacité du système d'aide médicale d'urgence à localiser rapidement et à fournir aux secouristes l'assistance médicale nécessaire pour stabiliser la victime, puis la rediriger vers les services d'urgence appropriés.

Ensemble, les deuxième et quatrième cercles illustrent le troisième principe d'un système sûr, à savoir que toutes les composantes du système doivent être renforcées pour multiplier leurs effets; et si une composante est défaillante, les usagers de la route sont toujours protégés.

Le cinquième cercle, le plus à l'extérieur du diagramme, illustre le quatrième principe de la responsabilité partagée pour un système sûr: il existe une responsabilité partagée entre ceux qui conçoivent, construisent, gèrent et utilisent les routes et les véhicules et ceux qui les entretiennent afin de prévenir les accidents entraînant des blessures graves ou mortelles.

Plus concrètement dans le cas d'un **accident où un véhicule rate un virage**, le conducteur peut avoir fait un excès de vitesse parce que la configuration de la route l'y a incité.

- La cause (vitesse excessive) n'est donc pas seulement imputable au conducteur, mais aussi à l'environnement. L'approche **Safe System** tient compte du fait que les conducteurs humains commettent des erreurs.
- Des mesures liées aux véhicules (par exemple, ISA/LKA) et à l'infrastructure (par exemple, une configuration adaptée de la route) devraient réduire le risque d'erreurs (excès de vitesse). Si un accident survient malgré ces mesures, d'autres interventions (accotement qui pardonne) peuvent contribuer à atténuer les conséquences de l'accident.
- Même dans cette approche intégrale, la contribution du facteur **humain** reste importante. Grâce aux nouvelles technologies, on s'efforce de réduire encore cette contribution ou du moins de compenser quelque peu l'inconstance du comportement humain.
- Actuellement, ce sont principalement les véhicules qui sont équipés de **nouvelles technologies**. À l'avenir, l'environnement sera lui aussi équipé d'une manière ou d'une autre d'une nouvelle technologie permettant aux différentes composantes du système de collaborer de la manière la plus sûre et la plus fiable possible.

4.1 Vers zéro tué sur les routes

Les documents politiques mentionnent de plus en plus souvent l'objectif ultime de **zéro tué sur les routes à l'horizon 2050**. Il s'agit d'une rupture avec le passé, lorsque les objectifs fixés «acceptaient» un certain nombre de décès dus aux accidents de la route, un peu comme un dommage collatéral du système de trafic. L'idée est désormais que le système de circulation peut et doit être organisé de manière à ce qu'il n'y ait plus de tués sur les routes.

Une telle politique a été lancée dans des pays qui, très tôt, ont fait de la sécurité routière une priorité absolue. La politique suédoise, dont le titre **Vision Zero** laissant peu de place à l'imagination remonte à 1994, est la première et principale source d'inspiration des politiques de sécurité routière de nombreux pays et d'organisations de coordination telles que l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), les Nations unies (NU) et l'Union européenne (UE).

4.2 L'Organisation mondiale de la Santé et les Nations unies

En septembre 2020, l'Assemblée générale des Nations unies a adopté la résolution A/RES/74/299 «Améliorer la sécurité routière mondiale» (UN General Assembly, 2020), proclamant la décennie d'action pour la sécurité routière 2021-2030, avec l'objectif ambitieux d'**éviter au moins 50 % des tués et des blessés sur la route d'ici 2030**.

L'OMS et les commissions régionales des Nations unies, en collaboration avec d'autres partenaires de la coopération des Nations unies en matière de sécurité routière, ont élaboré un plan mondial pour la décennie d'action.

Le plan, dévoilé en octobre 2021, comprend une section sur les nouvelles technologies, intitulée «*Adapting technologies to the Safe System*» (WHO & UN Regional Commissions, 2021). Les éléments qui y sont cités sont assez généraux et s'appuient fortement sur la technologie automobile et les systèmes de sécurité utilisés.

Le raisonnement est que la technologie automobile évolue à un rythme sans précédent.

- Bien que le **potentiel des technologies émergentes** fasse l'objet de débats, les systèmes avancés d'aide à la conduite, notamment le contrôle électronique de la stabilité, les alertes de changement de voie et le freinage d'urgence automatique, sauvent déjà des vies dans de nombreux pays. Les futures fonctionnalités des véhicules automatisés sont en cours de développement et pourraient en sauver encore davantage.
- La **communication V2V et V2I** peut également contribuer à une mobilité plus sûre et plus durable. Cette possibilité peut s'avérer particulièrement bénéfique pour la sécurité des piétons, des cyclistes et des deux-roues motorisés. Une technologie similaire peut également permettre de planifier les itinéraires afin de réduire les embouteillages et les émissions et d'optimiser la sécurité.
- Encourager le développement de technologies de sécurité adaptées à un large éventail d'environnements fait partie du défi.
- L'autre partie concerne la gestion de la révolution technologique et son impact potentiel – qu'il soit positif ou négatif – sur la sécurité routière. La connectivité croissante et d'autres technologies mobiles créent de **nouvelles opportunités et de nouveaux défis** qui nécessitent une évaluation et une mise à jour des politiques, des réglementations et du code de la route.

Une esquisse de ce qui est important (notamment des normes minimales pour les caractéristiques de base) est donnée spécifiquement en fonction de l'**infrastructure**. Ce n'est qu'à la fin de la section sur les nouvelles technologies (WHO & UN Regional Commissions, 2021) que l'on aborde les aspects de la sécurité routière des véhicules autonomes et de l'infrastructure.

- Des normes techniques minimales d'infrastructure sont obligatoires pour améliorer la sécurité des piétons, des cyclistes, des motocyclistes, des occupants des véhicules, des usagers des transports en commun, des transporteurs de fret et des autres usagers de la mobilité.
- Ces normes devraient inclure des caractéristiques de base, telles qu'une signalisation verticale et horizontale (panneaux de signalisation et marquages routiers), des trottoirs, des passages pour piétons sécurisés, des pistes cyclables, des voies réservées aux motos, des voies de bus, des accotements sécurisés, une séparation des différents modes de circulation, une séparation médiane du trafic à grande vitesse, la conception des carrefours et une gestion de la vitesse en fonction de l'emplacement, de l'aménagement souhaité et du type de trafic.
- Il convient de **préciser** les **besoins en infrastructures physiques et numériques** pour les technologies avancées d'aide à la conduite et les **véhicules autonomes**.

4.3 Politique de l'Union européenne

L'Union européenne (résolution du Parlement européen P9_TA[2021]0407, 2021) intègre de nombreuses considérations dans sa politique de sécurité routière, notamment:

- qu'il existe de nouveaux défis et tendances dans le domaine de l'**automatisation** qui pourraient avoir des implications considérables pour la sécurité routière;
- qu'il faut s'attaquer au phénomène croissant de la distraction causée par les appareils mobiles;
- que dans un avenir proche, la présence de véhicules dotés d'une large gamme de composantes **automatisées/connectées** et de véhicules traditionnels dans un trafic mixte constituera un nouveau risque, en particulier pour les usagers de la route vulnérables tels que les motocyclistes, les cyclistes et les piétons;
- que les avancées technologiques, la connectivité, l'automatisation et l'économie du partage offrent de nouvelles possibilités en matière de sécurité routière et de lutte contre la congestion, en particulier dans les zones urbaines;
- que le développement de synergies entre les mesures de sécurité et de durabilité et la poursuite du transfert modal vers des modes de transports en commun durables et la mobilité active peuvent réduire les émissions de CO₂, améliorer la qualité de l'air et promouvoir le développement de modes de vie plus actifs et plus sains.

Ce type de considérations politiques a conduit à l'élaboration du cadre politique de l'UE en matière de sécurité routière pour la période 2021-2030. Il s'agit notamment des **objectifs** attrayants suivants:

- parvenir à un nombre de tués et de blessés graves sur les routes de l'UE **proche de zéro** d'ici 2050 au plus tard (*Vision Zero*);
- à moyen terme: réduire de 50 % le nombre de tués et de blessés graves d'ici 2030 (par rapport à 2020);
- fixer des objectifs de résultats pour 2023 au plus tard en utilisant la *Safe System Approach* et une méthodologie harmonisée à l'échelle de l'UE pour les *Key Performance Indicators* (KPI).

Le même cadre politique formule également un certain nombre de **demandes** qui peuvent être pertinentes pour les véhicules autonomes, comme:

- Demander à la Commission et aux états membres d'accélérer les travaux sur les **spécifications de l'UE relatives à la performance des panneaux de signalisation et des marquages routiers** afin d'ouvrir la voie à une plus grande automatisation des véhicules²².
- Le Parlement rappelle l'importance de la performance des panneaux de signalisation et des marquages, y compris leur emplacement, leur visibilité et leur rétro réflexion, notamment pour garantir l'efficacité des systèmes d'aide à la conduite comme l'adaptation intelligente de la vitesse et l'assistance au maintien de la voie.
- Le Parlement souligne l'importance d'utiliser l'infrastructure pour construire des routes lisibles, explicites, qui **imposent un comportement correct** et «qui pardonnent» pour la sécurité de l'ensemble des usagers de la route, en particulier dans les zones dangereuses ou dans des zones caractérisées par une forte présence d'usagers de la route vulnérables.
- Engager la Commission à proposer un nouveau **cadre réglementaire harmonisé pour les véhicules automatisés** pour s'assurer, grâce à des contrôles poussés, y compris dans des conditions de conduite réelles, que les véhicules automatisés fonctionneront dans des conditions de sécurité maximales pour leurs conducteurs et les autres usagers de la route, notamment en ce qui concerne les interactions avec les véhicules traditionnels et les autres usagers de la route.
- Demander dans l'intervalle à la Commission d'évaluer les **risques** pour la sécurité routière des **systèmes** avancés **d'aide à la conduite** actuellement disponibles, tels que la confiance excessive et la distraction du conducteur.
- Inviter la Commission à envisager l'introduction d'une obligation d'équiper les appareils mobiles et électroniques des conducteurs d'un «mode de conduite sûr» et l'installation par défaut d'autres outils technologiques pour réduire la distraction au volant.
- Le Parlement met en exergue le fait que des facteurs extérieurs et des tendances émergentes au sein de la société posent des défis sans précédent à la sécurité routière dans le cadre de la stratégie de l'Union à l'horizon 2030 et au-delà.
- Il relève que l'UE devrait préparer la voie pour permettre **un déploiement en temps opportun de véhicules connectés et automatisés** et devrait évaluer les risques lorsque ces véhicules côtoient des véhicules traditionnels et des usagers vulnérables de la route.
- Il invite la Commission à évaluer pleinement l'incidence de véhicules toujours plus automatisés sur la circulation en zone urbaine et l'environnement.
- Il souligne qu'une **amélioration des infrastructures** pourrait s'avérer nécessaire pour garantir la circulation en toute sécurité des véhicules automatisés et semi-automatisés, tout en renforçant la sécurité pour les véhicules conventionnels, ce qui serait dans l'intérêt de l'ensemble des usagers de la route.

²² EC Expert Group on Road Infrastructure Safety (EGRIS): <https://ec.europa.eu/transparency/expert-groups-register/screen/expert-groups/consult?lang=en&do=groupDetail.groupDetail&groupID=3686>

4.4 Belgique: All for zero²³

Le plan interfédéral *All for zero* (*All for zero*, 2021) est la vision commune et l'engagement des gouvernements aux niveaux régional et fédéral à prendre des mesures en matière de sécurité routière afin de **réduire à zéro le nombre de tués sur les routes**. Cette vision partagée s'appuie sur les objectifs et les plans d'action régionaux et fédéraux.

	Valeur actuelle (2019)	Objectif 2030	Objectif 2050
Nombre de tués sur les routes	644	< 320	0
Nombre de blessés graves (MAIS3+)	3600	< 1800	< 360

Figure 4.2 – Objectifs pour 2030 et 2050 en Belgique selon le plan interfédéral *All for zero* (*All for zero*, 2021)²⁴

Outre les préoccupations classiques, ce plan identifie également de «**nouveaux défis** en matière de sécurité routière». Ainsi, on constate que la question de la sécurité routière des véhicules autonomes se limite à un problème de vigilance, de risque de défaillance des systèmes et de cybersécurité. Cela s'exprime de la manière suivante: «l'**automatisation croissante de certaines tâches de conduite**, qui peut entraîner une baisse de la vigilance; à terme, également la question de la défaillance des systèmes et de la cybersécurité».

Il est également fait mention des **possibilités offertes par les nouvelles technologies**, avec l'indication que «l'évolution vers des routes 'intelligentes' (lisibles par des véhicules automatisés), des systèmes de transport intelligents (STI) et la *Smart Mobility* peuvent contribuer à accroître la sécurité routière».

Dans le cadre de l'approche *Safe System*, les différents gouvernements s'engagent à travailler à la réalisation des dix **objectifs généraux** dans le cadre de leurs compétences.

²³ Vision commune interfédérale «All for zero: une vision commune de la sécurité routière en Belgique» (États généraux 2021, 2021)

²⁴ MAIS: Maximum Abbreviated Injury Scale: The Abbreviated Injury Scale (AIS) severity score is an ordinal scale of 1 to 6 (1 indicating a minor injury and 6 being maximal). A casualty that sustains an injury with a score of 3 or higher on the AIS is classified as clinically seriously injured (MAIS3+).

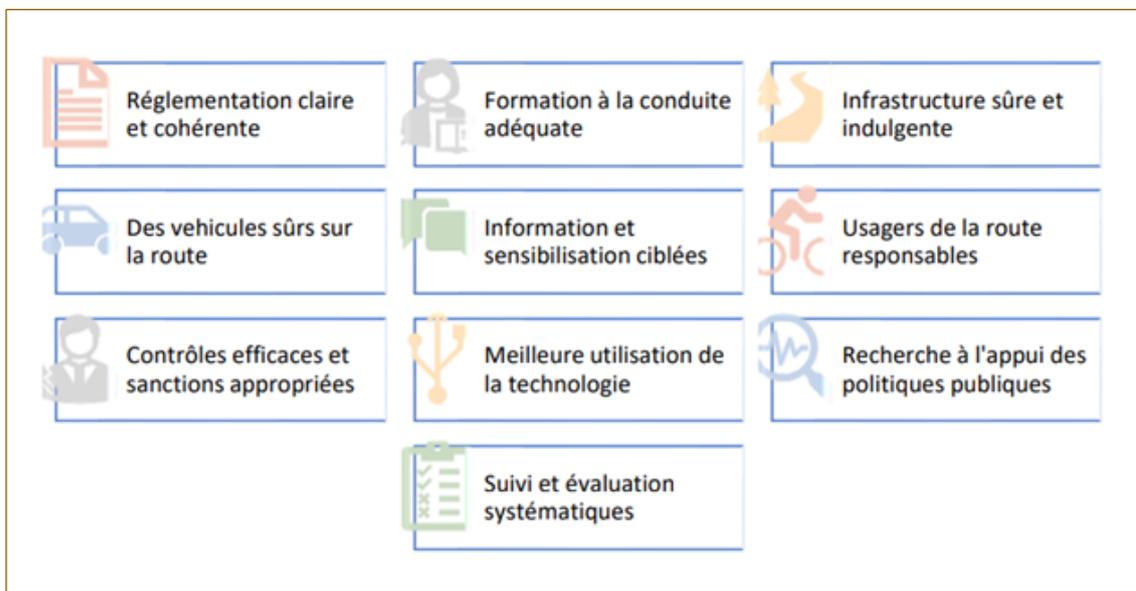


Figure 4.3 – Dix objectifs généraux du plan inter fédéral All for zero (All for zero, 2021)

Il devient évident que si certains éléments de l'évolution vers les **véhicules autonomes** s'inscrivent bien dans les objectifs généraux de *All for zero*, la mise en œuvre concrète de ces derniers devrait donc relever principalement des Régions²⁵.

