

Rapport

Rapport bibliographique sur les systèmes de vision utilisés dans les systèmes d'aide à la conduite et les dispositifs bord de voie

Mai 2016

C15LC0067-01

Rapport établi par : Pierre Duthon

Vu et vérifié par : Frédéric Bernardin

Décembre 2015	Rev0	Première version du rapport
Mai 2016	Rev1	Deuxième version du rapport

Récapitulatif de l'affaire

Client : DGITM-92055
LA GRANDE ARCHE PAROI SUD PUTEAUX
92055 PARIS LA DEFENSE CEDEX

Objet de l'étude : Rapport bibliographique sur les systèmes de vision utilisés dans les systèmes d'aide à la conduite et les dispositifs bord de voie -

Résumé de la commande : L'opération de recherche spécifique incitative COMET prévoit dans son cahier des charges l'étude des systèmes de vision artificielle en conditions météorologiques dégradées (axe 3), et plus particulièrement un travail bibliographique.

Référence dossier : Affaire C15LC0067-01

Offre : Pré-programmation 2015 - Action A140444

Accord client : Action A140444 validée pour la pré-programmation 2015

Communicabilité : ☒ Libre (avec acceptation préalable du commanditaire dans le contrat)
☐ Contrôlée (communiquée uniquement avec l'autorisation du commanditaire à posteriori)
☐ Confidentielle (non référencée dans IsaWeb)

Chargé d'affaire : Pierre Duthon – DLCF – Groupe Construction - Mobilité
Tél. 04 73 42 10 69 / Fax 04 73 42 10 01
Courriel : pierre.duthon@cerema.fr

Mots Clés : vision artificielle, sécurité, mobilité, aide à la conduite, dispositif bord de voie

ISRN :

Liste des destinataires

Luc Mathis	DGITM-92055, LA GRANDE ARCHE PAROI SUD PUTEAUX, 92055 PARIS LA DEFENSE CEDEX	1 exemplaire du rapport

Conclusion – Résumé

La présente bibliographie passe en revue les systèmes de transports intelligents routiers par un référencement des principaux projets de recherche, d'innovation et d'expérimentation à l'échelle européenne et mondiale. Elle s'intéresse également aux capteurs employés dans un tel contexte, sur le véhicule et l'infrastructure. Les avantages et les limites de chaque capteur ont pu être identifiés au travers des retours d'expérience des chercheurs et des comparatifs existants dans la littérature. Le capteur idéal n'existant pas aujourd'hui, la fusion de données, et non la simple juxtaposition, est essentielle. Le couple de capteurs actuellement le plus présent est composé de radars et de caméras du domaine visible. Demain, ces deux capteurs seront probablement complétés par des LIDARS et des caméras infrarouge. La bibliographie montre l'importance des caméras et établit les conditions météorologiques dégradées comme principal point faible.

Clermont-Ferrand, le

La Directrice du Département Laboratoire
de Clermont-Ferrand

Dominique DELOUIS

Sommaire

1 - Introduction.....	6
2 - Deux familles d'applications pour les systèmes de transport intelligents.....	8
2.1 - Les applications embarquées : ADAS.....	10
2.1.1 - Les niveaux d'automatisation.....	10
2.1.2 - La conduite coopérative : un cas particulier.....	10
2.1.3 - Les applications embarquées commercialisées.....	11
2.2 - Les applications liées à l'infrastructure : DAI et TDC.....	14
3 - Historique des systèmes de transport intelligents.....	17
3.1 - Projets, financements et partenariats fédérateurs.....	20
3.1.1 - Europe.....	20
3.1.2 - États-unis.....	25
3.1.3 - Japon.....	26
3.2 - Véhicule autonome : les projets marquants.....	28
3.3 - Véhicules autonomes : les grandes démonstrations.....	33
4 - Les capteurs existants en contexte routier.....	37
4.1 - Les capteurs pour les STI en général.....	37
4.1.1 - Introduction.....	37
4.1.2 - Principales familles de capteurs.....	38
4.1.3 - Conclusion.....	42
4.2 - Étude spécifique des capteurs de vision passive.....	44
4.2.1 - Les atouts des caméras (vision passive, domaine du visible).....	44
4.2.2 - Limites des autres capteurs de vision.....	45
4.2.3 - Quelques points d'amélioration pour les caméras.....	50
4.2.4 - Conclusion.....	54
5 - Les algorithmes de vision artificielle en contexte routier.....	55
5.1 - Introduction.....	55
5.1.1 - Les principaux algorithmes existants.....	55
5.1.2 - Les états de l'art existants.....	55
5.1.3 - Cadre de la recherche bibliographique.....	59
5.2 - Surveillance du trafic : caméra fixe.....	60
5.2.1 - Détection et suivi des véhicules.....	62
5.2.2 - Détection et suivi des piétons.....	63
5.3 - Conduite assistée ou automatisée : caméra embarquée.....	63
5.3.1 - Détection d'obstacles : général.....	64
5.3.2 - Détection d'obstacles : véhicules.....	64
5.3.3 - Détection d'obstacles : piéton.....	65
5.3.4 - Détection de signalisation verticale.....	66
5.3.5 - Suivi de voie.....	68
5.3.6 - Localisation visuelle.....	69
6 - Conclusion et perspectives.....	71

1 - Introduction

Les systèmes routiers (véhicule et infrastructure) deviennent progressivement intelligents et communicants, on parle alors de Systèmes de Transport Intelligents (STI). Ces STI ont vu le jour dans les années 1970 grâce au développement des ordinateurs [73]. Le développement des STI est en fait poussé par plusieurs facteurs : le coût des vies humaines perdues dans les accidents de la route, l'augmentation des volumes de trafic, l'augmentation de la puissance de calcul, et l'amélioration de la recherche dans le domaine de la vision artificielle [118]. Les solutions proposées par les STI reposent nécessairement sur une perception (capteur) et une analyse (algorithme) de l'environnement [18]. Cette perception passe par l'utilisation de systèmes de vision artificielle variés. Un système de vision artificielle est constitué d'un capteur de vision et d'un algorithme d'analyse. Les capteurs de vision (caméras, radars, LIDAR) sont donc de plus en plus présents en contexte routier. Ces derniers, installés sur les infrastructures, servent à la sécurité et à l'optimisation des déplacements. Les équipementiers automobiles annoncent aussi leur développement dans les prochaines années sur les véhicules. Les systèmes de vision artificielle permettront alors la détection et la compréhension de l'environnement du véhicule pour des systèmes d'aide à la conduite avancés (ADAS) dans un premier temps puis pour la conduite autonome. Une fois de plus, les enjeux de sécurité et de mobilité sont visés. Ce rapport propose donc un état de l'art sur les systèmes de vision artificielle en contexte routier.

Un enjeu "sécurité routière"

Dans le monde, 1,2 million de personnes meurent annuellement sur les routes et 50 millions sont blessées d'après l'organisation mondiale de la santé en 2004 [67]. Les accidents de la route sont ainsi l'une des causes majeures de décès dans le monde. Or, d'après une étude du département des transports américain (USDOT), 91% des collisions frontales sont dues à une erreur humaine [132]. En France, il y a eu selon l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR) 58 191 accidents corporels et 3 384 tués sur les routes en 2014 [92]. Le coût financier induit par ces accidents représenterait 1 à 3% du PIB (Produit Intérieur Brut - *GDP, Gross Domestic Product*) mondial [32]. Face à ces chiffres, les constructeurs automobiles, les gestionnaires des routes ou encore les États mettent en place des procédures d'amélioration de la sécurité. Les procédures d'ordre technique consistent à optimiser les véhicules et les infrastructures. En effet, l'analyse des accidents porte toujours sur le triptyque : usager, véhicule, infrastructure. Augmenter la sécurité sur la route par la technique comporte deux aspects : d'abord limiter le risque que l'accident se produise, et ensuite travailler sur la structure et le design des véhicules pour limiter les dégâts si l'accident se produit [67]. Le premier objectif visé par les STI est donc que le véhicule et l'infrastructure permettent de prévenir l'utilisateur d'une situation dangereuse.

Un enjeu "mobilité et gestion du trafic"

L'aspect sécurité n'est pas le seul à justifier une évolution des systèmes de transport vers les STI. En effet, les STI permettent aussi une meilleure gestion du réseau, et a fortiori, une amélioration de la mobilité. Cette évolution de la mobilité aboutit par la même occasion à une réduction des pollutions engendrées par les déplacements et donc à réduire leur impact sur l'environnement. L'automatisation permet aussi une amélioration de l'efficacité des systèmes mécaniques ce qui présente une fois encore un intérêt environnemental. Pour les constructeurs,

les systèmes intelligents équipant peu à peu les véhicules, permettent aussi une augmentation du confort à bord. Le conducteur porte ainsi plus d'attention à sa conduite et est moins sujet au stress. Les exploitants des infrastructures peuvent obtenir par ces nouveaux systèmes, intelligents et communicants, de nombreuses informations sur le réseau en temps réel. Ces informations, très précieuses, permettent une meilleure gestion de l'infrastructure à long terme. Mais elles permettent aussi d'optimiser la mobilité en temps réel. A titre d'exemple, l'État français confie en 2014 une mission "Véhicules et transports du futur" à l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) [1] dans le but de limiter les émissions de gaz à effet de serre par le développement de nouvelles solutions de transport. Le transport est en effet en France le premier secteur d'émissions de CO₂ [1].

L'apport de la connaissance sur les conditions météorologiques

Connaitre les conditions météorologiques en temps réel et leur impact sur le trafic et les systèmes est primordial pour répondre à ces deux enjeux. Les conditions météorologiques peuvent en effet entraîner, lorsqu'elle se dégradent, des congestions ou des accidents. Les conditions météorologiques dégradées peuvent aussi entraîner des dysfonctionnement dans les systèmes de vision artificielle des STI. L'étude des conditions météorologiques dégradées est donc un réel enjeu en vue d'une amélioration de la sécurité routière et de la mobilité.

ORSI COMET

L'opération de recherche spécifique incitative (ORSI) COMET vise ainsi à fournir des outils pour améliorer l'exploitation de la route en conditions météorologiques dégradées. Plus particulièrement, l'axe 3 de l'ORSI se concentre sur l'étude des systèmes de vision artificielle en conditions météorologiques dégradées. C'est dans ce cadre que ce rapport s'inscrit. Il vise ainsi à donner un état de l'art général des systèmes de vision artificielle et de leurs applications en contexte routier, avant de se concentrer sur le cas particulier des caméras qui sont les plus présentes et les plus sensibles aux condition météorologiques dégradées actuellement.

Plan

Les applications utilisant des systèmes de vision artificielle sur la route sont très nombreuses et variées. Elles sont de plus en plein développement. Afin de mieux cerner le sujet, il est donc important de commencer par recenser quelles sont les solutions concrètes et les applications présentes sur le marché qui rendent les transports intelligents aujourd'hui. Cette présentation se décline selon deux points de vue : à bord des véhicules et sur l'infrastructure. Une fois les applications de la vision artificielle en contexte routier présentées, il est intéressant de comprendre leurs origines et les développements dont elles ont fait l'objet. Ainsi, un historique centré sur les STI utilisant des systèmes de vision artificielle est proposé. Les équipes, les démonstrations, et les projets fédérateurs y sont présentés. Cette recherche bibliographique complète a permis d'identifier les technologies (capteurs) rencontrées dans le contexte routier. Dans un premier temps l'ensemble des capteurs rencontrés en contexte routier sont présentés. Après avoir montré l'emploi massif des capteurs de vision, dit aussi extéroceptifs, les avantages et les limites de ces derniers sont répertoriés plus en détail. Une analyse des capacités de chaque technologie permet finalement de montrer l'intérêt d'utiliser la vision passive (caméra). Après avoir présenté l'ensemble des applications et des capteurs de manière général, seuls les systèmes de vision utilisant une ou plusieurs caméras seront donc étudiés. Les algorithmes de vision artificielle passive (caméra) les plus utilisées dans le contexte routier seront finalement

décrits et analysés.

Perspective

Ce travail aboutit donc à un focus sur les méthodes de vision artificielle faisant appel à des caméras. Il permet ainsi de cerner quels sont les points sensibles et les éléments courants dans ces algorithmes. Parmi eux, les descripteurs d'images sont particulièrement critiques. Ce travail bibliographique sera donc complété par un focus sur l'analyse des descripteurs d'images les plus rencontrés en contexte routier. Il sera ensuite suivi d'une phase de mesure de la robustesse de ces descripteurs en conditions météorologiques dégradées.

2 - Deux familles d'applications pour les systèmes de transport intelligents

Définition.

Les STI englobent toutes les applications des technologies de l'information et de la communication dans le contexte routier, que ce soit sur l'infrastructure ou à bord des véhicules. Les STI comprennent de nombreux aspects : électronique, contrôle, communications, acquisition, robotique, traitement du signal ou encore systèmes d'information [44]. Ils reposent sur les principes suivants : une interface homme véhicule efficace et sophistiquée, des capacités des véhicules accrues par des systèmes embarqués et une communication entre véhicules et avec une infrastructure intelligente [6].

Deux modalités rencontrées.

Les STI se déclinent selon deux modalités majeures :

Les systèmes embarqués à bord du véhicule. Les véhicules sont à présent équipés de nombreux systèmes d'aide à la conduite, les DAS (*Driver Assistant System*), parfois aussi appelés DSS (*Driver Support Systems*). Ces systèmes sont de plus en plus évolués et les dernières générations, qui interviennent localement sur les commandes du véhicule, sont à présent nommées ADAS (*Advanced Driver Assistant System*). Dans le cas de la conduite complètement autonome, les systèmes seront alors dénommés par le sigle ADS (*Autonomous Driving System*). Parmi ces systèmes d'assistance, il existe des systèmes actifs (avec prise de décision automatique et contrôle du véhicule) et des systèmes passifs (qui alertent uniquement le conducteur par un signal sonore ou visuel). Dans le second cas, le terme AWS (*Advance Warning System*) est souvent utilisé.

Afin de pouvoir être utilisés correctement, il est indispensable que les ADAS bénéficient d'une interface homme machine (HMI) particulièrement bien pensée. De plus en plus autonomes et complexes, les réglages et les décisions des véhicules doivent en effet être compris facilement par le conducteur afin de ne pas détourner son attention de la route.

Avant de continuer, il est important de préciser qu'il ne faut pas tomber dans le phénomène *Google Car* [59]. La voiture de demain ne sera en effet probablement pas immédiatement autonome. En revanche, il existe déjà sur les routes des systèmes basés sur la vision qui prennent localement le contrôle du véhicule en conditions de congestion du trafic (*Traffic Jam Assist* par exemple). De plus, la conduite complètement automatisée sur

certaines sections de route (autoroutes par exemple) est prévue par de nombreux équipementiers et constructeurs automobiles (Valeo *Cruise4U*, tests de Ford aux États-Unis, Mercedes Classe E). Des véhicules automatisés pourraient d'abord fonctionner en convoi avant d'être déployés comme des systèmes individuels [21] [56]. Deux points de vue s'opposent donc concernant les véhicules autonomes. L'innovation de rupture consiste à tenter de produire et commercialiser un véhicule complètement autonome, toutes conditions incluses dès le départ (choix de la *Google Car*). L'innovation incrémentielle consiste à progressivement ajouter des modules d'assistance, puis d'autonomie, d'abord dans des conditions particulières, pour généraliser petit à petit ces systèmes et se diriger graduellement vers une conduite autonome en toutes conditions (choix des constructeurs et des équipementiers automobiles).

Au delà des aspects techniques, du temps est aussi nécessaire pour que le public accepte de nouveaux systèmes complètement autonomes. Les aspects législatifs (assurance et responsabilité) devront aussi être éclaircis concernant le véhicule autonome. Par exemple, la Convention de Vienne est pour le moment un obstacle pour le véhicule autonome en Europe. Elle spécifie en effet clairement que le conducteur est le seul responsable du comportement de son véhicule en permanence. Même si ce frein était levé, la question de la responsabilité se poserait. En cas d'accident d'un véhicule autonome, est-ce que le responsable est le propriétaire du véhicule, le gestionnaire de l'infrastructure, le constructeur du véhicule, le développeur du système de conduite autonome, l'équipementier qui fournit les capteurs ? Cette question capitale de responsabilité doit être levée d'un point de vue législatif avant de pouvoir envisager le véhicule autonome. Elle est cependant délicate et nécessite peut-être de repenser complètement le schéma actuel des assurances. Enfin, le coût de l'instrumentation à bord des véhicules reste un critère déterminant. C'est pour ces différentes raisons que les applications actuellement commercialisées restent des ADAS [28] et que l'hypothèse de l'innovation incrémentielle reste la plus plausible.

Les systèmes installés sur l'infrastructure. De nombreux capteurs sont présents sur les axes les plus importants. Ces capteurs, couplés à des systèmes intelligents, permettent à la fois la détection automatique d'incidents (DAI, AID en anglais) mais aussi d'extraire en temps réel des données sur le trafic (*Traffic data collection* - TDC). Ce second volet permet d'optimiser les déplacements et d'améliorer la mobilité, le terme d'*Intelligent Traffic Management* (ITM) est alors employé. Pour être efficace, l'infrastructure doit bien évidemment être communicante pour transmettre les informations recueillies aux usagers de la route (par les panneaux à messages variables (PMV) ou la radio par exemple), au gestionnaire mais aussi aux véhicules. Elle se nourrit aussi en retour des informations récoltées par les véhicules (projet français SCOOP@F par exemple).

Ces deux modalités d'applications (infrastructure et véhicule) ne sont pas opposées. Au contraire, l'amélioration de la sécurité passe par un développement des systèmes dans les véhicules mais aussi sur l'infrastructure [51]. Par exemple, les obstacles potentiels ne sont pas toujours visibles depuis le véhicule et peuvent être mieux anticipés grâce à une information provenant de l'infrastructure [51]. La partie 2.1.3 récapitule les principaux DAS et ADAS existants sur les véhicules commercialisés en 2015. La partie 2.2 référence quant à elle les principales fonctions des STI installées sur les infrastructures.

2.1 - Les applications embarquées : ADAS

2.1.1 - Les niveaux d'automatisation

Avant de répertorier les ADAS commercialisées à bord des véhicules, il est intéressant de décrire les niveaux d'automatisation de la SAE (*Society of Automotive Engineers*). Cette description permettra un classement des systèmes rencontrés : ils ne sont en effet pas tous au même niveau d'automatisation. La SAE a édité une liste des niveaux d'automatisation des véhicules [106]. Cette liste, présentée sur la figure 1 est donc fondée sur une vision de l'évolution des systèmes autonomes de type incrémentielle. Elle part d'un niveau d'automatisation nulle (niveau 0) pour aboutir à un niveau d'automatisation complète (niveau 5). Les premiers niveaux d'automatisation (1 et 2) sont des niveaux pour lesquels le conducteur donne le contrôle au véhicule dans des cas précis (sur autoroute par exemple) et dans des conditions spécifiques (par beau temps par exemple). C'est le conducteur qui juge alors de l'opportunité d'activer ou non le système automatique. Un cap important est franchi au niveau 3. Le véhicule devient alors capable de décider lui-même s'il prend le contrôle du véhicule ou s'il laisse ce dernier au conducteur. Les cas d'activation du mode automatique sont alors toujours dans des conditions très spécifiques. Le niveau 4 inclut le contrôle du véhicule dans des cas spécifiés (sur autoroute par exemple) mais pour toutes les conditions potentiellement rencontrées. C'est donc la dernière étape avant le niveau 5 correspondant à une automatisation complète.

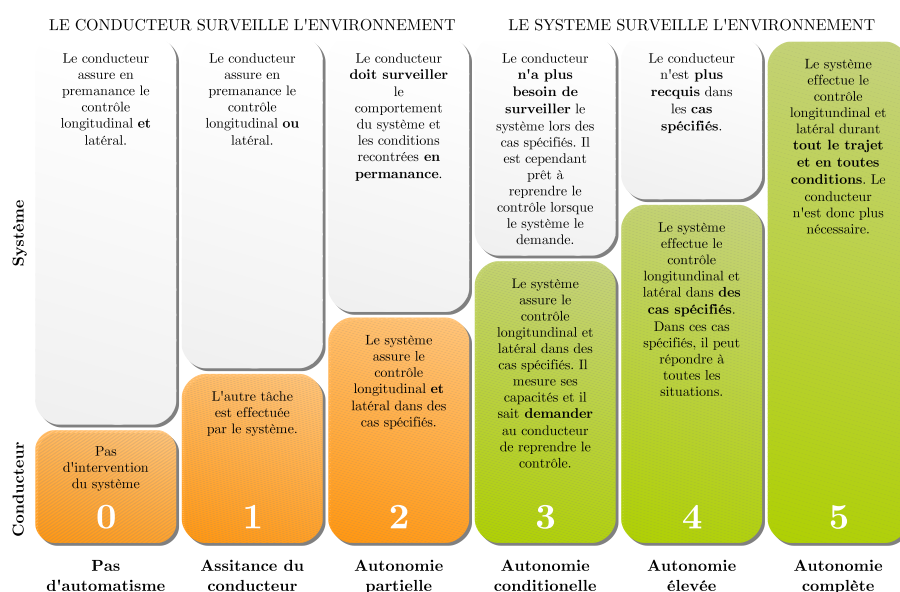


Figure 1 – Les niveaux d'automatisation proposés dans la SAE (Norme J3016) [106].

2.1.2 - La conduite coopérative : un cas particulier

La conduite coopérative ou conduite en flotte (ou *platooning* en anglais) consiste à faire rouler automatiquement les véhicules en file resserrée à grande vitesse (sur autoroute par exemple). La distance de sécurité réduite par la coopération permet ainsi d'augmenter la capacité de la route. La coopération permet aussi de limiter les consommations en carburant par anticipation des véhicules suiveurs [48]. Pour la conduite coopérative, les véhicules communiquent entre

eux et avec l'infrastructure. Le véhicule leader n'est pas nécessairement autonome. Actuellement, la conduite coopérative est considérée comme un mode supplémentaire améliorant l'efficacité d'un véhicule déjà partiellement autonome. Comme ce mode de conduite automatique requiert des conditions spécifiques, et qu'il n'est pas envisageable de renouveler tout le réseau et tout le parc de véhicules, les véhicules devront dans tous les cas pouvoir être capable de se déplacer de manière autonome et non coopérative [12]. La conduite coopérative est citée ici en tant que tremplin pour le véhicule autonome, même si des systèmes commercialisés de ce type n'existent actuellement pas. Elle n'est pas en elle-même un système d'automatisation du véhicule ce qui explique qu'elle ne soit pas insérée dans la partie suivante.

2.1.3 - Les applications embarquées commercialisées

Les systèmes intelligents embarqués sont nombreux et variés. Ces systèmes vont de simples aides à la conduite jusqu'à des systèmes prenant le contrôle longitudinal et transversal du véhicule. Les premiers systèmes embarqués d'assistance utilisant l'électronique, comme l'ABS, sont apparus dans les années 1980. Ils ont permis l'amélioration de la fiabilité de l'électronique et le développement de nombreux capteurs. Bien que ces systèmes prennent le contrôle du véhicule, ils ne font que modifier le comportement du véhicule pour mieux répondre à la demande du conducteur. Ils ne prennent donc pas de décisions quant à la trajectoire du véhicule et ne peuvent donc pas être considérés comme des systèmes de contrôle automatique du véhicule. Les premiers systèmes prenant le contrôle partiel du véhicule (niveau 1 de la SAE) sont apparus dans les années 2000 avec l'ACC (*Adaptive Cruise Control*, régulateur de vitesse adaptatif). Depuis les années 2010, le niveau d'automatisation 2 de la SAE est présent sur les routes avec les applications *Park Assist* et *Traffic Jam Assist*. L'ensemble des systèmes sont récapitulés dans le tableau 1. Leur année de commercialisation et leur niveau d'automatisation SAE sont donnés dans ce tableau. Dans ce dernier, ils sont classés d'abord par niveau d'automatisation et ensuite par ordre de commercialisation. Leur principe est détaillé dans la liste suivante.

Caméra de recul. Ce système permet d'aider le conducteur à détecter les objets se trouvant derrière son véhicule. Un système basé sur un capteur radar ou ultrason et avec émission d'un signal sonore existe aussi en tant qu'assistance pour la marche arrière. Bien que cette aide à la conduite soit simple, elle permet déjà la mise en œuvre et le test de capteurs qui sont utilisés pour des systèmes d'automatisation.

Lane Departure Warning (LDW). Appelé aussi *Lane Departure Warning System* (LDWS), *Lane-Change Decision-Aid System* (LCDAS) ou avertisseur de sortie de voie. Ce système permet d'alerter le conducteur lorsqu'il s'apprête à changer de voie non volontairement. L'alerte peut être visuelle, sonore ou par vibration du volant. Il permet de prévenir les accidents causés par la somnolence. Ces systèmes sont basés sur l'estimation du temps disponible avant de traverser les bandes de marquage : le *Time for Lane Crossing* (TLC). Ils sont souvent basés sur des caméras ou des détecteurs lumineux positionnés sur les cotés du véhicule.

Forward Collision Warning (FCW). Aussi rencontré sous la dénomination *Forward Collision Alert* (FCA) ou avertisseur d'obstacles et de collisions. Ce système donne une alerte (sonore ou visuelle) au conducteur lorsque le temps avant collision (TTC - *Time To Contact*) avec un obstacle passe en dessous d'un certain seuil. Cela permet au conducteur qui n'aurait pas vu un obstacle de réagir encore à temps pour limiter les dégâts. En plus d'alerter le conducteur, le FCW permet aussi de pré-charger les freins afin que le freinage soit plus intense lors de la prise de décision du conducteur. Ce système est un

premier pas vers le freinage automatique d'urgence (AEB).

Traffic Sign Recognition (TSR). Appelé aussi *Road Sign Recognition* (RSR) ou *Traffic Sign Detection and Recognition* (TSDR). Ce système permet la reconnaissance des signalisations verticales présentes sur le trajet emprunté. Il permet par exemple de mémoriser la vitesse maximale autorisée sur le tronçon pour aider le conducteur qui aurait pu omettre un panneau. Ce type de système est basé sur une ou plusieurs caméras. A terme, ce système est indispensable pour un contrôle longitudinal complètement autonome.

Impairment Warning (IW). Ce système est un avertisseur d'affaiblissement. A partir du comportement latéral du véhicule, il permet d'alerter un conducteur qui serait en train de s'endormir. Il vérifie pour cela que les commandes transmises au volant ne font pas de va-et-vient lents, typiques de l'endormissement. Certains systèmes en développement utilisent aussi une caméra tournée vers le conducteur avec une reconnaissance des expressions faciales.

Curve Speed Warning (CSW). Appelé aussi système d'alerte de vitesse excessive en approche de virage. Ce système alerte le conducteur si sa vitesse est trop élevée par rapport à la courbe vers laquelle il se dirige. L'alerte est donnée assez en amont pour que le conducteur ait le temps de prendre une mesure de correction. Ce système prend aussi en compte les conditions météorologiques dégradées comme la pluie (par un capteur embarqué sur le véhicule). Ce type de système utilise une carte digitale contenant des informations sur la vitesse et une localisation GPS.

Speed Regulation System (SRS). Ce système, appelé régulateur de vitesse en français, permet de maintenir le véhicule à une vitesse constante, choisie par le conducteur. A l'inverse du régulateur de vitesse adaptatif (ACC), cette vitesse n'est pas modulée à l'approche d'un autre véhicule. Ainsi, ce système ne peut pas être considéré comme un système de contrôle automatique du véhicule car la vitesse est bien choisie par le conducteur à tout moment.

Acceleration Slip Regulation (ASR). Aussi appelé anti-patinage, TCS (*Traction Control System*) ou ASC+T (*Automatic Stability Control plus Traction*). Ce système permet de limiter ponctuellement l'accélération pour éviter le phénomène de patinage.

ABS (Antiblockiersystem). Appelé système anti-Blocage des roues en français, ce système permet de relâcher temporairement le freinage des roues lorsqu'une situation de dérapage commence. Ainsi, le dérapage est limité et la distance de freinage est minimisée.

Electronic Stability Program (ESP) . Appelé électrostabilisateur programmé en français. Ce système permet d'améliorer la tenue de route du véhicule en virage. Si le véhicule commence à déraiper dans un virage, l'ESP permet de corriger la trajectoire en freinant certaines roues.

Automatic High-beam Control (AHC). Ce système permet de passer des feux de routes aux feux de croisement (et inversement) automatiquement. Il détecte les usagers qui arrivent en face pour abaisser les feux lors du croisement. Il est basé sur un capteur photosensible voire une caméra (qui peut être de très basse résolution).

Adaptive Front Lighting (AFL). Ce système consiste à adapter l'orientation du faisceau lumineux des feux pour suivre la courbe de la route. Ce système permet ainsi d'améliorer l'appréhension des virages la nuit.

Essuie-glaces automatiques. Ce système permet d'allumer automatiquement les essuie-glaces lorsque la pluie tombe. Il permet de plus de faire varier la vitesse de balayage en fonction de l'intensité de pluie. La plupart de ces systèmes reposent sur un capteur situé sur le

rétroviseur central coté pare-brise. Ce capteur émet généralement de la lumière sur le pare-brise et en mesure le retour. Cela permet de déterminer la quantité d'eau présente sur le pare-brise.

Sigle	Décennie commerc.	Type de système	Contrôle véhicule	Contrôle trajectoire	Niv. SAE
Caméra/Radar de recul	1990	DAS	Non		0
<i>Lane Departure Warning</i>	2000	ADAS	Non		0
<i>Forward Collision Warning</i>	2000	ADAS	Non		0
<i>Traffic Sign Recognition</i>	2000	ADAS	Non		0
<i>Impairment Warning</i>	2010	ADAS	Non		0
<i>Curve Speed Warning</i>	2010	ADAS	Non		0
<i>Automatic High-beam Control</i>	1960	DAS	Oui	Non	0
<i>Speed Regulation System</i>	1960	DAS	Oui	Non	0
<i>Acceleration Slip Regulation</i>	1980	DAS	Oui	Non	0
ABS	1980	DAS	Oui	Non	0
ESP	1990	DAS	Oui	Non	0
<i>Adaptive Front Lighting</i>	2000	ADAS	Oui	Non	0
Essuies glaces automatiques	2000	ADAS	Oui	Non	0
<i>Intelligent Headlight Control</i>	2010	ADAS	Oui	Non	0
<i>Adaptive Cruise Control</i>	2000	ADAS	Oui	Long.	1
<i>Blind Spot Information System</i>	2000	ADAS	Oui	Lat.	1
<i>Lane Keeping System</i>	2010	ADAS	Oui	Lat.	1
<i>Autonomous Emergency Braking</i>	2000	ADAS	Oui	Long.	1
<i>Park Assist</i>	2000	ADAS	Oui	Tout	2
<i>Traffic jam assist</i>	2010	ADAS	Oui	Tout	2

Tableau 1 – Principaux systèmes d'aide à la conduite rencontrés sur le marché automobile en 2015.

Intelligent Headlight Control (IHC). Appelé aussi *Adaptive Headlight Control (AHC)*. Ces systèmes prennent la relève et améliorent le système *Automatic High-beam Control*. Au lieu de passer des feux de route aux feux de croisement, et inversement, ces nouveaux systèmes abaissent progressivement l'ensemble du faisceau lorsque le véhicule opposé se rapproche. Le conducteur du véhicule opposé n'est ainsi pas ébloui tout en maximisant la portion de route éclairée par les feux. Les systèmes les plus récents (2015) sont basés sur des feux à matrice de LEDs. Ils permettent alors de rester en feux de route tout en abaissant localement (et non plus dans son ensemble) le faisceau pour éviter l'éblouissement.

sement du conducteur du véhicule opposé.

Adaptive Cruise Control (ACC). Appelé aussi *Autonomous Intelligent Cruise Control (AICC)* ou régulateur de vitesse adaptatif en français. Ce système est un régulateur de vitesse qui permet de moduler automatiquement la vitesse afin de maintenir une distance minimale à l'approche d'un véhicule. Il permet de choisir la vitesse maximale autorisée et la distance que l'on souhaite conserver au minimum derrière un véhicule. Le contrôle longitudinal du véhicule est alors entièrement automatisé. Ce type de système n'est cependant disponible que pour des conditions particulières comme les autoroutes. C'est le premier système d'aide à la conduite automatisé de niveau 1 qui a été commercialisé.

Blind Spot Information System (BLIS). Ce système permet de détecter lorsqu'un véhicule est présent dans l'angle mort du véhicule. Il permet ainsi au départ d'alerter le conducteur dans ce cas. Certains systèmes permettent aussi de contrer une manœuvre de changement de file si un obstacle est détecté dans l'angle mort. Le véhicule prend alors très localement le contrôle latéral du véhicule. Ce type de système est basé sur une caméra ou sur des capteurs radar ou ultrason.

Lane Keeping System (LKS). Appelé aussi *Lane Keeping Assist (LKA)*. Ce système utilise les mêmes principes que le système d'alerte de sortie de voie (LDW). Il analyse en effet la position du véhicule par rapport à la route. Il permet en revanche de prendre le contrôle du véhicule et de corriger la trajectoire en permanence à l'inverse du LDW qui alerte simplement le conducteur en cas de franchissement non intentionnel.