²⁵ Avec comme cadre le code de bonnes pratiques du SPF Mobilité et Transports pour les essais de véhicules autonomes (S3) (Federale Overheidsdienst Mobiliteit & Vervoer [FOD Mobiliteit & Vervoer], 2016)

4.5 Réglementation

Dans la *Roadmap for the deployment of automated driving in the EU* (ACEA, 2019b), l'ACEA (*Association de Constructeurs Européens d'Automobiles*)²⁶ décrit ce qu'elle estime être des étapes pertinentes et encore nécessaires pour le déploiement des véhicules autonomes. Outre les évolutions techniques encore nécessaires et les mesures visant à uniformiser davantage les infrastructures, il s'agit également de réglementations internationales, européennes et nationales disparates, notamment en ce qui concerne la fonctionnalité des véhicules, la cybersécurité, les règles relatives aux temps de conduite et de repos, mais aussi le code de la route, la réglementation relative à l'infrastructure et la sécurité routière.

Le chapitre 5 de *Connected & Autonomous Vehicles et infrastructure routière - Etat des lieux et prospective* (Redant & Van Geelen, 2021) énumère la réglementation pertinente pour le déploiement des systèmes de transport intelligents et des véhicules autonomes. Les aspects liés à l'infrastructure sont les suivants:

- Viser un lien entre l'infrastructure routière et les véhicules, notamment par le biais d'accords sur l'échange de données (Directive 2010/40/UE, 2010 et Règlement délégué 2022/670, 2022).
- Le Règlement délégué (EU) 2015/962, 2015 (*Real Time Traffic Information – RTTI*) fait une distinction entre les informations routières statiques (limitation de vitesse, tracé de la route, restrictions pour certains types de véhicule, etc.), les informations routières dynamiques (travaux routiers, accidents, chaussée dégradée, etc.) et les informations sur la circulation (flux, etc.).
- Le Règlement délégué n° 886/2013, 2013 (*Safety Related Traffic Information – SRTI*) prévoit la communication d'un certain nombre de circonstances ou d'événements qui compromettent la sécurité routière.
- La directive (UE) 2019/1936, 2019 (*gestion des infrastructures routières – RISM*) demande qu'une attention particulière soit accordée à la reconnaissance des marquages routiers et des panneaux de signalisation, à la fois pour les conducteurs humains et pour les systèmes automatisés. Suite à la directive, l'opportunité de recommandations européennes sur la visibilité de ce type d'équipement est également examinée.
- Le règlement (UE) 2019/2144, 2019 traite de l'homologation des nouveaux véhicules. Conformément à ce règlement, les systèmes qui aident le conducteur dans sa tâche de conduite doivent être activés par défaut. Néanmoins, le règlement autorise de **désactiver** (manuellement ou automatiquement) ces systèmes si l'infrastructure disponible n'est pas suffisante pour en permettre le fonctionnement fiable. Pour l'ISA en particulier, le règlement indique que les informations sur la vitesse utilisées dans le véhicule peuvent provenir d'observations de l'**infrastructure** ou d'autres sources de données. Entre-temps, l'expérience a montré que de simples panneaux de signalisation ne suffisent pas à assurer le fonctionnement fiable des systèmes ISA (ITS.be, 2022).

²⁶ De *European Automobile Manufacturers' Association* (ACEA), réunit les 16 principaux constructeurs de voitures, de camions, de camionnettes et d'autobus en Europe. <https://www.acea.auto/about-acea/>



Chapitre 5

Le rôle de l'infrastructure dans les aspects de sécurité routière des véhicules autonomes

Au chapitre 1, nous avons abordé les différents **niveaux SAE** de la conduite autonome. Les niveaux inférieurs concernent les systèmes d'aide à la conduite (ADAS), tandis que les niveaux supérieurs concernent la conduite autonome (ADS). Cette distinction est importante pour comprendre les aspects de sécurité routière de la conduite semi-autonome et de la conduite entièrement autonome. Les fonctionnalités d'aide à la conduite (ADAS), qui aboutissent finalement à la conduite autonome (ADS), peuvent contribuer à la sécurité routière.

L'évolution technologique se fait à une vitesse fulgurante. Les constructeurs automobiles et les concepteurs de systèmes d'aide à la conduite réussissent de mieux en mieux à intégrer leurs systèmes dans les véhicules. Les capteurs deviennent de plus en plus fiables, de moins en moins chers et de plus en plus facilement disponibles, ce qui permet de les intégrer plus largement dans les nouveaux modèles de véhicules. Les adaptations spéciales de l'infrastructure semblent donc être de moins en moins une **condition impérative** pour le déploiement des véhicules autonomes. Néanmoins, tout comme pour les véhicules conventionnels avec des conducteurs humains, l'infrastructure continue à **contribuer** au bon fonctionnement et à une circulation fluide, confortable et sûre, même pour les véhicules avancés.

5.1 Connectivité, CCAM, Communication

Outre le développement de systèmes de détection et l'amélioration des algorithmes de décision, les experts attendent beaucoup de l'ajout de **connectivité** aux voitures (entre les véhicules et entre les véhicules et l'infrastructure).

Même les meilleurs capteurs actuels ne parviennent à voir devant eux qu'à une distance maximale de 250 m. Sur autoroute à une vitesse de 120 km/h, les situations visibles peuvent ainsi être détectées en 7 à 8 s. Permettre aux véhicules de recevoir également des informations en temps réel d'autres véhicules ou de l'infrastructure routière et utiliser ces informations comme source de données pour les systèmes d'aide à la conduite permet d'agir plus rapidement (en informant le conducteur ou en intervenant activement sur le véhicule). L'infrastructure routière et les usagers de la route deviennent alors, en quelque sorte, des **capteurs à distance** qui informent les autres usagers de la route et dont les informations peuvent être utilisées pour optimiser le trafic (sécurité, mobilité, respect de l'environnement).

5.2 Transfert des commandes (*disengagement*)

Au cours de la **période de transition** entre les systèmes d'aide à la conduite et les véhicules entièrement autonomes, le rôle du conducteur humain reste incontestable dans les systèmes actuels²⁷. Même si le véhicule se déplace de manière autonome dans les conditions applicables (dans le cas de SAE L3), le conducteur humain doit rester vigilant pour pouvoir reprendre les commandes du véhicule si les circonstances l'exigent²⁸. Toutefois, au cours de la période de transition où l'apport du conducteur diminue progressivement, il est possible que l'expérience de conduite diminue (**deskillling**) au point d'être insuffisante au moment où elle est le plus nécessaire, c'est-à-dire dans les situations complexes où les fonctions d'automatisation du véhicule cessent de fonctionner. Ce n'est qu'à partir des niveaux SAE 4 et 5 que les véhicules seraient totalement autonomes, respectivement dans la plupart ou dans toutes les circonstances imaginables.

Si le véhicule détecte une situation qu'il ne peut pas gérer, il passe les commandes au conducteur (**disengagement**). En fonction de l'attention que le conducteur porte à l'environnement (**situational awareness**) et de nombreux autres paramètres, il faudra vite plusieurs secondes pour que le conducteur soit suffisamment conscient de son environnement de conduite et qu'il prenne correctement en charge la conduite du véhicule.

Le système doit être conçu pour être *fail safe* (à sécurité intégrée), de sorte que le véhicule s'arrête en toute sécurité si le conducteur ne répond pas à une demande de transfert des commandes. Le temps de réaction du conducteur pour prendre la responsabilité de la conduite dépend de ce qu'il fait, comme écouter de la musique, lire un article ou parler au téléphone (NDR-tasks³⁰). Le temps de réaction varie également en fonction de l'expérience de conduite et de l'âge (Benam, 2021).

Une expérience, certes limitée, menée dans un **simulateur de conduite** a montré que les conducteurs plus âgés sont généralement mieux à même de reprendre le contrôle d'un véhicule autonome. En outre, au cours de cette expérience, il s'est avéré qu'environ la moitié des participants n'ont pas vu l'indication visuelle de reprendre le contrôle et que les trois-quarts des participants ont accéléré après avoir repris les commandes au lieu de ralentir comme prévu (Favaro et al., 2019).

Il est préférable que le transfert de contrôle se fasse de la manière la plus transparente possible. Une simple demande de transfert ne suffit pas. Il convient de vérifier que le nouveau gestionnaire de tâches (conducteur humain ou système) **contrôle effectivement** le véhicule. Si ce n'est pas le cas ou pas assez, le système doit pouvoir prendre les mesures qui s'imposent (ralentir ou s'arrêter en toute sécurité).

À l'avenir, la question semble se poser de savoir **où** un seul occupant d'un véhicule autonome peut prendre place. Si, à un moment donné, le contrôle du véhicule doit être pris en charge, il y aura toujours un «siège conducteur». Dans d'autres cas, le véhicule devra réellement s'arrêter pour que l'occupant puisse prendre place sur le bon siège.

²⁷ Pour l'instant, les voitures privées qui prennent systématiquement en charge des tâches d'un conducteur humain exigent encore que ce dernier soit en mesure de reprendre le contrôle du véhicule. D'autre part, il existe également des projets pilotes dans le cadre desquels des véhicules autonomes fonctionnent sans conducteur humain dans un environnement bien délimité.

²⁸ Le transfert de contrôle peut être initié soit par le véhicule, soit par le conducteur.

²⁹ Des recherches ont montré qu'un temps de transition (du véhicule au conducteur) de huit à dix secondes est nécessaire (De Bruyne, 2021, chapitre 5, partie 5)..

³⁰ NDR-tasks: *Non-Driving Related Tasks*

Les problèmes liés à l'infrastructure (par exemple, la visibilité de la signalisation ou les défauts du revêtement routier) et, plus généralement, à l'environnement (par exemple, les zones de chantier) peuvent amener un véhicule autonome à demander l'intervention d'un opérateur. Toutefois, selon les informations disponibles, l'infrastructure ou l'environnement n'est pas la principale **raison des disengagements**. En outre, la plupart des transferts de contrôle sont effectués à l'initiative du conducteur en raison de problèmes d'infrastructure ou d'environnement, et non parce que le système ne peut pas les gérer.

Les graphiques ci-dessous montrent que les *disengagements* dus au système (du véhicule) évoluent favorablement et que les véhicules sont donc de plus en plus capables de gérer correctement toutes sortes de situations.

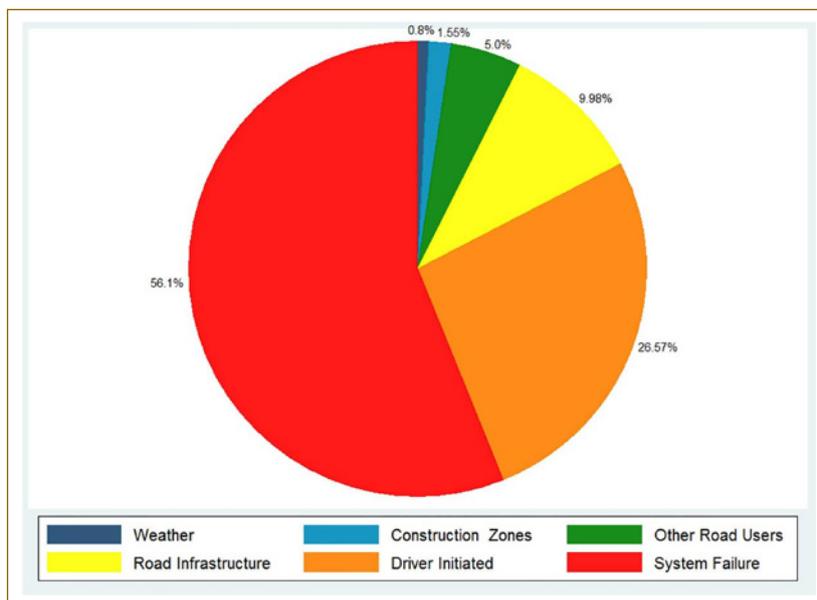


Figure 5.1

Reasons for disengagement, basées sur des essais sur la voie publique en Californie (09/2014-11/2015) (Dixit et al., 2016)

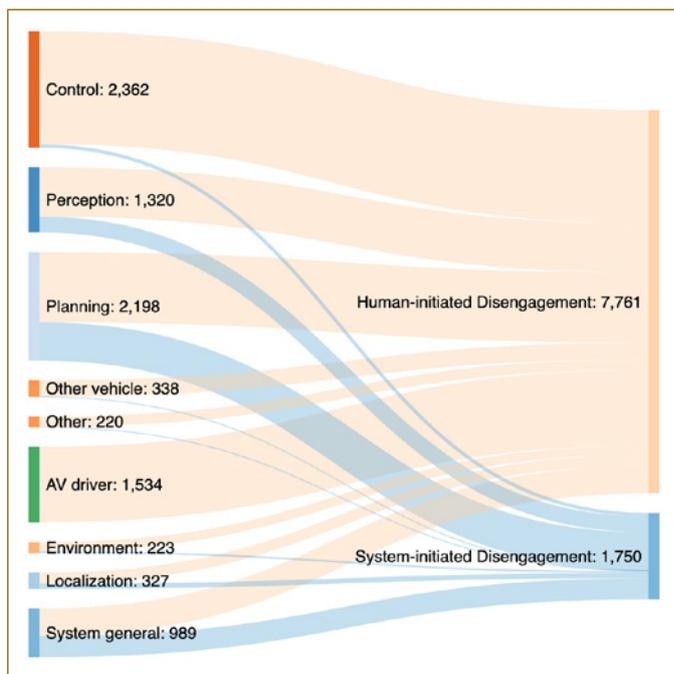


Figure 5.2

Reasons for disengagement, basées sur des essais sur la voie publique en Californie, 2021 (Zhang et al., 2021)

En outre, les situations qui amènent un opérateur humain à reprendre les commandes ne sont pas nécessairement risquées.