Autonomous Emergency Braking (AEB). Aussi connu sous la dénomination *Crash Imminent Braking (CIB)*. Ce système permet de déclencher automatiquement un freinage d'urgence du véhicule. Ce freinage est déclenché si le temps avant collision (TTC - *Time To Contact*) par rapport à un obstacle passe en dessous d'un certain seuil. Ce seuil est volontairement bas et le freinage est très brutal afin que le conducteur ne s'habitue pas à utiliser ce système en conditions normales. Le AEB est donc une ultime protection en cas d'erreur du conducteur et non un frein automatique quotidien.

Park Assist. Appelé aussi *Active Park Assist*. Ce système permet de stationner le véhicule en créneau ou en bataille automatiquement. Il repose sur des caméras et des capteurs radars ou ultrasons. Il permet une manœuvre automatique du véhicule uniquement à une vitesse très basse. Le conducteur positionne avant cela le véhicule devant la place de parking désirée. Valeo a aussi présenté le système *Park4U* (non commercialisé) qui recherche une place automatiquement dans un parking avant de se stationner. Ce système est donc le premier système de deuxième niveau d'automatisation commercialisé.

Traffic jam assist. Appelé aussi *Stop&Go Pilot*. Ce système très récent permet de lancer un mode de conduite totalement autonome dans des conditions particulières de bouchon. La vitesse de ce type de conduite autonome est limitée à 37mph (environ 60 km/h) ou 30km/h selon les constructeurs. Le contrôle comprend alors accélération, freinage et braquage. Le système *Traffic jam assist* est le premier système de deuxième niveau d'automatisation commercialisé et roulant en pleine circulation. Bien que ce système soit autonome, le conducteur reste responsable du véhicule, il doit garder son attention portée sur la route et ses mains sur le volant.

2.2 - Les applications liées à l'infrastructure : DAI et TDC

Les STI sont nombreux sur les infrastructures et leurs applications sont variées. Ils permettent par exemple l'optimisation du trafic en modifiant en temps réel les directions conseillées aux

usagers ou les limitations de vitesse. Ils permettent aussi de prévenir les accidents en informant les usagers sur des conditions difficiles à venir sur l'itinéraire (accident sur la voie, conditions météorologiques dégradées, ralentissement ou congestion). Enfin, ils peuvent aussi servir à des contrôles du respect des règles du code de la route. L'utilisation de systèmes intelligents et automatiques sur l'infrastructure présente deux intérêts majeurs. Premièrement, ils permettent de détecter des événements anormaux (incidents) pour les mettre en valeur auprès de l'opérateur chargé de la surveillance. En effet, avec la multiplication du nombre de caméras, un opérateur ne peut pas analyser l'ensemble des images disponibles [66]. Un traitement automatique doit donc permettre de présenter uniquement les images contenant des incidents potentiels à ce dernier. Deuxièmement, les systèmes intelligents permettent de mesurer des variables sur le trafic depuis l'infrastructure. Ces données peuvent servir à la gestion intelligente du trafic ou au contrôle. Elles serviront à terme aussi pour donner des informations sur le trafic aux véhicules intelligents. Les nombreux paramètres liés au trafic doivent donc être mesurés en temps réel par des systèmes intelligents. Le tableau 2 récapitule ces systèmes en les classant par champs d'application. Leurs fonctions sont détaillées dans la liste suivante.

Fonction	TDC	DAI	Contrôle
Comptage des véhicules			
Taux d'occupation	x		
Flux des véhicules			
Création des matrices origine-destination	x		
Temps de parcours des véhicules	x		
Vitesse des véhicules	x		x
Distance inter-vehicules			
Temps inter-vehicules	x		x
Lecture automatique de plaques	x		x
Détection des piétons	x	x	
Trajectoire des véhicules	x	x	
Détection de véhicules	x	x	
Estimation de la longueur de file	x	x	
Détection d'anomalies		x	

Tableau 2 – Principaux systèmes d'analyse du trafic rencontrés sur les infrastructures en 2015.
TDC : *Traffic Data Collection*, DAI : Détection Automatique d'Incidents.

Comptage des véhicules. Taux d'occupation. Flux des véhicules. Les systèmes de ce type sont capables de détecter et de compter les véhicules par file, et parfois par type (véhicules légers, poids lourd, cyclomoteurs, cyclistes) ou par longueur. Le terme de classification est alors employé. Ces systèmes permettent ensuite d'évaluer le taux d'occupation ou encore le flux des véhicules. Ils reposent généralement sur des boucles de détection, des radars ou des caméras.

Création des matrices origine-destination. Ces systèmes ont pour objectif de créer les matrices origine-destination. Ces matrices permettent de comprendre quels sont les itinéraires empruntés à une intersection. Ces données permettent ensuite à plus grande échelle de comprendre les phénomènes de congestion et de mieux gérer l'infrastructure, voire de la développer à certains endroits. Ces systèmes recourent nécessairement à la détection et au suivi des véhicules. Ils utilisent des caméras.

Temps de parcours des véhicules. Ces systèmes utilisent des systèmes de détection et d'identification des véhicules en plusieurs points. Cela permet d'estimer le temps de parcours des véhicules sur un trajet donné. Comme une identification est nécessaire, la majorité de ces systèmes utilisent des caméras.

Vitesse des véhicules. Ces systèmes permettent, en plus du comptage, d'évaluer la vitesse des véhicules. Cette information peut-être détaillée par file et par type de véhicule. Cette vitesse peut-être évaluée pour chaque véhicule ou en moyenne. Certains systèmes ne permettent pas de déterminer la vitesse exacte mais simplement de faire des groupes de vitesse. Ces systèmes utilisent majoritairement des radars, mais certains sont aussi basés sur des caméras grâce à un suivi des véhicules.

Distance inter-véhicules. Temps inter-véhicules. Ces systèmes permettent de mesurer la distance entre deux véhicules successifs sur une voie. Ils peuvent utiliser des boucles de détection mais aussi des caméras.

Lecture automatique de plaques d'immatriculation. Les systèmes de lecture automatique de plaques d'immatriculation servent généralement au contrôle du respect des règles du code de la route (pour l'envoi d'amendes automatique). Il peuvent aussi servir à appliquer des taxes automatiquement en fonction des véhicules ou à vérifier l'autorisation d'accès à des zones d'accès restreint (centres villes ou voies réservées par exemple). Au delà du contrôle, ces systèmes permettent aussi de mesurer des données sur le trafic. Il sont alors utilisés pour créer des matrices origine-destination à grande échelle ou pour mesurer des temps de parcours. Ces systèmes utilisent des caméras (domaine visible ou proche infra-rouge).

Détection des piétons. Certains systèmes de surveillance permettent, en plus de la gestion du trafic, de surveiller les piétons. Des mécanismes spécifiques pour la détection de piéton sont alors mis en place. On retrouve aussi ces mécanismes dans les systèmes de surveillance des lieux publics qui n'identifient que les piétons (zones uniquement piétonnes). Ces systèmes emploient principalement des caméras.

Trajectoire des véhicules. Ces systèmes permettent d'évaluer la trajectoire des véhicules afin d'identifier les comportements des usagers de la route. Il peuvent par exemple permettre d'étudier les changements de file dans différents contextes. Leur premier objectif est donc la gestion du trafic. Ces systèmes permettent aussi de détecter automatiquement des incidents. Ils sont alors utilisés pour détecter les trajectoires anormales. Ces systèmes utilisent des caméras.

Détection de véhicules. Ces systèmes permettent simplement de mesurer la présence d'un véhicule. Ils peuvent par exemple servir à contrôler des feux aux intersections. Ils participent alors à une meilleure gestion du trafic. Ces systèmes peuvent aussi être utilisés pour la détection automatique d'incidents, en détectant par exemple des véhicules dans des zones dangereuses. Ces systèmes utilisent principalement des boucles de détection et des caméras.

Estimation de la longueur de file. Ces systèmes permettent d'évaluer la longueur de file à une intersection. Il sont alors employés pour commander des signalisations dynamiques.

Certains systèmes permettent aussi d'évaluer le temps d'attente à une intersection non prioritaire. Ce sont donc d'abord des outils de gestion intelligente du trafic. Certains de ces systèmes détectent aussi les départs de congestion. Ils participent alors à la détection automatique d'incidents. Ils reposent principalement sur des ensembles de boucles de détection ou sur des caméras.

Détection d'anomalies. Ces systèmes sont capables de détecter les anomalies en temps réel. Les anomalies incluent : accidents, contre-sens, ralentissement, congestion, véhicule avec une trajectoire anormale, arrêt de véhicule, piéton ou objet sur la voie. L'objectif de ces systèmes est d'alerter l'opérateur en charge de la surveillance pour qu'il prenne une décision : validation de l'incident, analyse de la situation, déclenchement des messages d'alerte aux usagers, appel des secours. Ils sont donc utilisés pour la détection automatique d'incidents. Ces systèmes reposent sur des caméras et font de l'analyse statistique globale sur les images (sans détection et identification précise des véhicules).

L'essentiel



- Les STI concernent le véhicule mais aussi l'infrastructure.
- Ne pas trop espérer du phénomène *Google Car* : l'innovation incrémentielle est la plus probable.
- Le niveau 2 d'automatisation de la SAE est déjà commercialisé : *Traffic jam assist*.
- Au delà de la technique, l'acceptation du public et la législation sont essentiels.

3 - Historique des systèmes de transport intelligents

Avant de commencer à étudier les algorithmes de vision artificielle, il est important de comprendre leur contexte, leurs origines et les validations dont ils ont fait l'objet. En effet, la plupart des systèmes partent d'actions de recherches isolées. Ces actions permettant de faire avancer pas à pas les STI, en proposant de nouvelles idées et des éléments de base. Il existe aussi, et souvent dans la continuité, de nombreux projets fédérateurs, soutenus par des programmes de financement, qui ont permis de faire de grandes avancées. Ces projets rassemblent alors les différents éléments isolés afin de créer des systèmes complets. C'est un second temps de la recherche qui permet la mise au point de prototypes. Les produits de ces projets majeurs ont souvent été testés et comparés lors de challenges. Ils ont aussi été testés sur des bases de données ou des sites communs ce qui a démontré à plusieurs reprises la faisabilité des STI. Cette étape de validation est la troisième et dernière étape de la recherche sur les STI. Après celle-ci, les produits proposés sont souvent commercialisés après une phase d'intégration et d'adaptation à la production. Le triple objectif des recherches sur les STI est toujours le même : obtenir un triptyque véhicule-infrastructure-homme plus sûr (sécurité, accident), plus efficace (économe en énergie, rapide, au parcours optimisé) et plus proche de l'homme (confortable, interface homme machine (HMI) développée, ergonomique).

Coté véhicule, la vision actuelle du véhicule date de 1908 avec les apports de la Ford T [83], le premier véhicule à être assemblé à la chaîne. L'automobile se complexifie ensuite peu à peu et ressemble à présent de plus en plus à un ordinateur. Une phase de préparation au véhicule intelligent, correspondant au développement informatique et au traitement de l'information, a eu lieu des années 1930 aux années 1980 [44]. En 1939, General Motors (GM) propose *Futura*, la vision d'autoroutes complètement automatisées à la foire internationale de New York.

Dans les années 1970, l'idée de guider des véhicules par un rail magnétique est présente [49] et une première vague de recherche préparatoire sur les STI commence. Dès les années 1980, l'électronique est commercialisée à bord des véhicules. Dans le même temps, les recherches fondamentales sur les véhicules autonomes débutent, plus précisément, de manière indépendante au Japon en 1979, en Europe en 1982 et un peu plus tard aux États-Unis en 1985 [36]. Dans les années 1990, les capteurs extéroceptifs apparaissent sur les véhicules commercialisés pour augmenter la perception du conducteur. Comme le montre la figure 3, le niveau d'automatisation 1 est atteint commercialement en 2000 alors que le niveau 2 apparaît sur les routes en 2013. Le niveau SAE 3 est en passe d'être atteint, Valeo a par exemple déjà présenté son système Cruise4U sur autoroute. Pour atteindre le niveau SAE 4 sur route, de nombreuses validations et procédures de test sont encore à mettre en place. Il faut en effet pouvoir connaître toutes les limites des systèmes mis en place ce qui suppose de prendre en compte toutes les situations pouvant être potentiellement rencontrées. Le niveau 4 de la SAE est cependant atteint commercialement depuis 2012 mais uniquement sur des voies réservées, c'est le cas des navettes EZ-10 et Navya. Pour permettre cette avancée, la sécurité est assurée en cas de défaillance par l'arrêt complet du système, ce qui n'est pas envisageable sur route. Peu de travaux de recherche sur les niveaux SAE 3 et 4 sont disponibles. Ces travaux sont en effet plutôt orientés sur l'innovation et ne sont donc pas tous divulgués.

Coté infrastructure, les systèmes de management du trafic intelligent apparaissent dans les années 1960. En effet, les problèmes de congestion et d'accidents deviennent importants (dès les années 1950 au Japon [111]). Les routes sont alors instrumentées pour mesurer le trafic et des centres de contrôle centralisés sont mis en place. Les premiers carrefours gérés intelligemment apparaissent alors pour optimiser les déplacements dans les années 1960 [111]. Dans les années 1970, la seconde solution proposée pour enrayer la saturation des réseaux et augmenter la sécurité passe par l'information aux usagers et l'optimisation des parcours par un itinéraire calculé automatiquement (ancêtre du GPS avec guidage). Cette première phase de développement a plutôt concerné le développement de l'infrastructure (acquisition des données sur le trafic) et la transmission de ces données au conducteur (communication). L'objectif était de permettre au conducteur d'anticiper des éléments dangereux sur la route (sécurité) et d'optimiser le trafic en proposant des itinéraires alternatifs (mobilité). Les projets ALI en Europe (1974-1978), ERGS aux États-Unis (1960-1970) et CACS au Japon (1973-1979) rentrent dans ce cadre. Ces projets se sont ensuite développés comme le montre la figure 3. Des projets similaires ont été mis en place au Canada, en Australie et en Thaïlande [111], il ne seront pas détaillés ici. Pour ce qui est des systèmes de vision artificielle sur les infrastructures, les premiers travaux qui ont pu être recensés remontent au début des années 1980. Ces travaux sont majoritairement concentrés en Europe. Les recherches sur ce sujet débutent seulement dans le milieu des années 1990 aux États-Unis et en Asie. Les premiers travaux portent sur la détection des objets sur les scènes à partir des caméras de surveillance (piétons, véhicules). Dans les années 2000, les travaux de recherche consistent ensuite à interpréter des informations de haut niveau (accident, comportement anormal...) et à utiliser plusieurs flux d'information (fusion de données et suivi multi-caméra). Comme les commercialisations dans ce domaine s'adressent plus particulièrement aux gestionnaires, il est difficile de tracer un historique de ces dernières.

3.1 - Projets, financements et partenariats fédérateurs

3.1.1 - Europe

- **1974-1978, ALI, véhicule et infrastructure.** Le système ALI (*Autofahrer Leit und Information System*) visait à proposer automatiquement un itinéraire au conducteur. C'est en quelque sorte le premier système de GPS avec guidage tel qu'il existe aujourd'hui. Ces premiers travaux permettent de faire débiter les recherches sur l'automatisation et l'assistance au conducteur. A cette époque, les travaux sont clairement orientés sur l'assistance au conducteur et sur la communication. Le véhicule autonome n'est alors pas encore évoqué. Ce projet est un premier pas vers les STI.
- **1986-1995, EUREKA PROMETHEUS, véhicule.** Le programme PROMETHEUS (*PROgramM for European Traffic with highest Efficiency and Unprecedented Safety*) datant de 1986 est le premier projet traitant de la question des STI en Europe. Plus de 13 industriels automobiles et organismes de recherche regroupant 19 pays ont été fédérés [118]. Ce projet aborde les STI en proposant des développements sur l'infrastructure mais surtout sur le véhicule. L'objectif était de rendre le transport routier plus efficace et plus sûr. Pour cela, les aspects d'itinéraire optimisé, de flotte de véhicules, de communication inter-véhicules et avec l'infrastructure, de conduite assistée ou automatisée, d'appel automatique des urgences en cas d'accident étaient déjà évoqués [111]. Ce projet a permis de financer les premières actions de recherche sur le véhicule autonome. Il a par exemple abouti à la création des véhicules de test VaMoRs, VaMP et MOB-LAB [117].
- **1988-1994, 2^{me} et 3^{me} Framework Programme (FP2, FP3), infrastructure.** Les programmes cadres européens (*Framework Programme*, FP) permettent le développement de nombreux projets dans des domaines très variés dépassant le cadre du contexte routier. Parmi ces projets, quelques-uns ont permis un développement important des STI. Les plus marquants ont pu être identifiés au cours de la recherche bibliographique. Le projet européen DRIVE (*Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety*) est par exemple assez remarquable. Ce projet porte majoritairement sur l'infrastructure et non le véhicule, à l'inverse du projet PROMETHEUS. C'est d'ailleurs le premier projet européen portant sur le développement et le test de systèmes de communication pour les STI [44]. L'objectif était alors déjà l'augmentation de la sécurité sur les routes et l'optimisation de la mobilité. Le projet DRIVE, financé par le FP2 (1988-1991), a connu deux suites : DRIVE II financé par le FP3 (1991-1994) et TELEMATICS financé par le FP4 (1994-1998).
- **1983-1998, ESPRIT 0 à ESPRIT 4, véhicule.** Les programmes de recherche européens ESPRIT (*European Strategic Program on Research in Information Technology*) sont une suite de programmes sur le développement des technologies de l'information. En tout, cinq programmes ESPRIT se sont succédés de 1983 à 1998. Comme pour les FP, ces programmes de financement dépassent largement le contexte routier. Des projets concernant les STI ont tout de même été financés dans ce cadre. C'est le cas du projet CLEOPATRA (*Clusters of Embedded Parallel Time Critical Applications*). En 1996, ce projet a permis de compléter les travaux de recherche sur les véhicules VITA II et VaMP [85]. L'objectif était de proposer un système de contrôle automatisé du véhicule compact, performant et robuste par le développement des systèmes informatiques. Le groupe de travail était composé de Daimler-Benz, C-Vis, PAC, Thompson et l'UBM [85].
- **1991-aujourd'hui, ERTICO, véhicule et infrastructure.** Le consortium ERTICO est établi en 1991 pour coordonner les activités de développement des STI et leur application

sur l'infrastructure [84]. Il comporte à sa création une cinquantaine de membres publics et privés [84]. L'objectif de ce consortium est de promouvoir une mobilité plus sûre (zéro accident), plus intelligente (pas de ralentissement et une information claire aux usagers), et plus propre (avec un impact réduit sur l'environnement). Pour cela, le consortium propose de développer, de promouvoir, d'adapter et de valider des systèmes de transport intelligents. Il se positionne donc dans la même optique que les projets américains ITS America et japonais VICS.

- **1994-Aujourd'hui, EUCAR, véhicule.** La partenariat EUCAR (*European Council for Automotive R&D*) regroupe depuis 1994 des industriels de l'automobile. Ce groupement propose de renforcer la compétitivité des constructeurs automobiles par des collaborations sur le plan de la recherche et du développement. L'objectif est à la fois de concevoir le véhicule de demain, de partager un socle commun en vue de la normalisation, et d'accéder à une taille critique pour la recherche. Ce consortium, qui traite du véhicule en général, va donc au-delà des STI même s'il y participe.
- **1994-1998, 4^{me} Framework Programme, véhicule et infrastructure.** Comme pour les précédents, ce programme cadre européen finance de nombreux projets au-delà du contexte routier. Parmi eux, le projet européen PROMOTE-CHAUFFEUR est un projet majeur sur la conduite autonome. Il fût mis en place de 1994 à 1999 [100]. Le premier projet aboutit en 1999 à une démonstration de la faisabilité de la conduite coopérative avec deux poids-lourds [12]. Le premier véhicule est conduit par un conducteur alors que le second véhicule le suit de façon autonome [100]. Le projet AC-ASSIST a pour objectif de développer un système de contrôle longitudinal pour assister le conducteur. Ce dernier permet de déclencher le freinage en cas de collision imminente. Le projet SAVE vise à vérifier l'état du conducteur (fatigue, sous emprise d'alcool ou de drogue) par l'analyse de la conduite (accélération, position du véhicule sur la voie) et par l'analyse du conducteur par vision uniquement (clignement des paupières, position de la tête). Le projet UDC tend à utiliser des technologies de communications courtes portées pour communiquer la vitesse maximale autorisée de la portion de route au véhicule. Cette information devait ensuite pouvoir servir à informer le conducteur mais aussi à moduler un système de contrôle longitudinal. Le projet LACOS tente de développer un système de contrôle latéral du véhicule. Ce système devait permettre le suivi de voie automatique mais aussi le changement de voie automatique. Le projet IN-ARTE propose d'intégrer les informations des systèmes anti-collisions développés et les informations des cartes numériques pour déterminer si la conduite est correcte. Une HMI permet alors d'expliquer au conducteur les constatations faites. Sur le plan de l'infrastructure, le FP4 finance le projet TELEMATICS qui fait suite au projet DRIVE II. Le consortium ERTICO a porté ce projet [44]. Il reprend les mêmes concepts que les projets DRIVE et DRIVE II. Le projet ADASE part du constat que les projets PROMETHEUS et DRIVE ont permis de développer les briques essentielles pour la conduite autonome en termes de technologies. Ces projets n'ont cependant pas permis de créer un système global. Ce projet vise donc à utiliser des moyens de communication pour associer les informations des technologies de la conduite autonome déjà en place à celles de l'infrastructure et en tirer une valeur ajoutée en termes de sécurité et d'optimisation. Ce projet est prolongé lors du FP5 (ADASE II). Le projet RESPONSE a pour objectif d'intégrer les aspects légaux et la prise en compte de l'homme dans la conception des systèmes. Il sera suivi du projet RESPONSE II dans le cadre du FP5.
- **1998-2002, 5^{me} Framework Programme, véhicule et infrastructure.** Dans la même lignée, le FP5 a permis entre autres, le développement de nouveaux projets liés aux

STI. Le projet PROMOTE-CHAUFFEUR a été poursuivi dès 2000 et jusqu'en 2003 sous le nom de PROMOTE-CHAUFFEUR II. Ce second projet aboutit à une démonstration mettant en œuvre trois poids lourds capables de faire de la conduite autonome coopérative. Les véhicules possédaient alors les fonctions de régulation de vitesse adaptative, de détection et de suivi d'obstacles, et de changement de voie coopératif [56]. Le projet PROTECTOR (*preventive safety for unprotected road user*, 2000-2003) a pour sujet la réduction des accidents impliquant des usagers vulnérables [52] en fusionnant les données de plusieurs capteurs extéroceptifs. Les constructeurs automobiles Volkswagen et Dailmer-Chrysler ont participé à ce projet [52]. Il sera suivi du projet SAVE-U (*sensors and system architecture for VRUs protection*, 2002-2005) toujours dans le cadre du FP5 et avec les mêmes objectifs [52] puis par le projet WATCH-OVER dans le cadre du FP6. Le projet *Advisor (Annotated Digital Video For Intelligent Surveillance And Optimised Retrieval*, 1999-2002) portait sur la vidéo surveillance des stations de métro [66]. Le système développé détecte et suit les personnes présentes sur les scènes de vidéo surveillance, puis analyse leur comportement. L'objectif final est de pouvoir interpréter des données de haut niveau pour déterminer si une situation anormale se produit (par exemple une agression ou du vandalisme). Le projet Cybercar consiste à développer les échanges entre véhicules pour créer des véhicules capables de se déplacer de manière coopérative [86]. Le projet RADARNET vise la création d'un capteur radar plus efficace pour rendre le véhicule plus sûr. Le projet CARSENSE utilise la fusion des données de plusieurs capteurs extéroceptifs (stéréo-vision, radar, LIDAR) afin de créer un système de perception de l'environnement efficace. Le projet EUCLIDE utilise un radar et un capteur FIR (infrarouge lointain) pour développer une assistance au conducteur la nuit ou en conditions météorologiques dégradées. Cette assistance permet de prévenir le conducteur qu'un obstacle est présent sur la route grâce à une HMI alors que ce dernier à une vision réduite. Les projets ADASE II et RESPONSE II prolongent les projets ADASE et RESPONSE du FP4 avec les mêmes buts.

- **2002-2006, 6^{me} Framework Programme, véhicule et infrastructure.** Le FP6 est de nouveau riche en projets dont certains en lien avec les STI. Le projet intégré PReVENT (2004-2008) regroupe plus de 50 partenaires. Il a pour objectif le développement de technologies permettant de prévenir le conducteur d'une situation dangereuse [52]. Ces technologies utilisent pour cela des capteurs analysant la route mais aussi le conducteur [52]. Elles permettent alors d'augmenter la sécurité pour le conducteur, les passagers mais aussi pour les usagers vulnérables. Le projet SAFESPOT (*Cooperative systems for road safety, Smart Vehicles on Smart Roads*, 2006-2010) [63] [62] [16] propose d'utiliser les communications entre véhicules et avec l'infrastructure pour proposer aux usagers des informations afin des les alerter des situations dangereuses en amont. Les conducteurs ont ainsi une perception augmentée dans ces situations à risque et ils seront préparés à réagir face à ces dernières. De la même manière, le projet WATCH-OVER (2006-2008) tente d'utiliser les informations des usagers de la route et les moyens de communication pour éviter les accidents d'usagers vulnérables. Il reprend la suite du projet SAVE-U. Le projet COOPERS (*Co-operative networks for intelligent road safety*) propose d'étudier des communications entre les véhicules et avec l'infrastructure pour améliorer la sécurité. Pour cela, les moyens de communication et les capteurs de l'infrastructure sont étudiés et analysés. Le projet Cybercar 2 poursuit les travaux du projet Cybercar (FP5) [86]. Ce projet aboutit en 2008 à une démonstration de coopération entre plusieurs véhicules. Le projet APROSYS développe un système de sécurité passif (utile lors de la collision) étudié pour limiter la gravité des dégâts lors de l'impact. Pour cela le système utilise des

capteurs pour anticiper la collision. Le projet SPARC porte sur la fiabilité des systèmes permettant de mettre en œuvre les ADAS et sur la possibilité de corriger les erreurs du conducteur. L'objectif est d'avoir un système de contrôle du véhicule redondant (humain et automatisé). Il sera suivi du projet HAVE-it financé par le FP7. Le projet AIDE vise à améliorer les interfaces homme-machine (HMI) pour les ADAS. En effet, une HMI mal pensée entraîne des incompréhensions chez les utilisateurs des ADAS proposées. De plus, si les HMI sont mal réfléchies, leur réglage peut être compliqué et entraîner une distraction chez le conducteur, rendant la conduite dangereuse. Les projets COM2REACT, COMe-Safety, CVIS, REPOSIT et Sevecom traitent des communications entre les véhicules ou avec l'infrastructure. Le projet HIGHWAY concerne l'amélioration de la localisation du véhicule. Le projet I-WAY a pour objectif de fournir des informations supplémentaires au conducteur via des communications V2V. Le projet MORYNE utilise les bus du réseau de transport en commun comme des capteurs de l'état du trafic dans la ville. Le projet INTRO développe un système délivrant une information en temps réel sur l'état de la chaussée (usure, conditions météorologiques). Ce système permet de fournir de l'information aux utilisateurs (pour anticiper un changement d'état de la route) et aux gestionnaires (pour prévoir les actions à mener). Il repose sur de multiples capteurs déjà en place, sa valeur ajoutée provenant de la fusion des données collectées en temps réel.

- **2007-2013, 7^{me} Framework Programme, véhicule et infrastructure.** Le 7^{me} programme cadre européen (FP7) contient à nouveau de nombreux projets dont certains encore en cours. Il est difficile d'identifier tous les projets rentrant dans le contexte des STI, leurs résultats n'étant pas encore publiés. Cependant, certains projets ont pu être identifiés lors de la phase de recherche bibliographique. Le projet INTERSAFE 2 a pour objectif d'utiliser des capteurs extéroceptifs pour identifier les risques de collision à une intersection [3]. Ces informations peuvent ensuite être transmises aux autres usagers de la route grâce à de nouveaux moyens de communication. Le projet EuroFOT (*European Field Operational Test on active safety functions in vehicles*, 2008-2011) est un projet d'envergure majeure soutenu par le consortium ERTICO. Ce projet vise à tester 8 applications d'ADAS sur plus de 1000 véhicules de manière unifiée. Ce projet rassemble 28 partenaires européens et doit proposer à terme une méthode d'évaluation des ADAS. Il repose sur d'autres projets soutenus par le FP7 : FOTSIS, FESTA et FOT-Net. Le projet ADOSE utilise la fusion des données de plusieurs capteurs extéroceptifs (caméra FIR, caméra monoculaire visible, caméra stéréo visible, caméra TOF, et radar) pour obtenir un capteur global plus performant et ainsi permettre l'amélioration des ADAS. Le projet HAVE-it fait suite au projet SPARC décrit dans le FP6. Le projet FNIR consiste à regrouper une caméra FIR (infrarouge lointain) et une caméra NIR (infrarouge proche) pour permettre au conducteur d'avoir une meilleure vision nocturne des piétons. Le projet MiniFaros porte sur le développement d'un capteur laser facilement déployable sur les véhicules et utilisable pour la détection des véhicules environnants. Le projet ARTRAC développe un capteur radar capable de détecter des usagers vulnérables en face du véhicule dans le but de prévenir des collisions frontales. Le projet Adaptive recherche le développement des niveaux d'automatisation SAE 1 à 4. Ce projet inclut les aspects de communication entre véhicules, d'interface homme machine ou encore de législation. Des véhicules sont pour cela testés dans des conditions variées. Le projet DESERVE fonde une plateforme commune pour le développement des ADAS en Europe. Cela permettrait d'augmenter la rapidité de développement de nouveaux ADAS mais aussi leur amélioration par le partage de compétences. Le projet AutoNet2030 traite du développement de véhicules capables de conduite coopérative. Le but est de décentraliser les prises de décision et

de permettre une redondance des informations par le partage de ces dernières entre les véhicules. Le projet STADIUM analyse l'impact des STI sur l'optimisation des déplacements lors de grand événements. Le projet EBSF consiste à promouvoir des bus urbains de nouvelle génération. Le projet NEARCTIS regroupe des chercheurs pour analyser les grands enjeux et les questions de recherche restantes sur les systèmes de management du trafic. Le projet iTETRIS étudie les systèmes de coopération entre véhicules sans fil et leurs bénéfices sur le management du trafic. Le projet 2DECIDE a pour but de créer un outil d'aide à la décision pour le choix des STI en fonction de critères géographiques et politiques. Le projet THORAX travaille sur le design des véhicules pour limiter les dégâts corporels en cas de collision. Le projet ASSESS propose une procédure de test pour analyser le comportement du conducteur, les systèmes anti-collisions mais aussi les performances lors de la collision afin d'établir la validité des ces systèmes d'un point de vue socio-économique. Le projet iCar Support propose des actions et des recommandations quant au développement des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) afin de respecter les enjeux de durabilité et de sécurité. Le projet SARTRE porte sur le développement d'un système de conduite coopérative. Le projet ASSET-ROAD développe de nombreux éléments liés aux STI et les intègre par une approche holistique : HMI, système de surveillance de la conduite (analyse de la trajectoire), ou encore amélioration de la transmission des informations. Ce projet porte donc à la fois sur les systèmes eux-mêmes (capteurs et traitements associés) mais aussi sur l'utilisation de leurs données (HMI et approche holistique). Les projets PRESERVE, SAFETRIP, GEONET, PRECIOSA traitent du développement et de la sécurisation des moyens de communication entre véhicules et avec l'infrastructure. Le projet DRIVE C2X donne une méthodologie de test des systèmes coopératifs. Le projet CVIS tente d'utiliser les échanges entre véhicules et avec l'infrastructure afin d'augmenter la sécurité et d'optimiser les déplacements. Le projet ISIPADAS analyse le comportement du conducteur en situation de conduite afin de détecter des comportements émergents et d'anticiper d'éventuelles erreurs. En marge des STI, le Ecall se développe en Europe. Ce système consiste à équiper les véhicules d'un module de communication qui émet un signal d'urgence si le véhicule subit une collision. Ce système permet ainsi d'alerter les secours immédiatement lors de l'accident en précisant le lieu où il s'est produit. Il prévoit aussi de donner une analyse de l'impact. Dans le cadre du FP7, les projets EGALITE, I-VITAL, ITERATE et SAFERIDER participent au développement du système Ecall. Le projet COMPASS-4D, inscrit au *Competitiveness and Innovation Framework Programme* (et non au FP7), consiste à utiliser des communications entre véhicules et avec l'infrastructure pour développer des systèmes de transport intelligent coopératifs.

- **2013-2020, H2020, Europe, véhicule et infrastructure.** Le H2020 (Horizon 2020) est le programme de financement européen actuel. Des projets portant sur les STI sont de nouveau en cours grâce à ce programme de financement. Il n'y a en revanche pas encore beaucoup de documents sur ces nouveaux projets. Le projet RobustSENSE porte sur la prise en compte des conditions dégradées pour les capteurs. L'objectif est que le système soit capable de s'auto-diagnostiquer face aux conditions rencontrées pour pouvoir réagir et adapter son fonctionnement pour prendre en compte ces conditions et maintenir son service. Le projet DENSE, auquel le Cerema participe, a pour objet de développer un capteur capable de permettre une aide à la conduite permanente, en toutes conditions météorologiques. En parallèle, le projet SCOOP@F financé par la France vise à mettre en œuvre à grande échelle des STI coopératifs. Ce projet, lancé en 2014 et dont l'échéance est fixée en 2017, permettra des tester des STI coopératifs sur 3000 véhicules et 2000km

de route sur 5 sites.