D'autre part, les figures 5.1 et 5.2 suggèrent également qu'à mesure que les systèmes des véhicules fonctionnent de manière plus fiable et que la confiance des occupants augmente également, d'autres facteurs (dont l'infrastructure) peuvent jouer un rôle plus important.

Les applications d'**intelligence artificielle**, en abrégé et en anglais AI, peuvent être conçues pour informer le conducteur de la situation actuelle ou future du trafic (Benam, 2021).

- Un système basé sur l'AI peut communiquer avec le conducteur de manière «humaine» au lieu de l'alerter au moyen d'un voyant ou d'une vibration du volant. Les messages vocaux augmentent la sécurité et la fiabilité de l'ensemble du système.
- Les applications d'AI permettent aux conducteurs de se préparer à l'imminence d'un danger. Cela peut réduire le temps de réaction à un éventuel transfert.
- Les applications d'AI peuvent gérer des transferts qui ont déjà été faits et ajuster les ordres de transfert futurs en fonction des caractéristiques du conducteur, comme l'âge, l'expérience ou la vitesse de réaction, ou d'autres paramètres temporels ou situations qui se sont produites en même temps. Ainsi, la durée de transfert d'environ 10 secondes peut être ajustée et augmentée ou réduite si aucun objectif de sécurité n'est enfreint.
- La personnalisation du conducteur par les systèmes d'AI peut accroître la disponibilité et la sécurité du système.

5.3 Panneaux de signalisation et marquages routiers

Tout comme elle influence le comportement des conducteurs humains, la signalisation peut également **contribuer** à un fonctionnement plus correct et plus fiable des ADAS et ADS.

Des recherches menées en Australie (Marr et al., 2020) sur les capacités et les limites des systèmes actuels de *machine vision* pour la reconnaissance des marquages routiers ont permis de faire plusieurs constats:

- il est plus difficile de reconnaître un marquage de jour que de nuit;
- le contraste entre le marquage et le revêtement de la route est un facteur important;
- la couleur du marquage n'exerce qu'une influence limitée;
- les configurations imprécises sont également source de confusion pour les systèmes automatisés;
- la lumière vive du soleil et l'ombre sont difficiles à gérer;
- des marquages discontinus sont généralement moins facilement identifiables que des marquages continus. Des marquages suffisamment larges et de bonnes caractéristiques de visibilité ont d'autant plus d'importance.

Les constructeurs automobiles et les fabricants de systèmes d'aide à la conduite semblent aujourd'hui avoir besoin de **panneaux de signalisation et de marquages routiers** clairement visibles et uniformes pour le fonctionnement de l'ISA et du LDW (*Lane Departure Warning*) / LKA (*Lane Keeping Assist*).

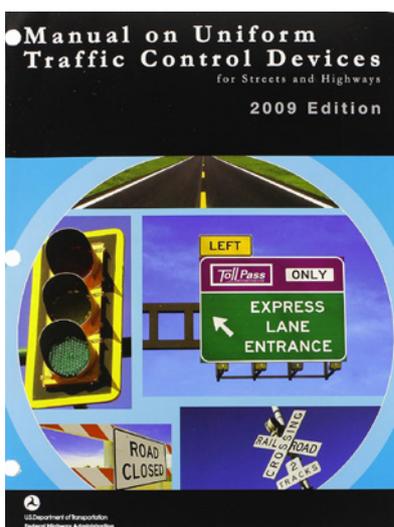
Des **systèmes de détection** des marquages routiers plus avancés, basés sur la technologie LIDAR, peuvent également identifier le bord de la chaussée en fonction de changements de surface ou d'une différence de niveau. L'inconvénient réside dans le fait que les systèmes LIDAR peuvent confondre les *ghost-markings* (marquages masqués) ou les joints – dus à des changements de surface – avec le bord d'une voie de circulation.

Pour un fonctionnement optimal, il est important que les marquages soient suffisamment visibles. Dans le cas des systèmes de détection LIDAR, la rétro réflexion contribue également à une meilleure détection de jour. La visibilité des marquages pour les systèmes de détection par caméra et LIDAR augmente également grâce à la délimitation claire des bords du marquage et au contraste du marquage par rapport à la chaussée.

Suite à la révision de la directive RISM (UE) 2019/1936, 2019, l'Europe examine l'opportunité d'introduire des **spécifications** européennes pour la visibilité et la reconnaissance des marquages routiers et des panneaux de signalisation au profit des conducteurs humains et des véhicules autonomes³¹.

Dans la mise à jour de son *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways* (MUTCD)³², la FHWA (Federal Highway Agency) aux États-Unis prête attention aux **marquages pour les véhicules autonomes**.

MUTCD



(US Department of Transportation [US DOT], Federal Highway Administration [FHWA], 2023)

Le MUTCD définit les recommandations pour les gestionnaires routiers du pays pour l'installation et l'entretien des dispositifs de contrôle de la circulation sur toutes les rues publiques, autoroutes, pistes cyclables et routes privées ouvertes au transport de personnes. Il s'agit d'une compilation de recommandations nationales pour tous les dispositifs de contrôle de la circulation, y compris les marquages routiers, les panneaux de signalisation et les feux de circulation. Le document est périodiquement mis à jour pour répondre à l'évolution des besoins du pays en matière de transport et pour prendre en compte les nouvelles technologies de sécurité, les outils de contrôle du trafic et les techniques de gestion du trafic.

L'édition de mai 2023 reprend les mises à jour nécessaires pour soutenir les essais en toute sécurité de la technologie des véhicules automatisés et tous les préparatifs nécessaires à l'intégration en toute sécurité des véhicules automatisés sur la voie publique.

³¹ Dans les groupes de travail EGRIS (*Expert Group on Road Infrastructure Safety*)

³² <https://mutcd.fhwa.dot.gov/>

Un sous-groupe de *UNECE/Global Forum for Road Traffic Safety* (WP.1) a lancé une initiative visant à harmoniser les différentes variantes de panneaux de signalisation, notamment pour assurer un fonctionnement plus fiable des systèmes d'aide à la conduite.



Figure 5.3 – Quelques variantes du panneau «descente dangereuse» (*Verkeersbord SB250 A3, 2023 ; Finnish Transport Infrastructure Agency, s.d. ; Roadsigns in Norway, 2023 ; National Driving School, 2023*)



Figure 5.4 – Les Contrast lane markers augmentent la fiabilité des systèmes LKA (*Lane Keeping Assistance*) et LDW (*Lane Departure Warning*), en particulier sur les revêtements de couleur claire et par forte luminosité (*VSI Labs, 2021*)

La reconnaissance du régime de vitesse par la seule détection des panneaux de signalisation ne semble pas suffisamment fiable³³. La dégradation de la signalisation, les conditions météorologiques et une signalisation trop peu visible en raison d'autres obstacles font que les capteurs ne sont pas toujours en mesure de reconnaître correctement les panneaux de signalisation. Dans les cas où le régime de vitesse est différent sur deux routes adjacentes, il est également possible que la vitesse en vigueur ne soit pas reconnue correctement. En outre, dans de nombreux cas, la vitesse autorisée est déterminée autrement que par un simple panneau de signalisation.

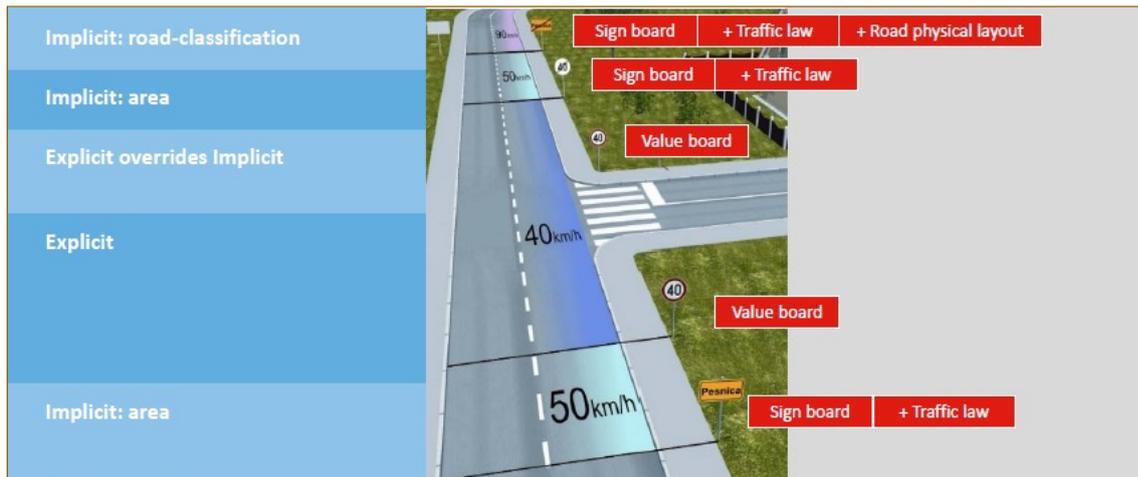


Figure 5.5 – Illustration des éléments qui déterminent le régime de vitesse (ITS.be, 2022)



Figure 5.6 – Régime de vitesse différent sur la voie principale et sur la voie parallèle (Clem, 2022)

Le règlement 2019/2144 permet également que l'ISA et le LDW/LKA utilisent d'autres sources de données (*crowdsourcing*, cartes numériques, etc.) que les simples observations des capteurs embarqués pour leur fonctionnement. Aujourd'hui, pour un fonctionnement suffisamment fiable de l'ISA et du LDW/LKA, il semble inévitable d'inclure des informations provenant de ces autres sources de données.

³³ Selon l'ACEA, les systèmes ISA basés uniquement sur des caméras ne détecteraient correctement le régime de vitesse en vigueur que dans 50 % des cas (ITS.be, 2022)

5.4 Revêtement routier et obstacles

Les conducteurs humains sont généralement à même de détecter à temps les obstacles ou les défauts de la chaussée et de les éviter ou d'adapter leur conduite de manière à ce qu'ils n'aient finalement qu'un impact limité sur la circulation.

Pour l'instant, les véhicules autonomes ont du mal à interpréter les **défauts du revêtement routier**. Par prudence, ils rendent le contrôle au conducteur, si cela est justifié. Les informations de transfert doivent être claires et opportunes, et le conducteur doit avoir les compétences suffisantes pour conduire le véhicule³⁴.

L'expérience limitée des navettes autonomes en Belgique laisse entendre que ces véhicules ne gèrent pas toujours bien les obstacles. Des véhicules à l'arrêt, de petits obstacles, des véhicules qui dépassent et qui se rabattent trop tôt – peut-être aussi en raison de la configuration prudente de la navette (*on the safe side*) – provoquent rapidement l'**arrêt du** véhicule, parfois brusquement, et une intervention de l'opérateur humain est nécessaire pour remettre le véhicule en mouvement³⁵.

Les navettes autonomes déployées aujourd'hui en Belgique dans le cadre de projets pilotes semblent assez bien distinguer les obstacles, mais peinent encore à les **éviter**. Des projets pilotes menés dans d'autres parties du monde (et après 2022, peut-être aussi en Europe) avec des véhicules autonomes plus perfectionnés indiquent toutefois que de tels obstacles ne doivent pas rester trop longtemps une barrière à l'utilisation de ces véhicules.

5.5 Zones de refuge (Xue et al., 2022)

Dans les cas où l'occupant s'avère incapable de reprendre le contrôle du véhicule lorsqu'on le lui demande ou si le véhicule autonome n'est pas en mesure de gérer une situation, le véhicule doit pouvoir s'arrêter en toute sécurité sur tous les types de route³⁶. On peut toutefois se demander s'il ne serait pas plus sûr d'arrêter les voitures de préférence sur la bande d'arrêt d'urgence ou dans une zone de refuge.

³⁴ § 5.3 Transfert des commandes (*disengagement*)

³⁵ Les premières expériences lors de projets pilotes avec des navettes à Waterloo (VIAS) et à Louvain-La-Neuve (TEC + Ville de Louvain-la-Neuve) ont montré que des obstacles provoquaient régulièrement l'arrêt du véhicule. L'intervention de l'opérateur s'est avérée nécessaire pour remettre le véhicule en mouvement (Mertens, 2022).

³⁶ UN, 2021 parle d'une *Minimum Risk Manoeuvre*; il s'agit d'un arrêt contrôlé sur la chaussée et de l'activation des feux de détresse.

5.6 Classification des routes

Les fonctions d'aide à la conduite ou de conduite autonome des véhicules ne fonctionnent souvent que dans des conditions bien définies. Si, sur une route, les fonctions d'aide à la conduite d'un véhicule donné sont opérationnelles, rien ne garantit qu'elles le seront sur un autre modèle de véhicule. Une **classification des routes en fonction de leur readiness** à soutenir certaines fonctions pourrait constituer une étape vers l'harmonisation. Lorsqu'elles développent des systèmes d'aide à la conduite, les entreprises peuvent se concentrer sur cette classification et sur les caractéristiques de l'infrastructure qui y sont associées. D'autre part, pour les gestionnaires routiers, cette classification donnerait des indications pour ainsi maintenir certaines caractéristiques de l'infrastructure à un certain niveau afin de soutenir l'ADS et l'ADAS (indépendant du véhicule).

Dans le projet INFRAMIX (Infrastructure categorization, 2017), une classification a notamment été proposée, indiquant dans quelle mesure l'infrastructure disponible supporte à la fois le transport automatisé et le transport conventionnel, en particulier pendant la période de transition où les deux se partagent la route. La classification, appelée niveaux **ISAD** (*Infrastructure Support Levels for Automated Driving*), fournit des informations sur la mesure dans laquelle une route dispose d'un support de connectivité et est préparée pour le futur trafic automatisé.

	Level	Name	Description	Digital information provided to AVs			
				Digital map with static road signs	VMS, warnings, incidents, weather	Microscopic traffic situation	Guidance: speed, gap, lane advice
Digital infrastructure	A	Cooperative driving	Based on the real-time information on vehicles movements, the infrastructure is able to guide AVs (groups of vehicles or single vehicles) in order to optimize the overall traffic flow	X	X	X	X
	B	Cooperative perception	Infrastructure is capable of perceiving microscopic traffic situations and providing this data to AVs in real-time	X	X	X	
	C	Dynamic digital information	All dynamic and static infrastructure information is available in digital form and can be provided to AVs	X	X		
Conventional infrastructure	D	Static digital information / Map support	Digital map data is available with static road signs. Map data could be complemented by physical reference points (landmarks signs). Traffic lights, short term road works and VMS need to be recognized by AVs	X			
	E	Conventional infrastructure / no AV support	Conventional infrastructure without digital information. AVs need to recognise road geometry and road signs				

Figure 5.7 – Catégorisation de l'infrastructure pour les véhicules autonomes: niveaux ISAD proposés dans le projet INFRAMIX (Infrastructure categorization, 2017)

Pour les niveaux ISAD, PIARC s'appuie sur la *Smart Road Classification* (Garcia Garcia, 2021). Le niveau LOSAD³⁷ (lié à l'infrastructure physique), combiné au niveau ISAD (lié à l'infrastructure numérique), donne lieu à cinq **Smart Road Levels**. Ces cinq niveaux de routes intelligentes distinguent les routes en termes de disponibilité pour les véhicules autonomes, avec des différences en termes de connectivité et de nombre de *disengagements* nécessaires (figures 5.8 et 5.9).

³⁷ Niveau LOSAD: *Level Of Service of Automated Driving*; indique dans quelle mesure une section de route est compatible avec aucun, seulement certains ou tous les véhicules ODD (E : non compatible avec les ODD, A : compatible avec la plupart des ODD).

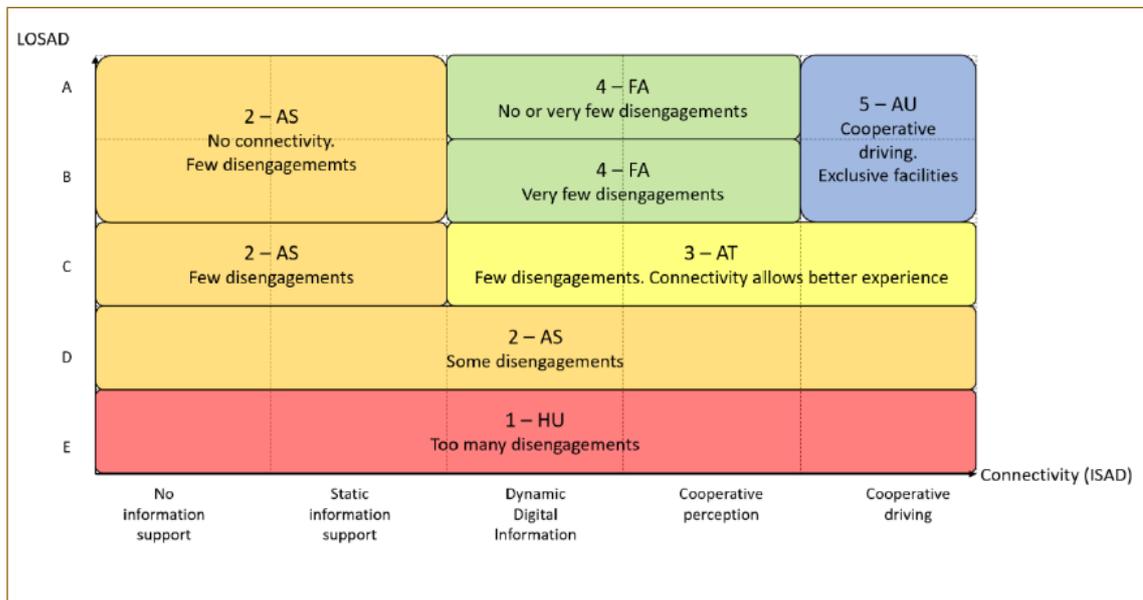


Figure 5.8 – SRL (Smart Road Level volgens PIARC) (Garcia Garcia, 2021)

Smart Road Level	Description
Human way (HU)	The road segment is not ready to host CAVs, due to the high number of disengagements, and/or the low capability to share digital data to inform vehicles about their ODDs.
Assisted way (AS)	The road segment is adequate to perform autonomously, but this condition may stop due to different factors (not as frequently as HU segments). Therefore, drivers of automation SAE levels 1 to 4 vehicles should be attentive to the road to disengagements or takeover requests.
Automated way (AT)	The road segment presents reasonably good connectivity and physical infrastructure capabilities, so disengagements or takeover requests would be quite lower compared to AS and HU. Vehicles can match their ODD limitations with the digital information shared by the road segments, so most takeover requests (SAE levels 3-4) are planned.
Full Automated way (FA)	The road presents a continuous ORS, ensuring ODD compatibility with far most SAE level 3-4 vehicles. Digital information is shared, so these vehicles can plan any takeover request. Therefore, an experience without disengagements can be attained. SAE level 2 vehicles would experience very low number of disengagements.
Autonomous way (AU)	Similar than FA, the connectivity infrastructure supports cooperative driving, so the infrastructure can receive and transmit tailored instructions to all vehicles, micromanaging traffic performance. This road segment type is exclusive for SAE level 4-5 CAVs. This highest smart level may be designated to some lanes

Figure 5.9 – Smart Road Levels (PIARC) (Garcia Garcia, 2021)

5.7 Digital Twin/Digital Map

Les *digital twins* (*Digital twin*, 2023) sont une **représentation numérique d'une réalité physique**, d'un système ou d'un processus. Ils sont utilisés pour la simulation, l'intégration, les essais, la surveillance et la maintenance. Outre les caractéristiques de la réalité physique, la représentation peut inclure des **informations sur la situation** dans cette réalité ou sur les événements qui se produisent.

Dans le contexte des véhicules autonomes, les *digital twins* peuvent être des représentations des véhicules, y compris tous les systèmes intégrés, ainsi que des représentations de l'environnement routier et de tous les événements susceptibles de se produire dans cet environnement.

Les *digital twins* sont utilisés à presque tous les stades du développement des véhicules, depuis le développement d'un prototype jusqu'au lancement commercial de nouveaux véhicules. Ils sont notamment utilisés dans la phase de développement pour tester les systèmes d'aide à la conduite et les voitures autonomes. Pour que les essais soient concluants, il faut une représentation numérique correcte du **véhicule** (y compris tous les capteurs et leur comportement) et de l'**environnement routier** (en tenant compte de toutes les variables possibles telles que les conditions météorologiques, les règles ou usages locaux en matière de circulation, les événements soudains, etc.).

Les systèmes d'aide à la conduite et les véhicules automatisés reposent aujourd'hui principalement sur des observations faites par des **capteurs** intégrés. Outre la limitation inhérente au fait que la détection n'est possible que dans le rayon d'action de ces capteurs (actuellement environ 250 m), les capteurs permettent uniquement de détecter, de reconnaître et, avec une précision variable, de localiser un objet³⁸.

En plus d'une simple représentation numérique de la route et de son environnement, les informations contenues dans un *digital twin* peuvent être **complétées** par des caractéristiques des objets du *digital twin* qui **ne** sont **pas immédiatement perceptibles visuellement** et qui sont utiles au fonctionnement d'un véhicule automatisé ou aux décisions qu'il prend. Il s'agit, par exemple, d'informations sur la rugosité du revêtement, sur le niveau de retenue des dispositifs de retenue, d'informations dynamiques sur les autres usagers de la route et sur les travaux routiers.

Certaines informations relatives à la réalité physique pourraient également être détectées par les capteurs du véhicule et, en cas d'incohérence avec les données du *digital twin*, être signalées au gestionnaire routier qui pourrait alors planifier des interventions plus ciblées (p. ex. des problèmes avec le LKA en raison d'un marquage trop peu visible).

Le fait que les systèmes de navigation soient de plus en plus souvent intégrés de série dans les véhicules donne une idée du potentiel des *digital twins*. Toutefois, pour prendre en charge des niveaux SAE plus élevés, ces *digital twins* doivent être **mis à jour** quasiment en temps réel. Les véhicules et l'infrastructure devraient être équipés de moyens de communication appropriés. Pour ce faire, il faut engager des moyens suffisants.

Pour les **chantiers routiers** en particulier, le défi consiste à tenir les informations numériques à jour afin que les véhicules puissent être informés des conditions. Cette prise de conscience est très présente aux États-Unis en particulier, où l'interaction routière sur les chantiers devient une priorité nationale (Highlights, 2023).

³⁸ HERE (fournisseur de systèmes d'automatisation des véhicules) a annoncé qu'ils proposaient des *digital twins* de l'environnement routier (y compris l'identification, la classification et la localisation d'objets avec une précision relative de 2 cm) créés à partir de données de capteurs LIDAR (HERE, s.d.)

Les chantiers routiers constituent une perturbation de la situation normale: les marquages routiers et/ou les panneaux de signalisation de la situation «normale» ne sont temporairement pas d'application. Le lieu et le moment où se déroulent des travaux routiers doivent être connus en temps utile et de manière correcte. Il convient de reprendre ces informations dans les **contrats entre les gestionnaires routiers et les entrepreneurs**. Des développements sont en cours en ce qui concerne les messages standard sur les chantiers routiers. La norme DATEX spécifie comment les informations sur les événements liés au trafic, y compris les chantiers routiers, peuvent être transmises de manière structurée³⁹.

En ce qui concerne les **chantiers mobiles**, l'AWV demande que le Verkeerscentrum soit informé des chantiers prévus, du début effectif des travaux et des déplacements provisoires (Agentschap Wegen en Verkeer [AWV], 2021). Le début et la fin des travaux doivent toujours être communiqués par téléphone afin que les usagers de la route puissent en être informés et que des tronçons de route puissent être fermés – par une signalisation dynamique – si nécessaire.

La **transmission automatique de la position** des absorbeurs de chocs à l'aide des données *Track & Trace* permet de fermer des tronçons de route de manière beaucoup plus ciblée et de les rouvrir plus rapidement après les travaux. En ne fermant que les tronçons où des travaux sont effectivement réalisés, la capacité routière disponible peut être utilisée plus efficacement et ces restrictions sont perçues comme plus crédibles et mieux respectées par les usagers de la route.

Pour les informations sur les **chantiers fixes**, l'AWV encourage l'utilisation de l'application interne WERF. Ce système permet d'encoder, de mettre à disposition et de tenir à jour des informations sur l'occupation du domaine public (décret portant sur l'échange d'informations, 2014), tant pour les travaux pour le compte de l'AWV que pour d'autres maîtres d'ouvrage.

Avec le projet **Mobilidata**, l'AWV souhaite mettre à la disposition des usagers de la route des informations sur la présence d'absorbeurs de chocs, de véhicules d'intervention roulant à faible vitesse et de chantiers routiers, ainsi que des informations sur d'autres risques et dangers sur la route. Les données sont ainsi collectées automatiquement dans la mesure du possible, sans intervention (manuelle) des utilisateurs. Pour l'instant, il s'agit uniquement d'informations à destination des conducteurs, mais plus tard, elles serviront également de source de données pour les véhicules autonomes.

³⁹ DATEX II (CEN, 2018-2022) est le langage électronique utilisé en Europe pour échanger des données relatives au trafic. La norme a vu le jour dans les années 1990 et est actuellement tenue à jour par le CEN/TC 278 (Road Transport and Traffic Telematics). <https://www.itsstandards.eu/aboutus/>

⁴⁰ www.mobilidata.be

5.8 Infrastructure numérique

La question de savoir si le partage des données entre les usagers de la route et l'infrastructure est une **condition** nécessaire au fonctionnement sécurisé des véhicules autonomes n'a pas encore été tranchée. Néanmoins, de nombreux observateurs estiment que la communication peut contribuer à la fiabilité des ADAS⁴¹. Quoi qu'il en soit, si les véhicules autonomes doivent également utiliser des données provenant d'autres véhicules ou de l'infrastructure pour pouvoir fonctionner ou, inversement, servir de source de données pour d'autres usagers de la route, le matériel et les logiciels de communication nécessaires devront être disponibles⁴².

À l'heure actuelle, il apparaît déjà que, pour une fiabilité acceptable, les systèmes ISA ne peuvent pas fonctionner uniquement sur la base du régime de vitesse reconnu par les capteurs du véhicule. Pour atteindre le niveau de fiabilité requis pour l'homologation⁴³, des informations supplémentaires, extérieures au véhicule, sont nécessaires.

Le rôle de l'infrastructure numérique semble encore s'accroître. Par exemple, dans **Cooperative Forward Collision Warning application**: les informations relatives à la localisation du véhicule et à ses mouvements avec d'autres véhicules à proximité peuvent être utilisées pour calculer les trajectoires des véhicules proches et avertir les conducteurs de l'imminence d'une collision. Des données cartographiques peuvent être utilisées pour filtrer et interpréter la position relative et le mouvement des véhicules à proximité. La faisabilité soulève des questions: qu'en est-il de la faisabilité financière (initiale) et de la protection de la vie privée?

- Communication V2V: les véhicules qui en sont équipés sont détectés.
- Communication V2I: la localisation et les mouvements des véhicules sont reçus par l'infrastructure et utilisés par les gestionnaires routiers pour soutenir un large éventail d'applications de sécurité routière et de mobilité.
- Les capteurs GPS (dans le véhicule) permettent de détecter (via une base de données de localisation) les dangers imminents. La détection des piétons peut également faire partie de ce type de système.

Chine: l'infrastructure comme **enabler** (How USD300bn, 2022)

Le développement des systèmes d'AI est une étape cruciale vers le plus haut niveau de conduite autonome. La Chine a choisi de ne pas se concentrer uniquement sur le développement de l'AI, mais s'est également fortement engagée à installer des **éléments intelligents en bord de route** moins exigeants sur le plan technologique.

L'UBS Investment Bank estime que la Chine est la mieux placée pour initier la **vehicle infrastructure collaboration (VIC)**. Ils prévoient jusqu'à 300 milliards de dollars d'investissements routiers en Chine entre 2022 et 2040. Ils estiment que le marché ne tient pas compte des possibilités qu'offre la VIC en matière d'AD. Ils partent du principe que la VIC élimine les goulets d'étranglement technologiques et qu'elle est donc plus facile à mettre en œuvre que la technologie de l'AI.

En Chine, l'idée est de créer dans un premier temps des autoroutes prêtes à accueillir des camions autonomes et, dans un deuxième temps, des voitures particulières. Pour atteindre le niveau maximal d'AD, la Chine veut installer toute une série de choses par kilomètre: 50 caméras, 20 radars à ondes millimétriques et 10 dispositifs routiers intelligents (Gibbs, 2021).

⁴¹ Selon une estimation de l'ACEA, la fiabilité de l'ISA basée uniquement sur la reconnaissance des panneaux de signalisation se limiterait à environ 50 %. L'exploitation d'autres sources de données est inévitable pour atteindre un niveau de fiabilité suffisant (ACEA, 2021).

⁴² Les nouveaux feux de signalisation en Flandre sont déjà équipés pour cela (communication ou extension optionnelle possible)

⁴³ Le règlement délégué (UE) 2021/1958, 2021 exige que les systèmes ISA reconnaissent correctement le régime de vitesse dans 90 % des cas en moyenne. Selon l'ACEA, les systèmes basés uniquement sur la reconnaissance des panneaux de signalisation auraient une fiabilité de 50 %.