3.1.2 - États-unis

- **1960-1970, ERGS, infrastructure.** Le projet américain ERGS (*Electronic Route Guidance Systems*) est le premier à développer l'idée d'utiliser des communications à double sens pour proposer un guidage optimisé au conducteur. Le concept de ce système est ensuite beaucoup retravaillé au Japon à partir de 1973 avec le projet CACS et ses suites. Aux États-unis, c'est l'équipe Mobility 2000 qui reprend ce travail orienté sur l'infrastructure.
- **1986-aujourd'hui, PATH, véhicule et infrastructure.** Aux États-unis, le consortium PATH (*California Partners for Advanced Transit and Highways*) a conduit des actions de recherches sur la sécurité des déplacements. Plus particulièrement, cela inclut des travaux sur la protection des piétons, la modélisation du comportement du conducteur, et sur la prévention des collisions aux intersections [52]. Le PATH rassemble les universités de Berkeley et de Canergie Mellon (CMU). Il participe aussi au consortium NAHSC.
- **1988-1990, Mobility 2000, infrastructure.** L'équipe Mobility 2000 a permis d'aboutir à la formation du groupement IVHS (*Intelligent Vehicle Highway Systems*) en 1991 [44]. Ce collectif a principalement travaillé sur le développement de fonctions sur l'infrastructure et non en embarqué.
- **1991-Aujourd'hui, IVHS - ITS America, infrastructure.** Le regroupement nommé IVHS avait pour objectif de promouvoir le développement des STI aux États-unis [44] afin d'augmenter la sécurité et l'efficacité sur les routes. Pour cela, des tests à l'échelle un regroupant les différentes technologies existantes avait été mis en place dès le début des années 1990 [70]. Ce regroupement est constitué de partenaires privés, académiques et publics. En tout, plus de 30 partenaires participent à IVHS lors de sa création [70]. Les aspects techniques, socio-économiques, humains, normatifs, ou encore législatifs y sont représentés [70]. Le regroupement changea de nom en 1994, en gardant les mêmes missions, pour devenir ITS America (*Intelligent Transportation Society of America*) [44]. Aujourd'hui, ITS America regroupe plus de 450 partenaires parmi lesquels des partenaires publics, des entreprises privées proposant des systèmes ou des services liés aux STI, des industriels de l'automobile, des laboratoires de recherches, des institutions académiques, ou encore des associations.

Au moment de la création du groupement IVHS, un projet *Detection Technology for IVHS* avait été financé par le *Federal Highway Administration* (FHWA), une agence de l'USDOT [77]. Ce projet débuta en 1991 et se termina en 1995 [77]. L'objectif de ce dernier était de recenser les paramètres nécessaires pour l'évaluation du trafic, les capteurs existants puis de tester ces derniers sur différents sites [77]. Les capteurs radars, ultrasons, infra-rouges, les caméras, les boucles d'induction, les capteurs magnétiques et acoustiques ont ainsi été testés.

- **1994-1998, NAHSC - AHS, véhicule.** Aux États-Unis, le NAHSC (*National Automated Highway System Consortium*) a permis le développement de la conduite autonome. Ce consortium rassemble l'industriel automobile General Motors (GM), l'équipementier Delco, le groupe de travaux publics Bechtel and Parsons Brinkerhoff, le gestionnaire d'autoroutes californien Caltrans, Hughes and Lockheed Martin, le département des transports américain (USDOT), et le consortium PATH (qui rassemble les universités de Berkeley et de Canergie Mellon). Le NAHSC recevait des financements de la part de la *Federal*

Highway Systems Administration (FHWA), une agence de l'USDOT (*U.S. Department of Transportation*, Département des Transports des États-Unis). Les financements ont eu lieu dans le cadre du projet AHS (*Automated Highway System*). Ce projet majeur fut proposé par le NAHSC [44] lui-même en accord avec la FHWA. Les travaux réalisés dans ce cadre ont permis d'aboutir à une démonstration à taille réelle en 1997 (Demo 97) qui a permis de valider la faisabilité de la conduite automatique (conduite coopérative). Le projet, initialement prévu pour terminer en 1999, fût finalement écourté dès 1998. Les financements ont alors plutôt été dirigés vers des systèmes d'assistance pour l'amélioration de la sécurité avec des débouchés plus immédiats [13]. De plus, les véhicules développés dans le cadre de ce projet nécessitaient une infrastructure spécifique, dans un contexte où les routes étaient déjà saturées et où le développement de nouvelles infrastructures étaient non envisageables (coût et espace) [13]. Ceci a pu expliquer l'abandon de ce projet et montre encore une fois la nécessité de créer des systèmes de conduite autonome capables de s'adapter à leur environnement et non l'inverse.

- **1997-2002, DARPA et vidéo-surveillance, infrastructure.** Le *Visual Surveillance And Monitoring* (VSAM) est un projet financé par la DARPA (*Defense Advanced Research Projection Agency*) de 1997 à 1999 [66] [29]. L'objectif de ce projet était de permettre à un seul opérateur d'analyser le comportement d'un ensemble des scènes complexes civiles ou militaires [66]. Le système permettait ainsi de collecter des données sur le champ de bataille à partir de plusieurs caméras pour informer les équipes de commandement et améliorer les prises de décisions [29]. Le CMU a ainsi fourni un système de surveillance automatique multi-caméras pour ce projet [29]. Ce système permettait le suivi et la reconnaissance des différents éléments en mouvement sur les images. Le projet américain *Human Identification at a Distance* (HID) fut financé par la DARPA en 2000 et se termina en 2002. Ce projet avait pour objectif le suivi et l'identification des personnes sur les vidéos de surveillance [66].
- **1997-2005, IVI, véhicule.** Le programme américain IVI (*Intelligent Vehicle Initiative*) fût lancé en 1997 et se termina en 2005 [118] [117]. Il fut financé par le département des transports américain (USDOT) [83]. Ce programme avait deux objectifs. Le premier était de développer des systèmes de protection contre les collisions [93] [12]. Le second était de prévenir les situations de distraction du conducteur avec une phase de compréhension des ces situations.

3.1.3 - Japon

- **1973 - 1979, CACS, infrastructure.** Le premier projet visant à améliorer les systèmes de transport au Japon est le programme CACS (*Comprehensive Automobile Traffic Control System*). Il fut financé par le *Ministry of International Trade and Industry* (MITI) [38]. L'objectif de ce projet était de fournir une information en temps réel dans le véhicule pour optimiser les parcours des véhicules. Ceci devait permettre une réduction des problèmes de congestion, alors grandissants au Japon. Ce projet n'aboutit cependant pas à une application distribuée et commercialisée.
- **1984-1991, RACS, infrastructure.** Le projet RACS (*Road Automobile Communication System*) fut lancé au Japon par le ministère de la construction (MOC) [44]. Comme pour le projet CACS, la finalité est de produire un système embarqué dans le véhicule qui permet de donner des informations au conducteur. Un serveur central utilise les différentes sources d'information disponibles pour proposer des conseils d'itinéraires optimisés. Ces itinéraires sont alors retournés au conducteur par le système embarqué dans le véhicule.

Ce type de système, bien qu'à bord du véhicule, consiste plutôt à une optimisation de l'infrastructure. Les calculs sont en effet centralisés et le système embarqué n'est qu'un élément de communication émetteur-récepteur.

- **1987-1991, AMTICS, infrastructure.** Le projet AMTICS (*Advanced Mobile Traffic Information and Communication System*) fut quant à lui porté par l'agence de la police nationale japonaise (NPA, *National Police Agency*) [44]. Ce projet complète le projet RACS du côté de la NPA. L'objectif de ce système est de transmettre des informations audiovisuelles au conducteur sur l'état du trafic. Ces informations sont récoltées et centralisées par un centre de contrôle. Comme le projet RACS, bien que l'équipement proposé dans le cadre de ce projet soit embarqué, ce système repose sur des données centralisées et est donc plutôt en lien avec l'infrastructure.
- **1989-1995, ARTS, infrastructure.** Le projet ARTS (*Advanced Road Transportation Systems*) fut porté par le ministère de la construction japonais (MOC) [44]. Il porte sur le véhicule intelligent mais avec un point de vue infrastructure [38]. Ce projet visait en effet à imaginer toutes les fonctions potentiellement réalisables grâce aux systèmes d'information présents sur les réseaux routiers [38]. Le projet SSVS est son pendant côté véhicule.
- **1990-1995, SSVS, véhicule.** Le projet SSVS (*Super Smart Vehicle System*) porte sur le développement d'un véhicule intelligent. L'objectif est d'obtenir un véhicule prenant mieux en compte les aspects environnementaux, plus sûr (sécurité) et plus efficace (mobilité) [38]. Il consiste à utiliser toutes les technologies sur le traitement de l'information, la communication ou encore les systèmes de contrôle pour commencer à concevoir un véhicule automatisé à l'horizon 2010 ou 2020 [38]. Pour cela, quatre volets sont étudiés : les systèmes d'information à l'échelle du véhicule, les systèmes d'information entre véhicules, les systèmes d'information véhicule-infrastructure et les relations entre le véhicule et l'humain [128]. Ce projet fut financé par le MITI [128].
- **1991-2005, ASV, véhicule.** Le projet ASV (*Advanced Safety Vehicle*) avait pour objectif de promouvoir les recherches sur la sécurité des véhicules [44]. Pour cela quatre items étaient abordés : la sécurité préventive, la réduction des accidents, la réduction des blessures lors de la collision, et la réduction des blessures après la collision [43]. Pour l'aspect traitant de la réduction des accidents, le projet proposait d'utiliser les communications inter-véhicules [52] mais aussi avec l'infrastructure [43]. Il inclura la prise en compte des piétons [52], l'ACC, ou encore le LKA [43]. Ce projet se termina en 2005 par la démonstration d'un système avertissant la présence d'un piéton au conducteur lors d'une bifurcation au *Tokyo Motor Show* [52] et a abouti à des systèmes commercialisés par Toyota, Mitsubishi et Honda [43]. Ce projet était financé par le MOT (*Ministry Of Transportation*) [111].
- **1991-1994, AHSS, véhicule.** L'objectif de départ des recherches sur le AHSS (*Advanced Highway Safety System*) était la prévention des accidents de la route [43]. Ce projet (soutenu par le MOC) inclut trois phases graduées : les systèmes d'alerte, les systèmes de prévention et la conduite autonome [43]. En 1994, 24 acteurs de l'automobile, de l'électronique et des télécommunications ont rejoint le AHSS [43]. Le projet aboutit à une démonstration en 1995 et à la création de l'AHSRA en 1996 [43].
- **1991-2010, VICS, infrastructure.** Dans les années 1990, les deux projets RACS et AMTICS ont été combinés pour donner le projet VICS (*Vehicle Information and Communication System*) sous l'impulsion du ministère de la poste et des télécommunications japonais. Ce projet est donc porté par la NPA, le ministère de la construction japonais (MOC) mais aussi le ministère de la poste et des télécommunications. L'objectif de ce

projet était de proposer au conducteur un écran permettant de situer le véhicule sur une carte et de donner les informations sur le trafic pour choisir le meilleur itinéraire [44]. Pour cela, le véhicule communique avec l'infrastructure en reprenant les outils développés pour RACS et ATMICS [111]. Le projet VICS sera ensuite étendu à travers le projet Smartway [44].

- **1993 - Aujourd'hui, UTMS, infrastructure.** L'UTMS (*Universal Traffic Management Systems*) a pour objectif de développer les systèmes de gestion du trafic [84]. Le but est d'améliorer la réponse en cas d'accident afin d'augmenter la sécurité mais aussi afin d'améliorer la mobilité par l'information aux usagers et la gestion dynamique du trafic. Depuis 2012, l'*UTMS Society of Japan* a pour objectif de promouvoir les systèmes liés à l'UTMS.

1994-aujourd'hui, VERTIS, véhicule et infrastructure. Le regroupement VERTIS (*Vehicle, Road and Traffic Intelligent Society*) rassemble au Japon les industriels et les académiques autour de nombreux sujets liés aux ITS [44]. Son objectif est de promouvoir les ITS et de faire le lien entre le monde de la recherche fondamentale et les industriels [84]. Il s'occupe aussi de l'organisation des congrès mondiaux sur les STI. C'est l'équivalent japonais d'ITS America aux États-unis et de ERTICO en Europe.

- **1996 - 2010, AHSRA, véhicule et infrastructure.** Au Japon, l'AHSRA (*Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association*) regroupe plusieurs centres de recherche sur la thématique des aides à la conduite et de la conduite autonome. Le groupement AHSRA étudie, comme le AHSS, trois thématiques graduées : l'alerte au conducteur, l'aide à la conduite et la conduite autonome [43]. L'AHSRA devait au départ participer au développement des infrastructures et des capteurs mais elle a finalement aussi contribué au développement des véhicules [43]. L'AHSRA participa conjointement au gouvernement japonais au projet Smartway et à la démonstration ASHRA Demo 2000 [12].
- **2004-2007, Smartway, véhicule et infrastructure.** Le projet Smartway prend d'une certaine façon la relève des objectifs menés par l'ASHRA, du projet VICS et du projet ECT (*Electronic Toll Collection*, le système de péage électronique japonais) [44] [12]. L'objectif de ce projet est d'aboutir aux services suivants : suivi de file, prévision des collisions aux intersections, prévision des collisions avec les piétons [12] [118] mais aussi à proposer des informations sur l'état du trafic et sur les parcours optimaux. Smartway vise donc des enjeux d'optimisation des déplacements (efficacité des transports) et de sécurité. Ce projet a aussi pour but de faire adopter le système VICS et de le déployer. Smartway porte donc plus sur le développement de l'infrastructure que du véhicule.

3.2 - Véhicule autonome : les projets marquants.

- **1979 - aujourd'hui, CMU, États-unis.** L'équipe de l'université Carnegie Mellon (CMU) a développé de nombreux projets autour de la conduite autonome :
 - Navlab. La plateforme Navlab est développée depuis 1985. Le Navlab 1 est un van Chevrolet, les 2 et 4 sont des HMMWVs (véhicule militaire américain), le Navlab 3 est une Honda Accord, les Navlabs 6 et 7 sont des Pontiac Bonneville, les 5 et 8 sont des mini-vans, les Navalabs 9 et 10 sont des bus [120], enfin le Navlab 11 est une Jeep Wrangler [121]. Dès 1985, le premier Navlab a pu conduire de manière autonome à vitesse très réduite sur le campus de Pittsburg [123] [49]. Les 10 premiers Navlabs ont permis la démonstration (Demo 97) du NAHSC en 1997. Le système RALPH est par exemple implémenté et testé sur le Navlab 5 lors du

- CMU *coast to coast*. Les Navlabs sont principalement équipés de LIDARs, radars et de caméras stéréos. Sur les Navlabs, plusieurs systèmes de vision ont été développés : RALPH (*Rapidly Adapting Lateral Position Handler*) est un algorithme de positionnement latéral [98], SCARF (*Supervised Classification Applied to Road Following*) est destiné aux routes non structurées [31], YARF se concentre sur les routes structurées, ALVINN (Autonomous Land Vehicle In a Neural Network) permet de déterminer la position sur la route afin de guider le véhicule [97], UNSCARF permet de se diriger sur des routes non structurées, EDDIE permet de rassembler les données des différentes sources d'information, FERMI est conçu pour expliciter les modèles et leur but, enfin, MANIAC (Multiple ALVINN Networks In Autonomous Control) reprend et développe le système ALVINN.
- Boss. La Tartan Racing Team [129] fait partie des vainqueurs du DARPA *Urban Challenge* en 2007 avec son véhicule Boss. L'équipe inclut le CMU, General Motors (GM), Continental et Caterpillar. Le véhicule Boss est basé sur un Chevrolet Tahoe équipé de nombreux capteurs : GPS, radars, LIDARs, et caméras.
 - CMU SRX. La plateforme basée sur la Cadillac SRX est développée sur la base des travaux de la Tartan Racing Team en 2013. Les capteurs et les unités de calculs sont entièrement intégrés dans le véhicule. Cette plateforme utilise à la fois vision active et vision passive. Elle est soutenue par la *National Science Foundation* (NSF) et General Motors.
- **1986 - aujourd'hui, Daimler-Benz AG (DB) / Université de Bundeswehr Munich (UBM), Allemagne.** Les équipes de Daimler-Benz et de l'UBM ont proposé de nombreux projets de plus en plus évolués :
- La famille des véhicules BVV. Cette famille de véhicules a été développée à partir de 1990. Des modules de détection de route, de détection et de suivi d'obstacles [103] mais aussi un module de détection des lignes de bord de voie [126] ont été testés sur le BVV 3.
 - VaMoRs. Le véhicule de test VaMoRs est un van de 6 tonnes développé depuis 1986 [85]. Il est uniquement équipé de caméras (pas de vision active). A l'origine c'est le projet PROMETHEUS qui a permis le lancement de ce véhicule. Dès 1986, ce véhicule a pu atteindre une vitesse de 96km.h^{-1} en faisant du suivi de voie automatique [49] [118]. Ce véhicule fut utilisé jusqu'en 2004 pour les développements. Au total, ce véhicule a été testé sur près de 10000km sur plusieurs autoroutes [37].
 - VITA I. Le véhicule de test VITA (*Vision Technology Application*) est un van de 5 tonnes conçu en 1989 [48]. Il fut développé grâce aux financements du projet PROMETHEUS.
 - VITA II et VaMP. Les deux véhicules VITA II (appartenant à DB) et VaMP (appartenant à l'UBM) sont des Mercedes-Benz 500 SEL équipées uniquement de caméras [85] [48]. Ils ont été développés à partir de 1994 et leur efficacité fut démontrée à deux reprises en 1994 et 1995 [85]. Ils sont capables de détecter et de suivre les obstacles ainsi que de suivre la voie et d'effectuer des changements de voie. Le véhicule VaMP a été testé sur près de 10000km sur différentes autoroutes [37].
 - OSCAR. En parallèle des deux véhicules précédents, le véhicule OSCAR fut développé (en dehors du cadre PROMETHEUS) pour améliorer les systèmes de suivi de voie. Ce véhicule parcourut 10000km jusqu'à 180km.h^{-1} sur les routes publiques [48].