5.9 Communication entre le VA et les usagers de la route vulnérables (Tabone et al., 2021)

D'après une publication de 2021 sur l'étude de la **vision** des **chercheurs en Human Factors** sur l'avenir de l'interaction entre les véhicules autonomes et les usagers vulnérables, il apparaît clairement que l'aspect «infrastructure» est assez vague.

D'une manière générale, ces chercheurs s'accordent à dire que les véhicules entièrement autonomes ne seront pas introduits de sitôt, que l'infrastructure intelligente et la séparation du trafic sont considérées comme cruciales, mais coûteuses. L'AR (*Augmented Reality*) a été jugée prometteuse, mais on estime que la communication implicite (non verbale) reste dominante pour le moment et qu'il est difficile de la remplacer par la simple détection des situations conflictuelles par des capteurs de véhicules. L'utilisation d'eHMI (*external human-machine interfaces*), de messages adressés par le véhicule aux autres usagers de la route, pourrait pallier l'absence de cette communication non verbale entre les personnes. Toutefois, pour l'instant, les solutions conceptuelles ne semblent pas suffisamment développées.

Les eHMI pour les véhicules autonomes au profit des usagers de la route vulnérables sont des systèmes qui permettent d'informer les usagers à l'extérieur du véhicule («machine»).



Figure 5.10 – Exemple d'un véhicule équipé de plusieurs écrans d'information pour communiquer avec les piétons (Volkswagen Tiguan) – projection d'un passage pour piétons (Duff, 2015 ; *Light staging and exterior HMI*, 2018)

En ce qui concerne plus particulièrement l'**incertitude relative à l'infrastructure routière**, il est intéressant de sélectionner des commentaires des chercheurs: c'est un peu comme lire dans le marc de café (annexe 3).

5.10 Conditions météorologiques (Hoe beïnvloedt het weer de verkeersveiligheid, 2023; Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid [SWOV], 2023)

La météo influe indiscutablement sur le comportement routier et la sécurité routière. Les conditions météorologiques influencent à la fois la probabilité et les conséquences d'un accident. On parle ici de différentes conditions: pluie, grêle, neige, givre, chaleur et même soleil bas. En cas de pluie, de neige ou de grêle, la **rugosité du revêtement** diminue et le risque de dérapage du véhicule augmente. En cas de brouillard, la visibilité diminue mais les véhicules roulent généralement plus près les uns des autres. Un soleil bas réduit également la visibilité, phénomène aggravé si de l'eau sur la route reflète la lumière du soleil. Le vent affecte particulièrement la tenue de route des véhicules plus hauts.

Selon le type de temps, les gens adaptent leur comportement en prenant un autre moyen de transport ou en faisant preuve de prudence. Par exemple, les automobilistes dépassent généralement moins par temps de pluie, roulent moins vite et gardent leurs distances.

Les recherches montrent que le **risque d'accident** dans de telles conditions peut être plus élevé que par temps «normal», malgré les changements apportés au comportement de conduite. Une étude néerlandaise estime que 5 % des décès sur la route sont directement liés aux conditions météorologiques. Elle montre en outre que le risque d'accident sur les autoroutes augmente de 35 % à 182 % lorsqu'il pleut, et même de 77 % à 245 % en cas de givre. Il convient toutefois de préciser que les accidents survenant par temps de pluie sont moins graves.

Il existe un **grand potentiel d'amélioration de la sécurité routière**, même dans des conditions météorologiques difficiles. Exemples de questions relatives aux performances des véhicules autonomes:

- Même dans ces conditions météorologiques plus difficiles, les véhicules autonomes, avec leurs capteurs et leurs systèmes d'alerte, ont-ils la capacité de détecter correctement les objets et les événements dans leur environnement?
- Et peuvent-ils alors utiliser ces informations pour faire le bon choix (adapter la vitesse, effectuer une manœuvre, arrêter la voiture, demander à un occupant de prendre les commandes, etc.)?

Aux États-Unis, on a étudié dans différents environnements de conduite comment des **conditions météorologiques défavorables** affectent la dynamique et les activités des VA, le comportement du conducteur (dans le sens de *disengagement*), la communication et les capacités des capteurs des VA (Coventry et al., 2022 ; Neumeister & Pape, 2019).

Il est apparu que les performances dans de mauvaises conditions météorologiques étaient un facteur dans l'approche de l'automatisation de l'aide à la conduite pour chaque modèle de VA testé au cours de deux périodes d'étude. Quelques constatations⁴⁴:

- Les **systèmes avec caméra seulement** fonctionnent moins bien par mauvais temps. Les systèmes de radar et de caméra combinés étaient toujours sensibles à la pluie et au gel, mais moins que le système avec vision seule.
- Apparemment, l'éclat du soleil n'a pas affecté le seul véhicule qui a pu être testé.
- Deux véhicules sur trois ont été significativement impactés par la **pluie** pour le *high speed lane following*. La pluie n'a affecté que le système *vision only* pour le *Lane Departure Warning* et le *Traffic Jam Assist*.

⁴⁴ Annexe 1.

- La **glace ou la neige** sur le radar et la caméra ont entraîné la désactivation des systèmes de sécurité de tous les véhicules. Un véhicule a pu fonctionner avec la caméra masquée et un autre avec le radar désactivé. Par manque de temps, il n'a pas été possible de tester la situation inverse pour chacun des véhicules.

Lors d'un atelier, la même étude américaine a relevé les **limites** suivantes des véhicules autonomes par mauvais temps:

- Il n'existe pas de bonnes méthodes pour décider si un trajet automatisé doit commencer ou se poursuivre.
- Les gestionnaires routiers (aux niveaux fédéral et communal) ne sont pas suffisamment préparés pour prodiguer des conseils en matière d'automatisation et les fabricants n'annoncent pas les limites de leurs produits.
- Bien que l'ODD doive être spécifié par le constructeur du véhicule, il n'est pas clairement établi à qui incombe la responsabilité de déterminer si les conditions actuelles ou prévues tombent dans l'ODD.
- Les gestionnaires routiers (aux niveaux fédéral et communal) s'inquiètent du fait qu'on pourrait leur demander d'assumer une nouvelle responsabilité en ce qui concerne les opérations des VA, comme décider du moment où on ferme les routes.
- Les restrictions des VA liées aux conditions météorologiques ne sont pas bien comprises.

5.11 Étude de cas sur les systèmes d'aide à la conduite (ADAS) et la Safe System Approach (homme – environnement – véhicule)

ADAS (*Driver assistance technology*, s.d.) désigne les systèmes avancés d'aide à la conduite des véhicules. Certaines technologies d'aide à la conduite sont conçues pour **alerter** le conducteur en cas de risque d'accident imminent, tandis que d'autres sont conçues pour prendre des **mesures** afin d'éviter un accident.

Il est essentiel de comprendre comment la technologie fonctionne, dans quelles limites et comment elle peut protéger les occupants et les autres. Il est nécessaire de **former** les conducteurs. Des études révèlent qu'une bonne partie des conducteurs ne connaissent pas et n'utilisent pas correctement les systèmes d'aide à la conduite (Brown, 2018 ; Caster, 2021).

Dans la pratique d'un système d'aide à la conduite, quel est le rôle de l'infrastructure routière physique? De quelle manière l'infrastructure peut-elle contribuer au fonctionnement fiable des systèmes d'aide à la conduite? Pour répondre à cette question, nous décrivons par étapes ce qui se passe au niveau de l'humain, de l'environnement et du véhicule avec un ADAS, le *lane keeping assistant* (LKA).

- Un LKA se sert des marquages routiers pour analyser la voie (infrastructure).
- Le véhicule envoie un signal au conducteur dès que son véhicule menace de quitter la voie.
- Un marquage routier visible (infrastructure) aide le conducteur humain (non-CAV) et contribue ainsi à un meilleur comportement de conduite et à une réduction du nombre d'accidents (précieux pour les personnes, les véhicules et l'environnement).

- D'autre part, l'évolution de la technologie et l'amélioration du fonctionnement des LKA permettent de mieux détecter les marquages routiers moins visibles. Si nécessaire, le véhicule peut envoyer un signal au conducteur pour qu'il adapte son comportement.

De telles évolutions semblent indiquer que l'importance de marquages bien visibles diminue à mesure que des véhicules plus avancés arrivent sur le marché. Néanmoins, il faudra encore tenir compte pendant un certain temps de la coexistence d'un mélange de véhicules sans ou avec des niveaux très différents d'aide à la conduite sur nos routes. Le progrès technologique ne doit donc pas être une excuse pour négliger les éléments classiques de l'infrastructure. Outre cet argument, il convient également de se demander où se situe la limite des exigences minimales en matière de marquage routier pour les véhicules dotés d'une technologie de détection avancée.

Abstraction faite des êtres humains, trois éléments interdépendants sont importants. L'un d'entre eux concerne l'infrastructure physique:

- des marquages de qualité (infrastructure physique);
- un *digital twin* de la voie (infrastructure numérique);
- des radars embarqués (technologie des véhicules).

Une analyse similaire peut être effectuée pour d'autres systèmes, tels que la **speed assistance**, mais en ce qui concerne l'infrastructure routière physique, il s'agit des panneaux de signalisation en bord de route. Selon le code de la route, ce sont eux qui sont déterminants et non un potentiel *digital twin*. La question est de savoir dans quelle mesure, et à partir de quand, le code de la route doit prendre en compte la numérisation plus poussée, et si l'infrastructure routière physique reste encore déterminante.

Il en va de même pour un **adaptive speed control**. Si une route semble en mauvais état (par exemple, nids de poule), le véhicule et le conducteur peuvent être contraints de freiner, voire de faire un écart. Une telle situation peut alors impacter les autres usagers de la route (véhicule qui suit, véhicule sur l'autre voie, etc.).



Chapitre 6

Conclusion

L'amélioration de la sécurité routière est l'une des principales raisons qui poussent les décideurs politiques et les entreprises à se tourner vers la mobilité autonome. L'émergence progressive de la mobilité autonome en tant qu'alternative valable aux modes de déplacement plus traditionnels est un **défi** qui **offre des opportunités** pour un système de circulation plus sûr.

Sur la base d'une étude bibliographique, de discussions avec des experts et de congrès que nous avons suivis, nous constatons que l'automatisation des véhicules n'est certes pas la panacée, mais qu'elle peut apporter des gains importants pour la sécurité routière. Toutefois, de nouveaux risques en termes de sécurité routière font également leur apparition, notamment pour les raisons suivantes:

- il y aura encore longtemps des véhicules sur la route avec des niveaux différents d'automatisation;
- la reprise en charge des commandes par un conducteur humain peut prendre jusqu'à 10 secondes, ce qui peut à tout le moins être qualifié de sous-optimal dans de nombreuses situations;
- un transfert dans des situations plus complexes peut s'avérer problématique;
- les conducteurs pourraient progressivement perdre leurs aptitudes à la conduite;
- la communication non verbale entre les usagers de la route humains est difficile à saisir dans les systèmes automatisés. Les eHMI (*external human machine interfaces*) n'ont pas encore été développées et ne constituent pas une alternative valable pour l'instant;
- les nouveaux systèmes nécessitent une acclimatation de la part des conducteurs.

En outre, l'introduction de la mobilité autonome est plus lente que ce que certains experts et développeurs de véhicules autonomes avaient prédit et encouragé il y a quelques années. La **réalité** s'est avérée **plus récalcitrante** à bien des niveaux, comme les discussions éthiques et juridiques, l'acceptation sociale et l'économie. L'évolution vers des véhicules moins polluants réclame beaucoup d'attention et d'investissements. Les véhicules autonomes sont, selon toute probabilité provisoirement, moins à l'avant-plan de l'amélioration nécessaire du système de mobilité.

Les partisans de la mobilité autonome affirment qu'il n'y a pas d'obstacles **techniques** à la mise en circulation de véhicules autonomes sur le réseau routier, même dans un contexte urbain. Ils se réfèrent à des essais effectués hors UE qui ont dépassé le stade des projets pilotes.

En ce qui concerne le **transfert du contrôle** à un conducteur humain, l'initiative vient de moins en moins du véhicule autonome, ce qui laisse penser qu'ils sont de plus en plus fiables. En outre, les informations disponibles montrent que l'infrastructure routière (par exemple, la visibilité de la signalisation ou les défauts du revêtement routier) ne sont pas les principales raisons des *disengagements*.

Dans la **pratique**, on observe que les accidents de la route impliquant des véhicules autonomes sont largement relayés par la presse. Cela pourrait entamer la confiance des consommateurs, mais les études montrent que la confiance dans la mobilité autonome augmente malgré tout. Si l'accent est mis sur les gains escomptés en matière de sécurité routière, la confiance devrait encore s'accroître.

La couverture médiatique des problèmes liés aux véhicules autonomes incite les décideurs politiques à faire preuve d'une certaine **retenue** quant à l'introduction de véhicules autonomes sur nos routes. Sur la base d'une analyse du nombre limité d'accidents de la route impliquant des véhicules autonomes, nous pouvons dire que cela est au moins partiellement injustifié: la cause est souvent imputable au véhicule conventionnel et la gravité des accidents tend à être moindre.

Il n'existe pas de méthode unique pour évaluer la sécurité routière des véhicules autonomes (ou les comparer aux véhicules «classiques»). Pour estimer la sécurité, une **combinaison de simulations et de projets pilotes** est la plus complète, afin d'éviter l'émergence d'une image trop unilatérale du potentiel en termes de sécurité routière. Procéder à des essais sur la voie publique est la façon la plus honnête de démontrer la sécurité. Il peut s'agir d'une conduite entièrement autonome ou d'un mode *shadow*, dans lequel l'algorithme observe le comportement humain et le compare aux actions qu'il entreprendrait lui-même. Cela permet d'ajuster l'algorithme.

Il n'y a pas encore de véhicules autonomes sur le marché de consommation. Les véhicules les plus avancés dans cette catégorie sont des véhicules de niveau SAE 3, qui ne sont pour l'instant autorisés que dans des conditions de conduite limitées et très spécifiques. Des taxis robots circulent déjà à plusieurs endroits du monde (États-Unis, Chine). Pour l'instant, les projets pilotes à grande échelle semblent se limiter aux pays d'origine des entreprises qui organisent ces essais. Dans l'Union européenne, les essais à grande échelle semblent susciter des **réticences**, notamment en raison de l'incertitude quant aux effets sur la sécurité routière.

L'**UE** souhaite que l'introduction des véhicules autonomes soit un succès. Cette *success story* pourra s'écrire si la sécurité devient une condition préalable absolue lorsque des essais sont organisés ou des véhicules autonomes autorisés. Par conséquent, les conditions dans lesquelles les véhicules autonomes sont testés ou autorisés à circuler sur les routes font également l'objet de discussions.

Les constructeurs automobiles garantissent également le fonctionnement fiable des fonctions d'aide à la conduite ou de conduite autonome uniquement dans des conditions bien définies, ce que l'on appelle l'**Operational Design Domain (ODD)**. Il n'existe toutefois pas d'accord formel sur les paramètres déterminants pour un ODD. Cependant, il est clair qu'il n'existe pas de norme physique unique pour «la» route prête à accueillir des véhicules autonomes. Il semble y avoir un consensus raisonnable sur le fait qu'il n'est pas nécessaire de construire une route dédiée aux véhicules autonomes, mais que ceux-ci utiliseront les **routes existantes**. En particulier dans un contexte urbain, c'est la seule approche logique.

Des accidents de la route pouvant être attribués à des **défaillances du système** et impliquant des véhicules autonomes se produisent. Il peut s'agir d'erreurs de perception (dues par exemple à des défaillances matérielles, à des bugs dans les algorithmes), d'erreurs de décision (informations tardives, erronées) et d'erreurs d'action (par exemple, défaillance mécanique du véhicule, diminution de l'expérience de conduite des personnes qui doivent prendre les commandes). La poursuite du développement des algorithmes et l'application de l'**intelligence artificielle** sont essentielles pour réduire progressivement ces erreurs au minimum.

Les **conditions météorologiques** influencent le fonctionnement des véhicules autonomes. Les algorithmes d'un véhicule autonome sont programmés de manière plutôt prudente. La désactivation de la décision du conducteur humain peut être considérée comme une amélioration significative. Après tout, certains conducteurs humains prennent des risques dans des conditions météorologiques défavorables, risques que le véhicule autonome évite.

Il existe un consensus sur le fait qu'une **signalisation claire et uniforme** (panneaux de signalisation, marquages routiers) peut contribuer à un fonctionnement fiable des nouvelles technologies automobiles. D'une part, les véhicules autonomes sont de plus en plus capables de s'adapter à des marquages routiers de moindre qualité; d'autre part, on n'atteint pas partout les performances recommandées existantes. En outre, des véhicules de tous niveaux d'automatisation continueront pendant un certain temps à emprunter les routes actuelles. Dans certaines conditions météorologiques, il est difficile de lire correctement les panneaux de signalisation et les marquages routiers.

La **connectivité** peut contribuer à améliorer le fonctionnement des VA, mais ce n'est pas une condition sine qua non. La question de savoir si la sécurité doit dépendre de cette connectivité ne fait pas l'unanimité. La possibilité que la communication soit perdue ou que des informations malveillantes ou erronées soient transmises est un des arguments en faveur d'une **indépendance** du fonctionnement des fonctions critiques pour la sécurité par rapport à la connectivité.

En politique, on observe une tendance à vouloir réduire à zéro le nombre de tués sur les routes à l'horizon 2050. Les documents politiques récents sont liés à l'approche intégrée appelée **Safe System Approach**. Ce système se base notamment sur le partage des responsabilités. Il suppose que les êtres humains peuvent commettre des erreurs et que le système doit être configuré de manière à ce que les erreurs humaines et les comportements imprévisibles n'entraînent pas d'accidents graves. Il en va de même pour les véhicules autonomes: eux aussi peuvent commettre une erreur, ou l'algorithme n'est pas encore suffisamment développé. En ce qui concerne les véhicules autonomes, la politique devrait également viser à **prévenir les accidents graves**. Concrètement, non seulement le bon fonctionnement intrinsèque des systèmes d'aide à la conduite ou de conduite autonome est indispensable, mais l'environnement routier doit également être clair et **lisible** et les moyens de communication doivent fonctionner de manière fiable. En ce sens, le passage à la mobilité autonome souligne encore davantage l'importance d'une bonne coopération entre les différentes parties prenantes.

Les véhicules autonomes parviennent de plus en plus à se localiser en se basant sur des données GPS.

L'harmonisation insuffisante des panneaux de signalisation, la visibilité réduite due à la pollution ou à l'exposition aux conditions météorologiques, les règles supplémentaires spécifiques utilisant des panneaux additionnels et les règles implicites (par exemple, le régime de vitesse à la sortie d'une agglomération) rendent difficile pour les systèmes ISA d'indiquer le régime de vitesse correct avec la fiabilité requise. L'amélioration de la fiabilité de ces systèmes nécessite des sources d'information externes (*digital maps*) et des efforts supplémentaires en ce qui concerne l'indication du régime de vitesse par le biais de la signalisation physique.

Enfin, les gestionnaires routiers ont besoin de recommandations claires sur les caractéristiques de l'infrastructure susceptibles de favoriser le transport autonome. Il s'agit principalement des exigences relatives aux éléments physiques de la signalisation (panneaux de signalisation, marquages routiers), mais cela peut également impliquer le développement de systèmes d'intelligence artificielle ou d'éléments intelligents en bord de route.

La directive STI (directive 2010/40/UE, 2010) et les règlements associés exigent déjà que certaines informations sur le trafic (notamment pour les travaux routiers de courte durée) soient mises à la disposition des usagers de la route. Les véhicules avancés (connectés) peuvent contribuer à mettre ces informations à la disposition de tous les usagers de la route de manière plus efficace.



Chapitre 7

Bibliographie

- 50 years on, the 1968 Conventions on road traffic and road signs and signals are still at the core of road safety efforts worldwide. (2018, November 7). *United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)*. <https://unece.org/transport/press/50-years-1968-conventions-road-traffic-and-road-signs-and-signals-are-still-core>
- 2020 assisted driving tests. (2020). *Euro NCAP*. <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/safety-campaigns/2020-assisted-driving-tests/>
- Adaptive cruise control uit in de tunnel. (2021, februari 19). *Westerschelde tunnel*. <https://www.westerscheldetunnel.nl/nl/actueel/adaptive-cruise-control-uit-in-de-tunnel/>
- ADS Team. (s.d.). Driving automation systems: Advanced driver assistance systems (ADAS) and automated driving systems (ADS). *SFMTA*. <https://www.sfmta.com/projects/driving-automation-systems-advanced-driver-assistance-systems-adas-and-automated-driving>
- AEB pedestrian. (2023). *Euro NCAP*. <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/vulnerable-road-user-vru-protection/aeb-pedestrian>
- Agentschap Wegen en Verkeer (AWV). (2021, September 29). *Werfsignalisatie 6de categorie op autosnelwegen en wegen > 90kmu: Aanrij-, opstellings- en afrijprocedure inzake botsers* (AVW Dienstorder No. MOW/AWV/2021/9). <https://wegenenverkeer.be/sites/default/files/uploads/documenten/MOW-AWV-2021-9.pdf>
- All for zero: Une vision partagée sur la sécurité routière en Belgique*. (2021). <https://all-for-zero.be/storage/minisites/all-for-zero-fr.pdf>
- Beeckman, H. (2021, December 14). Eerste (deels) zelfrijdende auto's krijgen groen licht van Duitse overheid, maar er zijn ook bedenkingen. *VRT nws*. https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2021/12/14/_onderzoek-ongevallen-met-semi-zelfrijdende-autos-zoals-vliegtui/
- Belgian Federal Police. (2022, januari 15). *Kijk Uit: Autoveiligheidssystemen* [Video]. *YouTube*. <https://www.youtube.com/watch?v=of4JRXVigRO>
- Bellan, R. (2022, May 18). Waymo is expanding its driverless program in Phoenix. *TechCrunch*. https://techcrunch.com/2022/05/18/waymo-is-expanding-its-driverless-program-in-phoenix/?guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xLmNvbS8&guce_referrer_sjg=AQAAAAAwF98uPMzjBcpJp_GRWVNZDFOqORd1r9mu5KgAP3ldAuU2oUkZq-XZa213DUcuDZvoLTTt4ZEFWjU1OhUP3s_RkoVqyM0B3hl83n54PORCYN9omiY5yEK4VZxbTRaM9ngWVuUtpQgLFjceLNyN-GyvE7QXWWT_y7R6-nXZIYGZ6&gucounter=2
- Benam, B. (2021, September 14). Human factors and using of AI applications in autonomous vehicles: Reliable interaction between humans and autonomous vehicles is fundamental for the safety of all road users. *Medium*. <https://medium.com/rewrite-tech/human-factors-and-using-of-ai-applications-in-autonomous-vehicles-cba41c84208a>

- Brooks, R. (2017, July 27). The big problem with self-driving cars is people: And we'll go out of our way to make the problem worse. *IEEE Spectrum*. <https://spectrum.ieee.org/the-big-problem-with-selfdriving-cars-is-people>
- Brown, B. (2018, September 28). Car owners have too much faith in advanced driver assistance aids, AAA says. *Digitaltrends*. <https://www.digitaltrends.com/cars/aaa-study-drivers-like-dont-understand-adas/>
- Caster, S. (2021, September 24). Look ma, no hands: People don't understand how to use driver-assist systems safety: Advanced driver-assist systems can lull drivers into taking their hands off the wheel and eyes of the road when they shouldn't. *The Next Web (TNW)*. <https://thenextweb.com/news/people-dont-understand-how-to-use-driver-assist-systems-safely-syndication>
- Comité Européen de Normalisation (CEN). (2018-2022). *Systèmes de transport intelligents: Spécifications DATEX II d'échange de données pour la gestion du trafic et l'information routière* (EN 16157-[1-12]). <https://www.en-standard.eu/search/?q=16157>
- Coventry, T., Johnson, D. & Davis, G. (2022, February 7-11). Automated vehicles and adverse weather [Paper presentation]. In *16th world winter service and road resilience congress, Calgary, Canada*. World Road Association (PIARC). <https://proceedings-calgary2022.piarc.org/ressources/files/3/IP0167-Coventry-E-Full.pdf>
- de Boer, Y. (2021, juni 18). Autonome auto's: Welvaartswinst, maar dat niet alleen. *Verkeerskunde*. <https://www.verkeerskunde.nl/artikel/autonome-autos-welvaartswinst-maar-dat-niet-alleen>
- De Bruyne, J. (2021). *Autonome motorvoertuigen: Een multidisciplinair onderzoek naar de maatschappelijke impact*. Vanden Broele. <https://catalogus.vandenbroele.be/fondscatalogus/845.aspx>
- Decreet houdende de uitwisseling van informatie over een inname van het openbaar domein in het Vlaamse Gewest (GIPOD-decreet). (2014, april 4). Vlaamse Overheid. <https://codex.vlaanderen.be/Portals/Codex/documenten/1024277.html>
- Detroz, A., James, A. & Simon, M. (2023, janvier 5). « On a d'abord pensé à une scan-car »: Quelle est cette étrange voiture croisée par Isabelle dans les rues de Bruxelles ? *RTL info*. <https://www.rtl.be/actu/vos-temoignages/dabord-pense-une-scan-car-quelle-est-cette-etrange-voiture-croisee-par-isabelle/2023-01-05/article/515747>
- Digital twin. (2023, September 14). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin
- Directive 2010/40/EU 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 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). (2010, août 6). *Journal officiel de l'Union européenne*, (L207), 1-13. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0040&qid=1695634863655>
- Directive (UE) 2019/1936 du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2019 modifiant la Directive 2008/96/CE concernant la gestion de la sécurité des infrastructures routières. *Journal officiel de l'Union européenne*, (L305), 1-16. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1936&qid=1695635509051>
- Dixit, V.V., Chand, S. & Nair, D.J. (2016). Autonomous vehicles: Disengagements, accidents and reaction times. *PLoS ONE*, 11(12), Article e0168054. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168054>

- Driver assistance technologies. (s.d.). National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). <https://www.nhtsa.gov/equipment/driver-assistance-technologies#61936>
- Drivers let their focus slip as they get used to partial automation. (2020, November 19). IIHS-HLDI. <https://www.iihs.org/news/detail/drivers-let-their-focus-slip-as-they-get-used-to-partial-automation>
- Duff, C. (2015, April 10). Mercedes demonstrates new autonomous car. carsguide. <https://www.carsguide.com.au/car-news/mercedes-demonstrates-new-autonomous-car-31622>
- Euro NCAP. (2020). Assisted driving: Highway assists systems: Test & assessment protocol (Version 1.0). <https://cdn.euroncap.com/media/58813/euro-ncap-ad-test-and-assessment-protocol-v10.pdf>
- European Automobile Manufacturers Association (ACEA). (2019a). Road safety: Safe vehicles, safe drivers, safe roads. https://www.roadsafetyfacts.eu/themes/ACEA-Road-Safety-Facts/img/ACEA_Road_Safety.pdf
- European Automobile Manufacturers Association (ACEA). (2019b). Automated driving: Roadmap for the deployment of automated driving in the European Union. https://www.acea.auto/files/ACEA_Automated_Driving_Roadmap.pdf
- European Automobile Manufacturers Association (ACEA). (2021). Intelligent speed assistance ISA: ACEA feedback and position [Presentation]. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12222-Voertuigveiligheid-technische-voorschriften-en-testprocedures-voor-intelligente-snelheidsondersteuning/F2256534_nl
- European Parliament resolution P9_TA(2021)0407 of 6 October 2021 on the EU road safety policy framework 2021-2030: Recommendations on next steps towards 'vision zero' (2021/2014(INI)). (2021). https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0407_EN.html
- Favaro, F., Eurich, S., Rizvi, S., Agarwal, S., Mahmood, S. & Nader, N. (2019, August 21). What happens when autonomous vehicle technology fails? Mineta. <https://transweb.sjsu.edu/press/What-Happens-When-Autonomous-Vehicle-Technology-Fails>
- Federale Overheidsdienst Mobiliteit en Vervoer (FOD Mobiliteit & Vervoer). 2016. Autonome voertuigen: Gedragscode voor testen in België.
- Feng, S., Yan, X., Sun, H., Feng, Y. & Liu, H.X. (2021). Intelligent driving intelligence test for autonomous vehicles with naturalistic and adversarial environment. *Nature communications*, 12, Article 748. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21007-8>
- Finnish Transport Infrastructure Agency. (s.d.). Warning signs: A3.2: Dangerous descent. <https://vayla.fi/en/transport-network/road-signs/warning-signs#nanogallery/undefined/72157717641261436>
- Garcia Garcia, A., Camacho Torregrosa, F.J., Llopis Castelló, D. & Monserrat del Rio, J.F. (2021). Smart roads classification: A PIARC special report (PIARC Report No. 2021SP01EN). World Road Association (PIARC). <https://www.piarc.org/en/order-library/36443-en-Smart%20Roads%20Classification#:~:text=SAE%20level%200%20applies%20to,position%E2%80%933%20at%20the%20same%20time>
- Geneva Convention on Road Traffic, September 19, 1949, http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/Convention_on_Road_Traffic_of_1949.pdf