- OTTO. Le camion OTTO fut développé en 1995 avec pour objectif la conduite automatique coopérative. Pour fonctionner, ce système nécessitait l'émission d'un signal lumineux infrarouge par le véhicule leader. Un système de communication entre véhicules a aussi été ajouté [48]. Dans le cadre du projet européen Chauffeur, OTTO a ensuite été remplacé par un poids lourd de 40 tonnes. Dans ce cas, la conduite automatique en flotte a permis de montrer une réduction de la consommation de 10 à 20% [48].
- UTA I. Le système UTA (*Urban Traffic Assistant*) est développé pour des applications urbaines à l'inverse des projets précédents plutôt orientés sur la conduite sur autoroute. Plus particulièrement, l'objectif de l'UTA est de pouvoir faire du *Stop&Go* en conditions de congestion en ville. L'UTA I est une Mercedes classe S équipé uniquement de caméras stéréos. Son fonctionnement a été démontré en 1998 pour l'*Intelligent Vehicle Conference* dans la ville de Stuttgart [48].
- UTA II. L'UTA I a ensuite été remplacé par l'UTA II qui est une Mercedes classe E en conservant les mêmes objectifs [48]. L'UTA II comme l'UTA I n'utilise que des systèmes de vision passifs.
- Mercedes Benz S500 *INTELLIGENT DRIVE*. Ce véhicule a accompli le challenge Dailmer en 2013 [140] ce qui a permis de démontrer la faisabilité de la conduite autonome. Il est équipé de nombreux capteurs : quatre radars courte portée et grand angle (120°) pour les intersections, deux radars longue portée sur les cotés afin de gérer les intersections en route rurale, une caméra stéréo à l'avant du véhicule, une caméra monoculaire grand angle vers l'avant pour améliorer la détection des piétons et des signalisations, une seconde caméra monoculaire vers l'arrière pour l'estimation des déplacements [140].
- **1987-1990, *Personal Vehicle System (PVS)*, Japon.** Le véhicule PVS est financé par le MITI (Ministry of International Trade and Industry), Nissan, et Fujitsu [118] [117]. C'est un projet fondateur pour la conduite automatisée au Japon [118]. Le véhicule PVS fut capable de faire de la détection de voie et d'obstacles à une vitesse de $60km.h^{-1}$ en 1990 [91]. Pour cela, le véhicule est équipé d'un système de vision stéréoscopique [91].
- **1995 - Aujourd'hui, VisLab - Université de Parme, Italie.** Le VisLab est un laboratoire de l'université de Parme qui est à l'origine de plusieurs projets de plus en plus développés :
 - MOB-LAB (*MOBile LABoratory*). Le MOB-LAB est une plateforme financée par le projet PROMETHEUS. Elle a permis le développement du système GOLD (*Generic Obstacle and Lane Detection*) et fut testée lors du *PROMETHEUS BMM Meeting* [7] et du *MilleMiglia in Automatico Tour* [8]. Le MOB-LAB est un véhicule conduit par un opérateur (pas de conduite autonome), cependant, il prévient le conducteur en cas de présence d'obstacles ou de comportement anormal. Il est équipé uniquement de caméras stéréos, sans aucun capteur de vision active [5]. Le système GOLD a ainsi été testé sur plus de $3000km$ et jusqu'à $80km.h^{-1}$ sur le MOB-LAB [5].
 - ARGO. Le véhicule ARGO est basé sur une Lancia Therna 2000 équipée d'une caméra stéréo [7] [20]. Il reprend le système GOLD développé sur le MOB-LAB. Le véhicule ARGO est un véhicule capable de conduire de façon autonome à l'inverse du MOB-LAB. Il sera testé pour la démonstration *MilleMiglia in Automatico Tour* en 1998.
 - Terramax. Le véhicule Terramax est le véhicule développé pour participer au DARPA *Grand Challenge* en 2007 [17]. Ce véhicule est basé sur un poids lourd tactique

- Oshkosh Truck (véhicule militaire). Il est équipé de très nombreux capteurs dédiés à la localisation et à la navigation (suivi de voie et détection d'obstacles) : un GPS couplé à une centrale inertielle, des LIDARs mono-plan et multi-plans, un système de vision passif (caméra trinoculaire).
- TerraMax T2. Le véhicule Terramax T2 reprend la même base que le Terramax avec des développements afin de participer au DARPA *Urban Challenge* en 2007.
 - Hyundai Grandeur. Ce véhicule a servi de démonstrateur lors de l'*Intelligent Vehicle Conference* de 2008 [14]. Il utilise les mêmes systèmes que le Terramax mais sur un véhicule commercialisé au grand public et de manière intégrée.
 - Plateforme BRAiVE . Cette plateforme, basée sur un véhicule électrique, utilise 10 caméras (parmi lesquelles des monoculaires et des stéréos), 3 LIDARs, un télémètre laser, et un GPS couplé à une centrale inertielle [21]. Cette plateforme a servi de démonstrateur lors du VIAC en 2010.
 - Véhicule BRAiVE. Il reprend les mêmes principes que la plateforme BRAiVE mais de manière complètement intégrée [14]. C'est le démonstrateur utilisé lors du *PROUD-Car Test* en 2013.
- **1995 - aujourd'hui, Institut Pascal (anciennement LASMEA), France.** Depuis 20 ans, les équipes de l'Institut Pascal (anciennement LASMEA) travaillent sur les ADAS avec de grands constructeurs (Renault, PSA, Daimler-Benz). Les travaux sur cette thématique ont débuté lors du financement européen PROMETHEUS. Le laboratoire a ensuite développé plusieurs générations de véhicules électriques et instrumentés :
- CYCAB. Le CYCAB est le premier véhicule développé par le laboratoire en 2002. L'objectif est alors déjà le développement d'un véhicule électrique autonome. Les sujets de recherches abordés grâce à ce véhicule sont la vision par ordinateur, la fusion de données multi-sensorielle (capteurs de différentes technologies), et le contrôle de robots. Ces véhicules sont mis en œuvre sur la plateforme PAVIN (Plate-forme d'Auvergne pour Véhicules Intelligents) [79]. Ils sont équipés de GPS, de centrale inertielle, de caméras et de LIDARs.
 - VIPA. Le véhicule VIPA est développé par le consortium VIPA (Véhicule Individuel Public Autonome) qui regroupe l'Institut Pascal, le bureau d'études APOJEE et le constructeur automobile LIGIER. L'objectif de ce consortium est de transférer les résultats obtenus par l'Institut Pascal sur les CYCAB sur un véhicule autonome commercialisable. Cette navette autonome (ou ascenseur horizontal) permet de transporter en toute sécurité de 4 à 6 personnes dans des sites protégés (sites industriels, aéroports, parcs). Elle doit s'adapter aux piétons aux alentours, elle ne nécessite aucune infrastructure de guidage et roule de 5 à 20 km.h⁻¹. Ce véhicule démontra ses capacités sur le site industriel d'Airbus et sur le site d'un hôpital auvergnat. Il est équipé des mêmes instruments que le CYCAB.
 - EZ-10. Le prototype VIPA fût ensuite repensé et déployé pour la vente par la joint-venture EASYMILE à partir de 2015 sous le nom d'EZ-10.
- **2010, Google Car, États-unis.** La Google Car est une voiture autonome développée par une équipe de Google depuis 2009. Parmi les membres de l'équipe projet, ont figuré Thrun et Urmson respectivement les chefs des projets Stanley et Sandstorm, les véhicules vainqueurs du DARPA *Grand Challenge* 2005. Leurs équipes ont aussi remporté le DARPA *Urban Challenge* en 2007. La Google Car utilise uniquement des capteurs de vision actifs (LIDARs) [60], or ces capteurs sont très onéreux. Cette voiture a tout de

même prouvé la possibilité de la conduite entièrement autonome en Californie. En tout, plus d'un million de kilomètres ont été parcourus de manière autonome par ce véhicule d'après Google.

- **Les autres véhicules d'essai.** Quelques autres véhicules ont permis le développement des ADAS et de la conduite autonome dans les laboratoires. Le véhicule PVR III (POSTECH Road Véhicule de la *Pohang University of Science and TEchnology* en Corée du Sud) mis en place sur un van Hyundai au milieu des années 1990 [75]. Le véhicule de l'université du Michigan MOSFET (*Michigan Offroad Sensor Fusing Experimental Test-bed*) à la même période[4]. Enfin, le *Park Shuttle* déployé dans la ville de Rotterdam en 1999, qui est une navette autonome qui parcourt 1,3km automatiquement. Cette navette est guidée par un signal magnétique.
- **2000 - aujourd'hui, Les commercialisations.** Deux grandes catégories de commercialisations sont en cours : sur les routes et sur les sites privés.

Sur les routes, les grands acteurs sont les équipementiers (VALEO, Continental, Bosch), les constructeurs automobiles (Audi, Daimler-Benz, Volvo, Ford, Peugeot, Renault, entre autres), mais aussi des acteurs nouveaux de la perception et de la vision artificielle comme Mobileye. La caméra intelligente de Mobileye équipe par exemple de nombreux véhicules lors du DARPA *Urban Challenge* et elle équipe aussi des véhicules de série dès 2007 (Volvo, BMW et General Motors). En 2015, le CES (*Consumer Electronics Show*) de Las Vegas ou encore le congrès mondial ITS de Bordeaux ont permis de montrer les nombreuses possibilités déjà offertes sur le marché de l'automobile. Ainsi, le niveau 2 SAE est déjà commercialisé sur les routes avec le *Traffic Jam Assist* ou encore l'*Active Park Assist*. La faisabilité du niveau 3 SAE a aussi été montrée avec des systèmes comme le Cruise4U de VALEO, l'Audi A7, le Link&Go d'Akka Technology (dont le concept à terme est de niveau 5), ou encore les véhicules développés par VEDECOM. L'enjeu majeur pour la commercialisation des niveaux 3 et 4 sur les routes est la validation, le test et la fiabilisation des systèmes en toutes conditions. Cela nécessite un recul sur les systèmes déjà en place sur le marché (démarche d'innovation incrémentielle) mais aussi la mise en place de nouveaux protocoles de tests inédits dans le domaine automobile.

Sur les sites privés, différents exemples de véhicules complètement autonomes sur des parcours fixes existent. Ces véhicules entièrement automatisés sont donc de niveau SAE 4 (conduite automatique en toutes situations pour un parcours spécifié). Cinq facteurs rendent possible le déploiement commercial du niveau 4 dans ces conditions où les véhicules sont utilisés sur des sites privés ou sur des zones sans circulation routière. Premièrement, à part dans des cas très précis (véhicules de test ou région restreintes), la réglementation ne permet en effet pas encore l'utilisation de véhicules autonomes sur les routes à l'échelle mondiale. Ensuite, les véhicules autonomes commercialisés sont des véhicules de transport mutualisés qui roulent à des vitesses faibles (moins de $40km.h^{-1}$). À cette vitesse les distances de freinage sont très courtes (freinage quasi instantané possible) ce qui permet de bloquer le véhicule en cas d'intrusion d'un obstacle sur son chemin. Troisièmement, comme le parcours est toujours le même, le véhicule n'a pas besoin de pouvoir aller dans de nouveaux endroits ce qui simplifie la tâche de programmation. De plus, ces véhicules sont équipés de LIDARs car se sont des capteurs très fiables pour la détection des obstacles. Ces capteurs sont trop onéreux pour un déploiement sur des véhicules de série grand public même si leur coût reste acceptable dans le cas de navettes à usage public ou partagé. Enfin, l'étape de validation en toutes conditions qui est le blocage majeur dans le domaine automobile est ici contournée par le fait que le véhicule est utilisé sur des voies réservées. En effet, si le véhicule rencontre une

quelconque anomalie (obstacle, conditions non supportées par l'automate, problèmes techniques) la stratégie adoptée est l'arrêt complet du système. Cette stratégie assure une sécurité maximum dans le cas de voies réservées sur lesquelles seuls des piétons ou des véhicules circulant à basse vitesse sont présents. Elle n'est en revanche pas envisageable sur une route à vitesse plus élevée et avec d'autres véhicules plus rapides. De plus, pour la même raison, même si ce système permet d'atteindre le niveau 4 SAE, le service peut-être interrompu à tout moment. Parmi les véhicules rencontrés dans cette catégorie deux exemples peuvent être données. Le véhicule Navya de la marque Induct est une navette développée depuis 2004 et commercialisée depuis 2012. Depuis 2014, l'utilisation de Navya est possible sur la voie publique en France (sur autorisation du Maire et sur une voie réservée). Ce véhicule utilise un système de guidage par satellite (DGPS) et des télémètres lasers (LIDARs) pour la détection d'obstacles. Le véhicule EZ-10 commercialisé par EASYMILE (joint-venture entre LIGIER et Robosoft) depuis 2015 qui est une navette autonome pouvant transporter jusqu'à dix personnes. Ce véhicule autonome est le fruit de recherches débutées en 2002 à l'Institut Pascal. Il utilise un système de deux caméras, une à l'avant et une à l'arrière, pour le guidage et des LIDARs pour la détection d'obstacles.

3.3 - Véhicules autonomes : les grandes démonstrations.

- **1977 et 1985, premières démonstrations de conduite autonome, Japon et États-unis.** Le premier véhicule autonome fut développé par le laboratoire de Tsukuba (*Tsukuba Mechanical Engineering Laboratory*) au Japon en 1977 [47]. Ce véhicule était capable de suivre les lignes blanches dans une rue et atteint une vitesse de 20mph (environ 30km.h^{-1}) [47]. En 1985, le Navlab est le premier véhicule développé aux États-unis à conduire de manière autonome à vitesse très réduite sur le campus de Pittsburg [123] [49].
- **1986, première démonstration sur route, Allemagne.** Le véhicule VaMoRs roula de façon autonome sur une portion d'autoroute fermée sur 20km et atteignit une vitesse de 96km.h^{-1} [118]. Seul le contrôle latéral était alors inclus car il n'y avait pas d'obstacles potentiels sur la route. Cette performance a été permise grâce au filtrage de Kalman [49]. C'est la première démonstration de niveau 1 SAE sur route.
- **1992, TravTek, États-unis.** Cette démonstration financée par l'USDOT a pour objectif de démontrer le bénéfice de l'itinéraire optimisé et du guidage automatique du conducteur par un système de navigation [83]. Pour cela, les itinéraires et le comportement des conducteurs avec et sans guidage GPS ont été comparés. L'étude montre que les conducteurs avec GPS et guidage automatique commettent moins d'erreurs [83].
- **1994, PROMETHEUS BMM Meeting, France.** Le *PROMETHEUS BMM Meeting* a eu lieu à Paris en 1994 [49]. Les véhicules VITA II et VaMP y ont été présentés [85]. Ils ont été capables de conduire de manière autonome dans une circulation dense avec des changements de voie. Ils ont pu atteindre une vitesse de 130km.h^{-1} [37]. Le niveau 2 de la SAE est donc ainsi atteint sur route.
- **1995, CLEOPATRA consortium meeting, Allemagne.** En 1995, le véhicule VaMP est testé sur un parcours de 1600km de Odense (où se déroulait la réunion du consortium CLEOPATRA) à Munich [85]. Le parcours empruntait plusieurs autoroutes dont l'*Autobahnen* qui n'a pas de limitation de vitesse. La conduite était automatique avec le maintien sur la voie, la régulation de vitesse adaptative et le changement de voie.