- Kalra, N. & Paddock, S.M. (2016). *Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability?* Rand Corporation.
http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR1478.html
- Klem, E. (2022). *Infrastructuur gereed voor slimme voertuigen: Kostenraming aanpassen markering en snelheidsborden* (Royal Haskoning DHV Rapport No. BI7265-MI-RP-221122-1318). Royal HaskoningDHV.
<https://open.overheid.nl/repository/ronl-b347ee1c3f6aeea69f151cba399945c9efcd1cdc/1/pdf/Eindrapport%20Infrastructuur%20gereed%20voor%20slimme%20voertuigen.pdf>
- Light staging and exterior HMI: Tiguan: Visual modality. (2018, October 17). VW Newsroom.
<https://www.volkswagen-newsroom.com/en/evolution-of-light-4261/light-staging-and-exterior-hmi-tiguan-visual-modality-4266>
- Litzler, J-B. (2019, juli 15). Déçue par sa navette autonome, La Défense arrête l'expérience. *Le figaro*. Opgehaald van https://immobilier.lefigaro.fr/article/decue-par-sa-navette-autonome-la-defense-arrete-l-experience_21ebcd88-a4d5-11e9-a13f-3957458a90bd/
- Marr, J., Bengamin, S. & Zhang, A. (2020). *Implications of pavement markings for machine vision* (Austroads Research Report No. AP-R633-20). Austroads.
<https://austrroads.com.au/publications/connected-and-automated-vehicles/ap-r633-20>
- Mercedes-Benz Group. (2023). *The front runner in automated driving and safety technologies*.
<https://group.mercedes-benz.com/innovation/case/autonomous/drive-pilot-2.html>
- Metamorworks. (2017). Communication sans fil de piétons, véhicules et signaux, système de surveillance de trafic [Image]. iStock. https://media.istockphoto.com/id/690704442/fr/vectoriel/communication-sans-fil-de-pi%C3%A9tons-v%C3%A9hicules-et-signaux-syst%C3%A8me-de-surveillance-de-traffic.jpg?s=1024x1024&w=is&k=20&c=FeS2HpGaRwMFnGLHpwwh_qBaWTeqES0dwlFdhwCdUaU=
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (s.d.). *Mobility as a service (MaaS): Multimodaal reisadvies op maat*. <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/mobiliteit-nu-en-in-de-toekomst/mobility-as-a-service-maas>
- Mobileye kicks off AV pilot in Germany. (2023, January 4). *Mobileye*.
<https://www.mobileye.com/news/mobileye-kicks-off-av-pilot-in-germany/>
- Mobileye SuperVision: The bridge to consumer Avs. (2023). *Mobileye*.
<https://www.mobileye.com/solutions/super-vision/>
- National Driving School. (2023). *Roads signs Ireland: Steep decent ahead*.
<https://nationaldrivingschool.ie/road-signs-ireland/>
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). (s.d.). *National statistics*.
<https://www.fars.nhtsa.dot.gov/Main/index.aspx>
- Neumeister, D.M. & Pape, D.B. (2019). *Automated vehicles and adverse weather: Final Report* (FHWA Report No. FHWA-JPO-19-755). US Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA). <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/43772>
- New autonomous driving law enters into force in Germany. (2021, July 29). *European Association of Automotive Suppliers (CLEPA) Mediaroom*.
<https://clepa.eu/mediaroom/new-autonomous-driving-law-enters-into-force-in-germany/>

- Onderzoeksraad voor Veiligheid. (2019). *Wie stuurt?: Verkeersveiligheid en automatisering in het wegverkeer*. <https://www.onderzoeksraad.nl/nl/page/4729/wie-stuurt-verkeersveiligheid-en-automatisering-in-het-wegverkeer>
- Oorzaakanalyse uitgelegd aan de hand van voorbeelden en methodes. (s.d.). *Tableau*. <https://www.tableau.com/nl-nl/learn/articles/root-cause-analysis>
- Partnership for Analytics Research in Traffic Safety (PARTS). (2022). *Real-world effectiveness of model year 2015-2020 advanced driver assistance systems*. https://www.mitre.org/sites/default/files/2022-11/pr%2022-3734-PARTS-real-world-effectiveness-model-year-2015-2020-advance-driver-assistance-systems_0.pdf
- Petrović, Đ., Mijailović, R. & Pešić, D. (2020). Traffic accidents with autonomous vehicles: Type of collisions, manoeuvres and errors of conventional vehicles' drivers. *Transportation research procedia*, 45, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.003>
- Pilet, C., Vernet, C. & Martin, J.-L. (2021). Estimated crash avoidance with the hypothetical introduction of automated vehicles: A simulation based on experts' assessment from French in-depth data. *European transport research review*, 13, Article 65. <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00521-2>
- Pingol, E. (2021, August 20). Level 4 autonomous cars allowed on German roads. *Trend Micro*. https://www.trendmicro.com/en_nz/research/21/h/level-4-autonomous-cars-allowed-on-german-roads.html
- Pinton, E. (2020). As automotive electronics become more complex, the quest is on for economical ways to cover the widest possible range of requirements. *issuu*. https://issuu.com/wtwhmedia/docs/autonomous_and_connected_vehicles_hb_08-20/s/10884425
- Pokorny, P., Skender, B., Bjørnskau, T. & Hagenzieker, M.P. (2021). Video observation of encounters between the automated shuttles and other traffic participants along an approach to right-hand priority T-intersection. *European transport research review* 13, Article 59. <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00518-x>
- Pritchard, J. (2015, May 12). Google acknowledges 11 accidents involving self-driving cars in 6 years. *Global NEWS*. <https://globalnews.ca/news/1992930/google-acknowledges-11-accidents-involving-self-driving-cars-in-6-years/>
- Redant, K. & Van Geelen, H. (2021). *Connected & autonomous vehicles et infrastructure routière: État des lieux et prospective* (Synthèse CRR No. SF 51). Centre de Recherches Routières (CRR). <https://brrc.be/fr/expertise/expertise-aperçu/connected-autonomous-vehicles-infrastructure-routiere>
- 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) no 78/2009, (CE) no 79/2009 et (CE) no 661/2009 du Parlement européen et du Conseil et les règlements (CE) no 631/2009, (UE) no 406/2010, (UE) no 672/2010, (UE) no 1003/2010, (UE) no 1005/2010, (UE) no 1008/2010, (UE) no 1009/2010, (UE) no 19/2011, (UE) no 109/2011, (UE) no 458/2011, (UE) no 65/2012, (UE) no 130/2012, (UE) no 347/2012, (UE) no 351/2012, (UE) no 1230/2012 et (UE) 2015/166 de la Commission (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). (2019). *Journal officiel de l'Union européenne*, L325, 1-40. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32019R2144>

- Règlement Délégué (UE) N° 886/2013 de la Commission du 15 mai 2013 complétant la Directive 2010/40/UE 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 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). (2013, septembre 18). *Journal officiel de l'Union Européenne*, (L247), 6-10. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0886>
- 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 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). (2015, juin 23). *Journal officiel de l'Union européenne*, (L 157), 21-31. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0962&qid=1695636760643>
- Règlement Délégué (UE) 2021/1958 de la Commission du 23 juin 2021 complétant le règlement (UE) 2019/2144 du Parlement européen et du Conseil en établissant des règles détaillées relatives aux procédures d'essai et aux prescriptions techniques spécifiques pour la réception par type des véhicules à moteur en ce qui concerne leurs systèmes d'adaptation intelligente de la vitesse et pour la réception par type de ces systèmes en tant qu'entités techniques distinctes et modifiant l'annexe II dudit règlement (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). (2021, novembre 17). *Journal officiel de l'Union européenne*, (L409), 1-161. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1958>
- Règlement Délégué (UE) 2022/670 de la Commission du 2 février 2022 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 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). (2022, avril 25). *Journal officiel de l'Union européenne*, (L122), 1-16. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R0670&qid=1695636037829>
- Ren, W., Yu, B., Chen, Y. & Gao, K. (2022). Divergent effects of factors on crash severity under autonomous and conventional driving modus using a hierarchical Bayesian approach. *International journal of environmental research and public health*, 19(18), Article 11358. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811358>
- Roadsigns in Norway: What do road signs in Norway mean?: Steep descent ahead. (2023). Rhinocarhire.com. <https://www.rhinocarhire.com/Drive-Smart-Blog/Drive-Smart-Norway/Norway-Road-Signs.aspx>
- SAE International. (2018, December 11). SAE International releases updated visual chart for its "levels of driving automation" standard for self-driving vehicles. *SAE International*. <https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-%E2%80%9Clevels-of-driving-automation%E2%80%9D-standard-for-self-driving-vehicles>
- SAE International. (2021a). SAE J3016 levels of driving automation. https://www.sae.org/binaries/content/assets/cm/content/blog/sae-j3016-visual-chart_5.3.21.pdf
- SAE International. (2021b, July 15). Taxonomy & definitions for operational design domain (ODD) for driving automation systems J3259. *SAE International*. <https://www.sae.org/standards/content/j3259/>
- Staten-Generaal 2021. (2021). *All for zero*. <https://www.all-for-zero.be/nl/staten-generaal/staten-generaal-2/>

- Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV). (2023). *De invloed van het weer* (SWOV Factsheet). <https://swov.nl/nl/factsheet/de-invloed-van-het-weer>
- Sun, R., Nehmad, M., Hu, J., Lawrence, T., Niehaus, J. & Dawkins, T. (2021, June 18). Why autonomous vehicles need a large-system approach to safety. *World economic forum*. <https://www.weforum.org/agenda/2021/06/autonomous-vehicles-safety-large-systems-approach/>
- Tabone, W., de Winter, J., Ackermann, C., Bärghman, J., Baumann, M., Deb, S., Emmenegger, C., Habibovic, A., Hagenzieker, M., Hancock, P.A., Happee, R., Krems, J., Lee, J.D., Martens, M., Merat, N., Norman, D., Sheridan, T.B. & Stanton, N.A. (2021). Vulnerable road users and the coming wave of automated vehicles: Expert perspectives. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 9, Article 100293. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100293>
- Tom Tom. (2022, June 8). Introduction to intelligent speed adaptation [Presentation]. In *Webinar ISA as a stepping stone to autonomous driving*. ITS.be.
- Torchinsky, J. (2022, April 5). Level 3 autonomy is confusing garbage. *The Autopian*. <https://www.theautopian.com/level-3-autonomy-is-confusing-garbage/>
- Treat, J.R., Tumbas, N.S., McDonald, S.T., Shinar, D., Hume, R.D., Mayer, R.E., Stansifer, R.L. & Castellan, N.J. (1979). *Tri-level study of the causes of traffic accidents: Executive summary* (US Department of Transportation Report No. DOT HS- 805 099). US Department of Transportation (US DOT), National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/64993>
- United Nations (UN). (2021, March 4). United Nations agreement concerning the adoption of harmonized technical United Nations Regulations for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these United Nations Regulations. Addendum 156: UN Regulation No. 157: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to automated lane keeping systems (No. E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.156). <https://unece.org/transport/documents/2021/03/standards/un-regulation-no-157-automated-lane-keeping-systems-alks>
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Inland Transport Committee, Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles. (2022, May 30). *Proposal for the 01 series of amendments to UN Regulation No. 157: Automated lane keeping systems*. United Nations (UN), Economic and Social Council. <https://unece.org/sites/default/files/2022-05/ECE-TRANS-WP.29-2022-59r1e.pdf>
- United Nations (UN) General Assembly. (2020, August 31). *Improving global road safety* (United Nations General Assembly Resolution No. A/RES/74/299). https://digitallibrary.un.org/record/3879711/files/A_RES_74_299-EN.pdf
- US Department of Transportation (US DOT), Federal Highway Administration (FHWA). (2023). *Manual on uniform traffic control devices for streets and highways* (Eleventh edition) [Manuscript in preparation]. <https://mutcd.fhwa.dot.gov/>
- Verkeersbord SB250 A3: Gevaarlijke daling. (2023). Verkeersbord.be. <https://www.verkeersbord.be/p/6707/belgische-verkeersborden/a-serie-gevaarsborden/verkeersbord-sb250-a3-gevaarlijke-daling/>

- Viasnoff, E. (2022, June 13). How digital twins will dramatically reduce field testing for autonomous vehicles. *Synopsys: Optical and photonic solutions blog*. <https://blogs.synopsys.com/optical-solutions/2022/06/13/how-digital-twins-will-dramatically-reduce-field-testing-for-autonomous-vehicles/>
- Vienna Convention on Road Signs and Signals, November 8, 1968, <http://live.unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/signalse.pdf>
- Vienna Convention on Road Traffic (November 8, 1968). Article 34 bis: Automated driving, July 14, 2022 [https://en.wikisource.org/wiki/Vienna_Convention_on_Road_Traffic_\(2022\)#Article_34_bis:_Automated_driving](https://en.wikisource.org/wiki/Vienna_Convention_on_Road_Traffic_(2022)#Article_34_bis:_Automated_driving)
- Vlaamse Stichting Verkeerskunde (VSV). (2023). *Autonoom rijden: Punt 3* [Eendaagse opleiding]. <https://www.vsv.be/opleidingen-congressen/opleidingen/autonoom-rijden/>
- VSI Labs [@VSI_Labs]. (2021, November 17). In this scene, the use of high contrast lane markers improves the performance of lane keep assist and automated driving [Tweet]. X. https://twitter.com/VSI_Labs/status/1461018195826028556
- Wang, J., Zhang, L., Huang, Y. & Zhao, J. (2020). Safety of autonomous vehicles. *Journal of advanced transportation*, Article 8867757. <https://doi.org/10.1155/2020/8867757>
- Wittock, N. & Wittock, H. (2021). Autonome motorvoertuigen, wat zou een socioloog daarvan denken? In J. De Bruyne (Ed.), *Autonome motorvoertuigen, een multidisciplinair onderzoek naar de maatschappelijke impact*. Vanden Broele. <https://catalogus.vandenbroele.be/fondscatalogus/845.aspx>
- World Health Organization (WHO) & United Nations (UN) Regional Commissions. (2021). *Global plan: Decade of action for road safety 2021-2030*. <https://www.who.int/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030>
- Xue, S., Irannezhad, E. & Karl, C. (2022). *Minimum physical infrastructure standard for the operation of automated driving. Part A: Infrastructure investment* (Austroads Research Report No. AP-R665A-22). Austroads. <https://austroads.com.au/publications/connected-and-automated-vehicles/ap-r665-22>
- Yoshida, J. (2019, April 10). Disengagements: Wrong metric for AV testing. *EETimes*. <https://www.eetimes.com/disengagements-wrong-metric-for-av-testing/>
- Zhang, Y., Yang, X.J. & Zhou, F. (2021). Disengagement cause-and-effect relationships extraction using an NLP pipeline. *arXiv*, Article 2111.03511. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.03511>



Annexe 1 – Conditions météorologiques (Coventry et al., 2022; Neumeister & Pape, 2019)

L'étude américaine s'est déroulée en trois phases. Il apparaît clairement que l'évolution est constante, mais que des **défis** subsistent. Résultats par phase de l'étude:

Phase 1 de l'étude: la pluie

- Tous les VA testés ont obtenu de bons résultats en *High-Speed Following* (HSF) et la plupart en *Low-Speed Following* (LSF) dans des conditions sèches, mais des pluies fortes ou persistantes ont posé problème à tous les VA.
- Tous les VA ont obtenu de bons résultats pour le maintien de la trajectoire sur des routes droites et sèches et sous une pluie légère, mais les performances ont diminué pour tous les VA sous une pluie forte ou persistante.
- Les performances de certains VA se sont améliorées lorsque la chaussée et les marquages routiers étaient mouillés (peut-être en raison du contraste plus important de l'enrobé plus sombre).

En cas de gel et de légères chutes de neige (phase 1 de l'étude)

- Avec une certaine quantité de givre sur les caméras, aucun des VA n'a effectué de *lanekeeping*. Même avec une couverture d'eau résiduelle (*residual water coverage*), un VA a rencontré des problèmes.
- Avec une fine couche de givre recouvrant le capteur radar, aucun VA n'est en mesure de détecter des objets ou de fournir une assistance. L'un d'entre eux a effectué un contrôle de maintien de la voie et un LSF à l'aide d'un radar de détection de givre et d'une caméra de pare-brise dégagée.
- De légères chutes de neige n'ont pas affecté les manœuvres, mais même une petite quantité de neige fondue sur des parties d'un capteur radar chauffé a affecté les fonctions de l'ACC (*Adaptive Cruise Control*).

Éblouissement par le soleil (phase 1 de l'étude)

- Les performances des VA vont de l'absence d'impact à un fort impact de l'éblouissement par le soleil à partir d'un angle faible dans les essais sur voie.

Phase 2 de l'étude: *Lane Departure* en cas de chute de neige et de neige sur la route

- Lors de cette phase de test, les VA ont semblé «voir» les lignes entre les voies plus rapidement qu'au cours de la phase 1.
- Les VA ont proposé différents niveaux d'assistance en fonction du degré de fiabilité des capteurs.
- Les VA ont utilisé le *Lane Keeping System* avec différentes quantités d'informations – l'un d'eux a eu besoin d'avoir une vue sur les deux marquages de voie, un autre a pu suivre avec un marquage de voie et un troisième a pu suivre avec deux, voire une ligne/un bord contrasté.
- Des petites congères n'ont pas affecté les performances des VA.
- Les VA ont obtenu de meilleurs résultats avec une couverture complète et continue qu'avec une couverture parcellaire/sporadique.

Following manoeuvres en cas de chutes de neige, phase 2 de l'étude

- Aucun des VA n'a eu de difficulté à suivre en cas de chute de pluie ou de neige.
- Si le véhicule de tête s'écartait des marquages de voie visibles dans la neige, un VA a continué à suivre son prédécesseur à courte distance (et s'est donc aussi écarté de la voie indiquée par les marquages) (bien qu'en dehors des conditions testées).

Lane Departure avec éblouissement par le soleil, dans un virage, phase 2 de l'étude

- Certains VA ont obtenu de bons résultats mais ont semblé couper le virage.
- D'autres VA ont abandonné et ont demandé la moitié du temps que le conducteur reprenne les commandes.

Phase 3, avec niveau SAE 2 Lane keeping

- Un VA plus automatisé n'a pas été affecté par les conditions hivernales pour rester sur sa voie.
- Des routes enneigées avec des traces de pneus ont considérablement affecté la capacité d'un VA moins autonome à détecter les limites de la voie et à y rester.
- Les routes verglacées n'ont pas affecté les performances de ce VA.

Phase 3, avec niveau SAE 2, Lane keeping – changement de voie de droite

- Sur les routes enneigées avec des traces de pneus, un VA doté d'un niveau d'autonomie plus élevé a occasionnellement perdu sa localisation lorsqu'il a changé de voie.
- Un VA avec un niveau d'autonomie moins élevé n'a pas pu changer de voie sur des routes enneigées avec des traces de pneus.
- Dans les autres conditions hivernales, les deux VA ont réussi à changer de voie.

Phase 3 de l'étude avec niveau SAE 2, feu vert à un carrefour signalé (manœuvres de passage direct et de tourne-à-gauche)

- Sur les routes enneigées, un VA doté d'un niveau d'autonomie plus élevé a occasionnellement perdu sa localisation lorsqu'il a pris un virage à gauche à une intersection.
- D'autres VA dévient de leur trajectoire dans toutes les conditions météorologiques hivernales.

Détection d'une voiture à l'arrêt (phase 3, avec niveau SAE 2)

- Le VA a détecté la voiture arrêtée et s'est arrêté complètement, quelles que soient les conditions météorologiques, sans désactiver les commandes de direction.



Annexe 2 – Abréviations

ABS	Anti-lock Braking System	KPI	Key Performance Indicator
ACEA	European Automobile Manufacturers Association	LCA	Lane Centering Assistance
AEBS	Advanced Emergency Braking System	LDW	Lane Departure Warning
ACC	Adaptive Cruise Control	LDWS	Lane Departure Warning System
AD	Automated Driving	LKS	Lane Keeping Systems
ADS	Automated Driving System	LOSAD	Level Of Service of Automated Driving
ADAS	Advanced Driver Assistance System	LKA	Lane Keeping Assistance
AEB	Autonomous Emergency Braking	LSF	Low Speed Following
AI	Artificial Intelligence	LV	Light Vehicle
AR	Augmented Reality	MaaS	Mobility as a Service
ARTS	Automated Road Transportation Symposium	MUTCD	Manual on Uniform Traffic Control Devices
AV	Autonomous Vehicle	NDR-tasks	Non Driving Related tasks
CACC	Connected Adaptive Cruise Control	ODD	Operational Design Domain
CAV	Connected and Autonomous Vehicles	OMS	Organisation Mondiale de la Santé
CCAM	Connected Cooperative Automated Mobility	PARTS	Partnership for Analytics Research in Traffic Safety
eHMI	External Human Machine Interfaces	PAEB	Pedestrian AEB
EU	Europese Unie	RTTI	Real Time Traffic Information
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme	RISM	Road Infrastructure Safety Management
FCW	Forward Collision Warning	SAE	Society of Automotive Engineers (US)
FHWA	Federal Highways Agency	SRTI	Safety Related Traffic Information
GNSS	Global Navigation Satellite System	VA	Vehicle Autonome
GPS	Global Positioning System (US)	VIC	Vehicle Infrastructure Collaboration
HLDI	Highway Loss Data Institute	VN	Verenigde Naties
HMI	Human Machine Interface	VRU	Vulnerable Road User
HSF	High Speed Following	V2I	Vehicle to Infrastructure
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety	V2P	Vehicle to Pedestrian
ISA	Intelligent Speed Adaptation	V2X	Vehicle to Everything
ISAD	Infrastructure Support for Automated Driving	V2V	Vehicle to Vehicle
ITS	Intelligent Transport Systems	WHO	World Health Organization



Annexe 3 – Vision des chercheurs sur les «human factors» (Tabone et al., 2021)

- «Nous pourrions voir des infrastructures comme des lumières au sol soutenant l'interaction entre les piétons et les VA. L'infrastructure intelligente étant coûteuse, la question est de savoir qui va payer la note. L'infrastructure intelligente pourrait donc n'être introduite que dans des espaces dédiés et des espaces partagés sélectionnés, qui pourraient devenir plus efficaces grâce à l'investissement. L'infrastructure intelligente permet au VA d'élargir son horizon perceptif et de «voir aux angles» (détection d'objets et/ou d'événements en dehors du champ de vision des capteurs du véhicule). Les *wearables* sont susceptibles d'améliorer la perception qu'ont les piétons des éléments d'infrastructure intelligents. Je pense que c'est quelque chose qui va se produire et qui sera probablement accepté par les usagers de la route si les questions de confidentialité sont traitées correctement.»
- «Il est difficile de prédire quel sera à l'avenir le rôle de l'infrastructure intelligente, car des normes seront nécessaires et de nombreuses instances devront travailler ensemble. La vision européenne mise sur l'existence d'une telle infrastructure à l'avenir, alors que dans d'autres parties du monde et dans certaines branches de l'industrie, l'indépendance est souhaitée, avec des véhicules qui communiquent entre eux sans avoir besoin d'une communication spécifique avec l'infrastructure»
- «Les piétons sont particulièrement vulnérables et les zones piétonnes à forte densité ne sont pas un bon endroit pour les VA, car un algorithme conservateur ralentirait considérablement le mouvement du véhicule. Étant donné que l'intelligence ne doit pas nécessairement se trouver dans le VA même, ces environnements piétons peuvent particulièrement bénéficier d'une infrastructure intelligente. Toutefois, cela pose des défis à la fois politiques et techniques, notamment pour faire fonctionner les routes de manière intelligente pour les véhicules autres que les VA et pour limiter les capacités des capteurs dans différents lieux géographiques. Le modèle de financement constitue un autre problème. En tant que bien public, l'infrastructure nécessiterait vraisemblablement une transformation public-privé pour être améliorée.»
- «La communication des VA avec les piétons devrait se faire par le biais du comportement implicite du véhicule, tandis que les eHMI devraient être utilisées dans les situations ambiguës.»
- «Une autre option consiste à utiliser l'infrastructure pour communiquer avec le piéton, de sorte que la voiture ne doive pas être utilisée comme moyen de communication. L'infrastructure intelligente jouera un rôle crucial dans l'électromobilité future. Les voitures silencieuses ne devraient pas être équipées de dispositifs sonores supplémentaires, car cela irait à l'encontre de l'idée de voitures silencieuses. Une meilleure solution consiste à utiliser l'infrastructure pour alerter les gens via des appareils tels que les smartphones. L'infrastructure jouera également un rôle clé dans la séparation du trafic. Cependant, il est très coûteux de séparer les différents modes de déplacement, tels que les VA des voitures à commande manuelle, les cyclistes et les piétons.»

- «eHMI: comme l'infrastructure intelligente, les eHMI peuvent contribuer à la sécurité et à l'acceptation des VA. Nos recherches montrent que les eHMI sont particulièrement utiles à faible vitesse, quand les piétons ont le temps d'interpréter les signaux des eHMI et d'y réagir. À plus grande distance, la reconnaissance des eHMI pose problème. Nos expériences ont montré des différences étonnamment faibles entre des types d'eHMI fondamentalement différentes en termes d'acceptation et d'effet sur le comportement, et les participants ont rapidement appris à utiliser les eHMI. Il est possible que nos participants aient simplement réagi au changement de couleur, de texte ou de symbole de l'eHMI. Ce changement d'eHMI a toujours été accompagné d'une communication implicite, ce qui reste un facteur important.»
- «Je ne suis pas optimiste en ce qui concerne l'infrastructure routière intelligente, car elle constitue un sérieux défi en termes de coût et de compatibilité ascendante. Un feu de signalisation virtuel peut fonctionner correctement pour les véhicules qui sont équipés [pour], mais sera invisible pour les véhicules [non équipés d'une telle intelligence]. Il serait donc difficile d'inciter les gens à investir dans ce domaine. Je pense que le plus gros défi serait de savoir comment communiquer avec les piétons. En cas de communication virtuelle, cela rend obligatoire l'équipement du piéton pour qu'il puisse envoyer des signaux à l'infrastructure et traduire les signaux reçus. C'est possible dans un pays où le niveau de vie est élevé et où tout le monde peut être équipé de lunettes intelligentes. Mais dans d'autres pays, il existe des disparités économiques, ce qui signifie qu'une grande partie de la population n'a pas accès à tous les types d'appareils intelligents. Les infrastructures non intelligentes peuvent être une façon plus productive d'avancer. Les *best practices* de la conception d'infrastructures qui aident actuellement les conducteurs et les piétons à circuler sur les routes peuvent également aider les piétons et les VA à interagir en toute sécurité.»

Les membres ressortissants peuvent commander gratuitement les publications du CRR. Cette publication est disponible au format électronique uniquement.

Plus d'informations:

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

Commander cette publication:

publication@brrc.be

Référence : SF 52 – Prix: 14 € (hors TVA 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
SF 51	Connected & Autonomous Vehicles et infrastructure routière - Etat des lieux et prospective	14,00 €
SF 50	Recyclage des plastiques dans les enrobés – Une analyse	12,00 €
SF 49	Synthèse des connaissances et pratiques à propos des chantiers de nuit	12,00 €
SF 48/14	Instruments pour les gestionnaires routiers	Gratuit
SF 47/10	Manuel relatif à la réalisation pratique des passages pour piétons	Gratuit
SF 46/09	La route: acteur de la mobilité durable	14,00 €
SF 45/09	Gestion de la sécurité des infrastructures routières: d'une politique curative à une politique préventive	14,00 €
SF 44/07	Véhicules plus longs et plus lourds – Rapport final	15,00 €

■ Autres collections CRR

-  Compte rendu de recherche
-  Méthode de mesure
-  Recommandations



Centre de recherches routières
Ensemble pour des routes durables

Établissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947
Boulevard de la Woluwe 42
1200 Bruxelles
Tel. : 02 775 82 20
www.brrc.be

L'amélioration de la sécurité routière est l'une des principales raisons qui poussent les décideurs politiques et les entreprises à se tourner vers la mobilité autonome. L'émergence progressive de la mobilité autonome en tant qu'alternative valable aux modes de déplacement plus traditionnels est un défi qui offre des opportunités pour un système de circulation plus sûr.

Dans le présent rapport, nous décrivons cette promesse en matière de sécurité routière, et nous la mettons en parallèle avec d'autres initiatives en abordant les risques émergents en termes de sécurité routière. Le rapport propose une vue d'ensemble des informations générales pertinentes, des éléments de recherche et d'essai, de la politique de sécurité et des objectifs de la sécurité routière. Il permet de mieux appréhender la composante «infrastructure».

Ces connaissances guident les gestionnaires routiers pour faire des choix bien réfléchis, qui s'imposent à court et à moyen terme.

Mots clés ITRD

0173 - Politique - 0698 - Déplacement (trajet) - 1055 - Infrastructure (transport) - 1145 - Mode de transport - 1244 - Véhicule autonome - 1665 - Sécurité - 8735 - Système de transport intelligent - 8743 - Aide électronique à la conduite - 8771 - Guidage d'itinéraire - 9105 - Mobilité (pers)