L'opérateur se chargeait simplement de choisir la vitesse maximale et de déclencher les demandes de changement de voie (en prenant garde à l'angle mort non pris en compte dans ce cadre) [85]. 95% du trajet a ainsi pu être réalisé de manière autonome [85]. Le véhicule a alors atteint une vitesse supérieure à 175km.h^{-1} [140] [37]. La plus longue distance consécutive sans intervention du conducteur fut de 158km [49]. En moyenne, une intervention du conducteur était nécessaire tous les 9km [49].

- **1996, CMU No Hands Across America, États-unis.** L'équipe de l'Université Carnegie Mellon (CMU) a testé son système RALPH en 1996 [99]. Ce test comportait un parcours de 2850miles (environ 4800km) reliant Washington D.C. à San Diego. Le système RALPH a pour cela été implémenté sur le Navlab 5 du CMU. L'objectif était alors uniquement le maintien sur la voie (contrôle automatique du braquage). Le contrôle de l'accélération et du freinage était faite par un opérateur. Pour cette démonstration, le système RALPH n'utilise qu'une seule caméra monoculaire. Le Navlab 5 a ainsi pu parcourir 98,1% du parcours sans intervention du conducteur pour le braquage.
- **1997, NAHSC Demo 97, États-unis.** La NAHSC a voulu montrer en 1997 la faisabilité de la conduite coopérative (sous le sigle AHS - *Automated Highway System*) [114]. Huit véhicules ont ainsi roulé sur une route instrumentée spécifiquement et fermée pour l'occasion ($7,6\text{miles}$ soit 12km en Californie) à une vitesse de 97km.h^{-1} et avec une distance inter-véhicules de $6,5\text{m}$. Les véhicules étaient équipés de radars, de LIDARs et de caméras, et ils pouvaient communiquer entre eux [122]. Leur guidage était assuré par un système à induction (aimants placés sur la route) [69]. Après cette démonstration, les financements de la part du ministère des transports américain (USDOT) se sont cependant arrêtés, mettant un terme aux recherches. En effet, l'instrumentation des routes et l'utilisation de voie réservées n'étaient alors pas envisageables. Le *Demo 97* aura quand même permis de montrer les travaux réalisés entre 1994 et 1998 au grand public.
- **1998, MilleMiglia in Automatico Tour, Italie.** Le véhicule ARGO a parcouru 2000km sur les routes italiennes en juin 1998 [8]. Lors du parcours, le véhicule ARGO conduisit 94% du trajet de façon autonome et il a atteint une vitesse de 123km.h^{-1} [19]. Ce parcours comprenait entre autres des tunnels et des ponts. Le véhicule ARGO est capable de faire des changements de voies [19] et il avait la possibilité de demander au conducteur de reprendre le volant lorsqu'il détectait qu'il ne pouvait plus assurer la conduite automatique. Il a réussi à le faire dans plusieurs cas rencontrés sur le parcours [19]. Le niveau 3 de la SAE est donc atteint par le véhicule ARGO. Coté système, le véhicule ARGO n'est équipé que de capteurs passifs (caméras et tachymètre) [19]. Il embarque le système de vision GOLD. Le système GOLD utilise alors la stéréo vision pour la détection d'obstacles et une camera monoculaire pour le suivi de voie [19].
- **2000, ASHRA Demo 2000, Japon.** En 2000, 38 véhicules (voitures, poids-lourds et bus) ont démontré les possibilités que peuvent apporter les STI concernant la sécurité des déplacements [47]. Les systèmes présentés comportaient un volet sur l'information avancée au conducteur et un volet sur le contrôle du véhicule assisté [13]. Pour ce second volet, les véhicules faisaient du suivi de voie par guidage magnétique [47].
- **2000, NAHSC Demo 2000, Japon.** Le NAHSC a mis en place un test de véhicules autonomes (conduite coopérative) en 2000 [127]. Ce test a eu lieu sur le circuit de Tsukuba au Japon [113]. Les véhicules étaient équipés de DGPS, de systèmes de communication inter-véhicules, de LIDARs, de radars et de caméras. A l'inverse du *Demo 97*, l'infrastructure n'était pas équipée spécifiquement. Plusieurs tâches ont été testées : démarrage et arrêt de la flotte, séparation de la flotte en deux, rassemblement de deux flottes en une, évitement d'obstacles, dépassement d'un des véhicules.

- **2004, DARPA Grand Challenge, États-unis.** Le premier *Grand Challenge* fut annoncé par la DAPRA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) en 2003. Ce challenge avait pour but de trouver des véhicules capable de conduire de manière complètement autonome sur des pistes dans le désert. Malgré le succès rencontré par ce challenge (15 participants), aucun véhicule ne réussit à compléter entièrement le parcours imposé [117].
- **2005, DARPA Grand Challenge, États-unis.** L'année suivante la DARPA relança le même concours avec une course de 212km dans le désert de Mojave [131]. Lors de cette seconde édition, plusieurs véhicules ont réussi à terminer la course : Stanley [125], Sandstorm [131] et H1ghlander [131]. Tous ces véhicules utilisent principalement des systèmes de vision active (LIDAR, radar).
- **2007, DARPA Urban Challenge, États-unis.** En 2007, suite au succès rencontré par le DARPA *Grand Challenge*, la DARPA lança un nouveau concours [130]. Ce concours est de nouveau une course, de 97km, mais en milieu urbain cette fois-ci. Les véhicules autonomes devaient donc respecter les règles de circulation, mais aussi interagir avec des véhicules en mouvement sur les voies de circulation. Dans ce contexte urbain, les signalisations horizontales sont particulièrement importantes. Or, les véhicules du challenge précédant utilisaient majoritairement les données issues de capteurs de vision active (LIDAR, radar) qui ne sont pas capables de détecter ces éléments. Les six vainqueurs du DARPA Urban Challenge utilisent donc, en complément de la vision active, des caméras monoculaires ou stéréoscopiques. La Team Cornell [23] utilise des systèmes de vision active couplés à des informations issues d'une caméra Mobileye pour la détection des signalisations horizontales et des autres véhicules. La Ben Franklin Racing Team [82] utilise des systèmes de vision active couplés à une caméra stéréo pour la détection des signalisations horizontales et des véhicules. La Team MIT [119] utilise des systèmes de vision active pour la détection des autres usagers et une caméra pour la détection des signalisations horizontales, cette détection est faite par un algorithme développé au MIT en complément de l'algorithme développé par Mobileye. L'équipe Victor Tango [104] utilise deux caméras monoculaires pour la détection des marquages au sol en complément de capteurs de vision active pour la détection d'obstacles. La Stanford Racing Team [116] utilise six caméras monoculaires pour avoir une vue à 360 autour du véhicule qui permet la détection des marquages au sol en complément de capteurs de vision active pour le reste. Enfin, la Tartan Racing Team (CMU) [129] utilise une caméra et le système de vision Mobileye pour compléter la détection des signalisations horizontales (fait à l'origine par LIDAR).
- **2010, VisLab Intercontinental Autonomous Challenge (VIAC), Italie - Chine.** Ce challenge organisé par le VisLab consistait à tester la plateforme BRAiVE (VisLab). Le parcours, de plus de 13000km reliant Parme en Italie à Shanguai en Chine, comprenait tous les types de routes (autoroutes, routes, voies urbaines, pistes) [21]. Un premier véhicule automatique assisté (suivi de la route automatique avec vision et guidage par un opérateur aux endroits difficiles) permettait de créer un itinéraire GPS, alors qu'un second suivait l'itinéraire initialisé par le premier de façon complètement autonome (guidage GPS et vision) [21]. Cette démonstration se déroula sur 3 mois [21]. Plus de 8000km ont été parcourus de manière autonome. Le plus long parcours autonome sans interruption dura plus de 8 heures (273km consécutifs) [21]. La vitesse moyenne fut de 40km.h⁻¹ et la vitesse maximale de 70km.h⁻¹ [21]. La plateforme BRAiVE est un véhicule électrique équipé de nombreux capteurs : cameras, LIDARs, télémètres lasers, radars, GPS, et centrale inertielle. Certains algorithmes n'ont pas pu être testés en direct : cartographie

du terrain et estimation de la pente, détection des zébras, détection des piétons, détection des tunnels et estimation de la visibilité. Ces algorithmes ont été testés hors ligne sur les données enregistrées lors de la démonstration.

- **2011, Grand Cooperative Driving Challenge (GCDV), Pays-bas.** Le GCDV est un challenge dans lequel les véhicules roulent en flotte [96]. Pour cela, ils maintiennent automatiquement une distance inter-véhicules constante et ils sont capables de communiquer entre eux. Onze équipes ont participé à ce challenge qui a permis de montrer les possibilités offertes par les échanges d'information entre véhicules.
- **2013, VisLab PROUD-Car Test (Public ROad Urban Driverless-Car, Italie.** Le *PROUD-Car Test* est une démonstration de véhicule autonome en centre ville [133]. Les conditions urbaines sont en effet difficiles pour les véhicules autonomes (marquages absents, voies multiples, piétons). Le véhicule BRAiVE sert alors de démonstrateur de la faisabilité de la conduite autonome en ville. Il utilise deux caméras frontales (stéréo) pour détecter les obstacles (piétons, cyclistes et véhicules), détecter et lire les feux de circulation, détecter la position des signalisations horizontales, et reconstruire le profil du terrain, un LIDAR frontal et deux LIDAR latéraux, pour détecter les véhicules alentours et les cotés des tunnels, et enfin, deux caméras tournées vers l'arrière pour détecter les véhicules sur les voies adjacentes [133]. Il est important de remarquer que le véhicule BRAiVE possède des capteurs intégrés et pourrait être considéré comme prêt à la commercialisation en termes d'intégration.
- **2013, Challenge Daimler, Allemagne.** En 2013, l'équipe de Daimler teste la Mercedes Benz S500 *INTELLIGENT DRIVE*, entièrement autonome, sur un parcours de 103km en Allemagne [140]. Ce parcours comporte des routes de campagne, des villages et des milieux urbains. Le véhicule a atteint une vitesse de $50km.h^{-1}$ en ville et de $100km.h^{-1}$ sur les routes hors agglomération (vitesse maximale autorisée dans les deux cas). Il demanda deux interventions du conducteur alors que la voie était bloquée, le véhicule n'avait en effet pas l'autorisation de changer de voie seul. La Mercedes Benz S500 *INTELLIGENT DRIVE* utilise une carte digitale de haute résolution avec des informations de haut niveau (limitations de vitesse, passages piétons, stop) et suit un parcours pré-établi à l'avance [49]. Le véhicule suit donc ce parcours en prenant en compte les règles de circulation et les autres usagers. Il utilise pour cela : un GPS, une centrale inertielle, deux caméras grand angle (avant et arrière) pour la détection des piétons, la détection et la lecture des feux de signalisation et la localisation, une paire de caméras (stéréo) vers l'avant pour la détection, la localisation et la reconnaissance d'obstacles (piétons, véhicules) et la détection et le suivi des signalisations horizontales. Comme pour le véhicule BRAiVE, les capteurs de la Mercedes Benz S500 *INTELLIGENT DRIVE* sont très bien intégrés. Ce véhicule est donc prêt à la commercialisation en termes d'intégration.
- **2015, Congrès ITS Bordeaux, France.** Le congrès ITS Bordeaux a été une nouvelle occasion de démontrer la faisabilité de la conduite autonome. VEDECOM, Valeo, ou encore Easymile ont pu démontrer que les véhicules autonomes sont fonctionnels, même sur des parcours empruntant des voies de circulation classiques, avec d'autres usagers de la route. Ces essais ont été rendus possibles par une dérogation sur l'agglomération de Bordeaux et avec la présence d'un conducteur désigné, prêt à reprendre la main, derrière le volant.

L'essentiel



- Les systèmes intelligents doivent prendre en compte l'homme et non l'inverse, ceci inclut : communication, interface, compréhension, design.
- Les systèmes intelligents doivent être capables de s'adapter à leur environnement et non l'inverse.
- D'après l'historique et les démonstrations, le véhicule autonome n'est pas une utopie.
- Les clefs de la réussite pour un STI : technologie performante (capteur et traitement), communication (véhicule et infrastructure), fusion de données (et non juxtaposition), HMI pensée (et non déduite), plateforme de développement et de recherche unifiée et partagée, être légalement et commercialement viable, être adapté à son environnement.
- Les programmes de financement publics sont la clef de voute du développement de nouveaux systèmes. Ces systèmes sont commercialisés entre 20 et 30 ans après leur conception dans le cadre de la recherche fondamentale.
- Le principal enjeu pour le véhicule autonome sur les routes et sa validation en toutes conditions. C'est le point de blocage pour la commercialisation du niveau SAE 3.
- Les objectifs partagés des STI sont : la sécurité, l'efficacité énergétique, l'optimisation des déplacements, l'augmentation du confort, ou encore l'information aux usagers.

4 - Les capteurs existants en contexte routier

4.1 - Les capteurs pour les STI en général

4.1.1 - Introduction

Mettre en place des STI implique de pouvoir obtenir des données sur les conditions de trafic en temps réel. Il faut pour cela utiliser des capteurs capables de mesurer divers éléments sur l'environnement et le comportements des usagers de la route (véhicules, piétons, cyclistes, motos).

Pour être efficace et sûr, un STI doit être validé dans de nombreux cas de figure et être très robuste. Parmi ces conditions particulières on peut citer : le comportement humain imprévisible, le changement d'environnement, l'usure (mécanique, variation thermique), le volume de trafic, les changements d'illumination ou de conditions météorologiques. Plus particulièrement, la partie acquisition inclut la mesure des données réelles de la manière la plus fiable possible. Cette dernière doit dans le même temps rester à un coût minimum, particulièrement pour des déploiements importants comme ceux faits par les industriels de l'automobile. D'un point de vue général, les systèmes d'acquisition sont nombreux. Embarqués, ils peuvent mesurer des données sur le véhicule ou sur l'extérieur. Sur l'infrastructure, ils peuvent être installés dans la chaussée, en hauteur ou à côté de la voie. C'est sur ces différents aspects que doivent être étudiés les capteurs utilisés à la base des STI.

Des calculateurs sont bien entendu nécessaires en plus des capteurs pour analyser les données. Différents modules d'analyse co-existent souvent ce qui peut poser des problèmes d'assemblage, de coût (par multiplication des calculateurs). La stratégie actuellement adoptée tend plutôt à utiliser un calculateur central qui permet de gérer l'allocation des ressources selon les conditions rencontrées. Des systèmes de type boîte noire apparaissent aussi. Ces derniers font

l'acquisition et le traitement de données en interne puis ils ne transmettent que des informations déjà traitées et interprétées (Mobileye par exemple). Ces variantes concernant l'architecture ne seront pas décrites plus en détail ici.

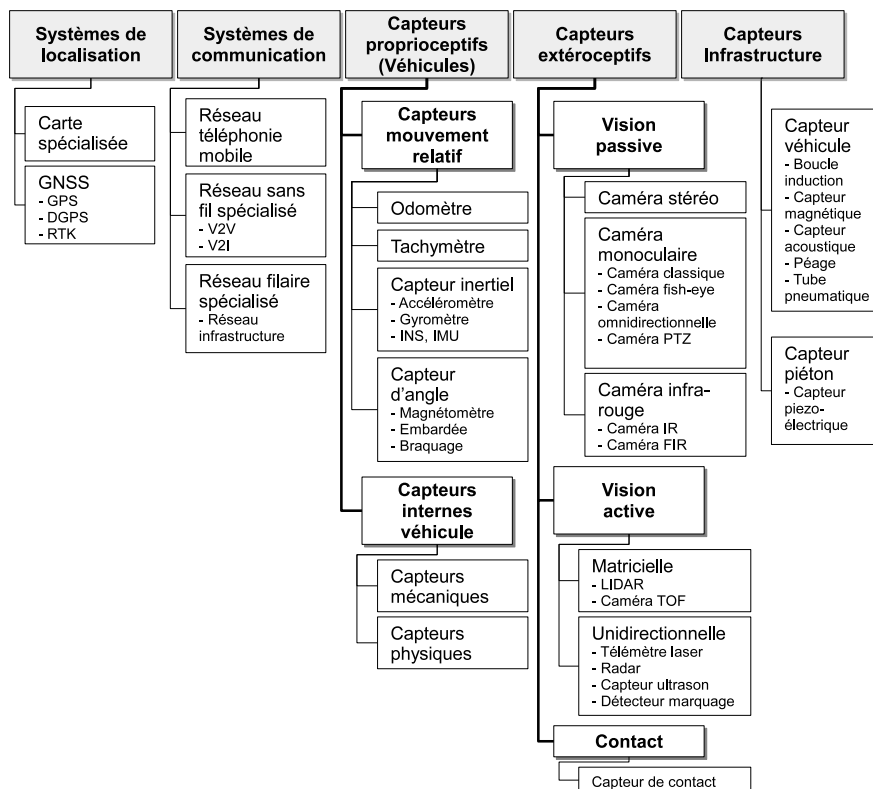


Figure 2 – Les différents capteurs rencontrés dans le domaine routier par catégories.

4.1.2 - Principales familles de capteurs

Avant de se concentrer sur les capteurs de type vision, un aperçu des différents type de capteurs doit être fait (voir figure 2 pour classement) :

Carte spécialisée. Les cartes ne sont pas des capteurs au sens propre du terme. Elles permettent cependant d'obtenir une information, acquise préalablement par des capteurs lors de la création de la carte. Les cartes destinées à la conduite automatique devront être très détaillées avec plusieurs couches. Ainsi, en plus de donner la localisation, elles devront contenir des données à haut niveau sémantique comme les directions (informations topologiques), les signalisations, les points de repère, les informations sur les conditions de circulation... L'information est donc déportée : au lieu de devoir la chercher dans la scène par des capteurs, cette dernière est directement lue (et interprétée) sur la carte.

Global Navigation Satellite System (GNSS). Le terme GNSSs correspond à Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites. Cela comprend entre autres les systèmes : GPS/DGPS (américain), Glonass (russe), Beidou-2/Compass (chinois) et Galileo (européen). Ces capteurs se servent des satellites pour estimer leur position sur la planète.

Alors que les GPS manquent de précision pour une application embarquée (précision de l'ordre du mètre), les DGPS (*Differential GPS*) peuvent aller jusqu'à une précision de l'ordre de 10cm. Avec la technique du *Real Time Kinematic* (RTK), utilisant l'information liée à la phase, cette précision peut passer à l'ordre du centimètre. L'utilisation d'un GNSS n'est possible qu'à condition d'avoir une carte très précise et actualisée de l'environnement. Ce capteur seul ne peut suffire car il ne permet pas d'éviter des obstacles en mouvement par exemple. Les capteurs GNSS posent problème dans des situations de canyon (comme dans une rue) car il y a alors un phénomène d'écho sur les parois des bâtiments. Il faut de plus que les satellites soient visibles depuis le capteur pour une localisation ce qui le rend inutilisable par endroit (tunnel par exemple).

Réseau de téléphonie mobile. Les réseaux de téléphonie mobile permettent le transfert de données (voix, ou données numériques). Ces systèmes pourraient permettre la communication entre véhicules et avec l'infrastructure. Ils permettent aussi d'acquérir la position des terminaux en fonctionnement. Ainsi, des données sur le volume et les vitesses des déplacements sur le réseau peuvent être obtenues à très grande échelle, et cela sans intervention des utilisateurs. Avant cela, le réseau de téléphonie mobile a permis par le biais d'un numéro d'urgence et d'un standard au centre de contrôle de recueillir des informations sur le réseau (accident, incident, objets sur la voie) [27]. Ce réseau de téléphonie mobile peut être complété par un réseau d'appel d'urgence (RAU). Le RAU comporte des bornes d'appel d'urgence régulièrement espacées le long de la voie pour que les usagers rapportent les incidents rencontrés sur les voies à un opérateur. Ce réseau filaire est cependant voué à être remplacé par de la téléphonie mobile sauf dans les zones non couvertes.

Réseaux spécialisés. Les réseaux de communication sans fil seront un élément clé pour le développement des STI. Ces derniers nécessitent en effet une coopération entre l'infrastructure et le véhicule (V2I), entre les véhicules (V2V) mais aussi tout au long de l'infrastructure. Ces réseaux devront être sécurisés et rapides. Ils pourront aussi permettre, comme les réseaux de téléphonie mobile, la localisation des véhicules connectés.

Capteur mouvement relatif. La famille des capteurs de mouvement relatif regroupe de nombreux capteurs : tous les capteurs d'odométrie qui permettent de mesurer la position relative du véhicule en mouvement, les capteurs de vitesse et d'accélération, ou encore les capteurs d'angle. Pour acquérir les données du véhicule, il est possible de passer par le CAN (*Controller-Area-Network*) du véhicule qui contient toutes les informations disponibles (sur l'angle de braquage, la vitesse...). Pour ce qui est des données liées à l'accélération, l'ajout d'une centrale inertielle, IMU (*Inertial Measurement Unit*, ou INS *Inertial Navigation System*) est la solution privilégiée car toutes les données sont alors disponibles directement.

Caméra stéréoscopique. Les caméras stéréoscopiques (ou caméras stéréo) sont nommées ainsi car ce type de capteur est en fait composé de deux caméras légèrement espacées. Ce type de capteur utilise le même principe que celui de nos deux yeux afin de mesurer la profondeur. Certains systèmes utilisent parfois trois caméras mais le fonctionnement reste le même, la caméra supplémentaire servant à affiner les résultats. Une caméra stéréo utilise la différence obtenue entre les deux images acquises pour déterminer la distance des objets. En effet, la différence entre les deux images obtenues dépend de la distance à laquelle se situe le point ciblé. Les caméras stéréo peuvent renvoyer, en plus de la distance calculée, l'une des images de la paire comme une caméra monoculaire standard, c'est pour cela que l'on parle parfois de caméra RGB-D (D pour *Depth*). Les algorithmes appliqués aux caméras monoculaires peuvent donc être déployés sur

les caméras stéréo. Ces caméras peuvent être en couleur, en noir et blanc ou en infra-rouge. Elle donnent une information profondeur dense (c'est à dire de grande résolution) même si la précision sur la profondeur est faible. Comme le rappel [11], les caméras stéréo permettent d'affiner les résultats obtenus en monoculaire. Par exemple, l'information profondeur permet de mieux distinguer les objets avant que l'information contenue dans l'image classique puisse permettre une identification. De même, les occlusions sont mieux gérées grâce à l'information profondeur. Enfin, cette information profondeur permet de mieux définir l'échelle des objets recherchés que dans le cas d'une caméra monoculaire.

Caméras monoculaires. Les caméras monoculaires, à l'inverse des caméras stéréo, ne comportent qu'un seul capteur de vision. Cela signifie que l'on ne bénéficie que d'un seul point de vue lors de l'acquisition. Il existe différents champs de vision pour les caméras. Ainsi on retrouve les caméras standard (voir grand-angle), les caméras *fish-eye* (vision à 180°) et les caméras omnidirectionnelles (vision à 360° d'au dessus). Il existe aussi dans le domaine de la surveillance des caméras de type *Pan Tilt Zoom* (PTZ) qui sont montées sur des axes rotatifs motorisés. Un opérateur peut ainsi orienter la caméra et régler le zoom à volonté. Les caméras sont dans la plupart des cas orientées vers la scène (sur l'infrastructure en direction des voies, sur le véhicule orientée vers l'avant, vers l'arrière, sur les cotés). Certaines applications utilisent cependant à présent des caméras pour filmer le conducteur.

Caméras infrarouge. Il existe deux grandes catégories de caméras infrarouge. La première est composée de caméras infrarouge proche (*Near InfraRed*, NIR, ou *Short Wave InfraRed*, SWIR, longueur d'onde de l'ordre du micron). Ces caméras permettent de voir dans le noir par projection d'une lumière infrarouge (caméra active) ou en détectant la chaleur émise par les corps filmés sans projection (caméra passive). Cependant, dans le second cas la détection est alors possible uniquement dans des conditions réduites (sensibilité faible, précision faible). Elles sont en revanche de meilleure résolution spatiale et beaucoup moins chères que les caméras FIR (infrarouge lointain). Pour les caméras NIR le capteur d'acquisition est similaire à un CMOS mais avec des matériaux spécifiques, on parle alors de capteur pyro-électrique. Les capteurs CCD sont en principe aussi sensibles à la lumière dans le domaine infrarouge proche [52]. Ce type de caméra infrarouge est donc moins chère et de meilleure résolution que les caméras FIR. La deuxième catégorie est composée des caméras infrarouge lointain (*Far InfraRed*, FIR, ou *Long Wave InfraRed*, LWIR, longueur d'onde de l'ordre d'une dizaine de micron). Ces caméras permettent de voir dans le noir (sans aucune source lumineuse infrarouge) mais aussi de faire de la mesure de température. Elles sont plus précises et plus sensibles que les caméras SWIR. Elles sont en revanche de moins bonne résolution et beaucoup plus chères. Ce type de caméra utilise généralement une matrice de micro-bolomètres. Dans les deux cas (NIR et FIR), l'ajout d'un système de refroidissement permet d'accroître les capacités des caméras (sensibilité améliorée et plage de température plus grande).

LIDAR. Le terme LIDAR vient de la contraction de *light* (lumière) et de radar. Ce type de capteur envoie un rayon laser dans une direction puis mesure le temps de retour de la lumière réfléchiée par la scène ou les objets. Ainsi, il peut déterminer la distance de l'objet le plus proche dans la direction du rayon envoyé. Afin d'avoir des données de distance non pas en un seul point (correspondant à un rayon) mais bien sur une partie de l'espace, le rayon lumineux de mesure est déplacé de point en point et une mesure est faite à chaque fois. Ce déplacement est mécanique (rotation d'un miroir). La plupart des LIDARs sont mono-plan, c'est à dire que le rayon ne balaye qu'un seul plan. Il existe

aussi des LIDARs multi-plans mais ils sont plus onéreux.

Caméra TOF. Les caméras temps de vol (*Time Of Flight* - TOF) envoient plusieurs rayons lumineux simultanément. Le retour de ces rayons est ensuite analysé de manière simultanée en plusieurs points. Le système est donc similaire à celui des LIDARs mais au lieu d'utiliser un seul rayon avec un balayage, les caméras temps de vol envoient directement des rayons dans plusieurs directions. Les caméras TOF n'ont donc pas de composante mécanique.

Télémétrie unidirectionnelle. Les capteurs de type radar, capteurs à ultrasons (ou sonar) et télémètres lasers fonctionnent tous sur le même principe : une onde dont la fréquence est modulée est émise puis le signal reçu en retour est mesuré et analysé. Grâce au temps mis par l'onde pour faire l'aller retour, la distance de l'objet pointé est mesurée. Par l'effet Doppler, le décalage en fréquence de l'onde retour permet aussi de mesurer la vitesse. Comme la fréquence est modulée pour calculer la distance de l'objet, on parle souvent de *Frequency-modulated continuous-wave radar* (FM-CW Radar). Les radars sans modulation de phase (à effet Doppler seul) ne sont pas capables de détecter les véhicules arrêtés ou se déplaçant à vitesse réduite [77]. Les radars (ou *microwave detector*) utilisent une onde électromagnétique (souvent 77GHz ou 24 GHz) alors que les capteurs à ultrasons utilisent une onde sonore (ultrasons inaudibles, fréquence supérieure à 20kHz). On parle plutôt de capteur à ultrasons dans l'air et de sonar dans l'eau même si le principe de fonctionnement est le même. La distance de détection des radars est généralement de 30m à 200m selon les modèles [50]. Pour les capteurs à ultrasons, cette distance de détection ne dépasse pas 5m. Les radars peuvent effectuer une mesure à travers certains matériaux, comme le plastique d'un pare-choc, ils sont donc intégrables à des véhicules sans changement d'apparence. Les radars sont particulièrement sensibles aux matériaux conducteurs, ce sont donc de très bons détecteurs de véhicules. C'est pour cela que la plupart des systèmes de FCW (*Forward Collision Warning*) et de régulateur de vitesse adaptatif (ACC) sont basés sur ce type de capteur [101]. Pour la télémétrie laser, le lecteur peut se référer à l'explication concernant les LIDARs car le principe de fonctionnement est le même mais sans balayage (mesure en un point uniquement). Dans le cas des radars, des systèmes permettant de détecter la position des objets existent, il utilisent pour cela l'information couplée de plusieurs radars en ligne [52]. Les systèmes basés sur l'utilisation de plusieurs radars en simultané permettent de reconnaître les obstacles par l'analyse de la réponse spectrale reçue en retour [55]. Les arbres, les véhicules et les piétons n'ont en effet pas la même répartition spectrale ni la même amplitude de retour. En 1996, d'après les tests réalisés dans [77], les radars sont les capteurs les plus précis pour mesurer la vitesse des véhicules depuis l'infrastructure.

Détecteur de marquage infrarouge. Les détecteurs de marquage infrarouge sont des capteurs actifs (avec émission de lumière) mais sans mesure du temps de vol. Le principe est qu'une diode émet une lumière infrarouge en direction du sol et un capteur mesure le signal lumineux reçu en retour. Lorsque le capteur passe de la route brute (à réflexion faible) à une zone de marquage (réflexion forte), le signal reçu en retour varie et la ligne peut-être détectée.

Capteur de contact. Un capteur de contact peut être installé sur le pare-choc d'un véhicule pour déclencher un arrêt immédiat en cas de contact avec un obstacle.

Boucle de détection à induction. Les boucles de détection fonctionnent sur le principe de l'induction. Une boucle conductrice est insérée dans la voie (nécessite de saigner la route localement). Lorsqu'un véhicule (en métal) passe sur la boucle, la modification

du champs magnétique est détecté par induction. Une boucle de détection permet de mesurer le taux d'occupation, le flux ou encore la vitesse du véhicule (dans le cas d'une double boucle) [27]. Elles présentent un bon taux de détection. Ce type de capteur est très répandus sur les routes [77]. Des systèmes qui permettent d'enregistrer la signature du véhicule passant sur la boucle et donc de suivre les véhicules de boucle en boucle ont aussi été développés [27]. Ces systèmes permettent ainsi de mieux localiser les incidents longitudinalement sur la route. En 1995, les boucles de détection étaient les meilleurs détecteurs pour le comptage de véhicules disponibles sur le marché avec un taux de bonne détection de 99% [77]. Venaient ensuite les systèmes basés sur les caméras, les capteurs de champs magnétique et les radars [77].

Capteur de véhicules magnétique. Un capteurs magnétique mesure la perturbation du champs magnétique terrestre lorsqu'un véhicule (en métal) passe à proximité [27]. Il existe des capteurs passifs (*magnetic detector*) et actifs (*magnetometer*) [77]. Ils renvoient le même type d'information qu'une boucle de détection. Certains capteurs magnétiques sont moins destructeurs de la chaussée à l'installation que les boucles de détection. Ces capteurs sont parfois utilisés lorsque les boucles de détection ne peuvent l'être [77] : par exemple sur les ponts, dans le cas d'une structure métallique empêchant la mesure ou dans le cas d'un ouvrage dans lequel une saignée n'est pas envisageable. Les capteurs magnétiques permettent de détecter de petits objets comme les cyclistes [77].

Capteur de véhicules acoustique. Des détecteurs de véhicules basés sur l'enregistrement du son (énergie et reconnaissance de forme) ont tenté d'être développés [27]. [90] propose un système de détection et de classification des véhicules basé sur l'acoustique. [77] retient aussi un capteur de type matrice de microphone pour la détection des véhicules depuis l'infrastructure. D'après [102], ces capteurs sont tout de même moins efficaces que leurs concurrents.

Péages. Les péages peuvent être utilisés pour mesurer des données à grande échelle sur le trafic. En effet, ils permettent entre autres de déterminer le temps de parcours sur les axes mais aussi de procéder au comptage des véhicules par catégories. Leur répartition sur la route n'est cependant pas choisi comme pour les capteurs à proprement parler.

Tube pneumatique de comptage temporaire. Les tubes pneumatiques de comptage de véhicules sont des tuyaux semi-rigides qui sont installés en travers de la route. Lorsqu'un véhicule roule sur le tube, l'air est comprimé dans ce dernier et un capteur de pression permet de détecter la présence du véhicule. Comme pour les boucles de détection, l'utilisation de deux tubes successifs permet d'obtenir des informations sur la vitesse. Ce type de capteur n'est pas permanent, il s'installe occasionnellement sur une route pour un comptage ponctuel. Le lecteur peut se référer au guide du Sétra [115] pour plus d'informations.

Capteur de pression piézo-électrique. Les capteurs de pression piézo-électriques permettent la détection d'un piéton lorsque ce dernier est en appui sur la zone du détecteur. Par son poids il fait alors contact.

4.1.3 - Conclusion

Le tableau 4 récapitule les différents capteurs et leur champ d'application. Ainsi, on constate que les capteurs de type vision au sens large sont ceux qui ont le plus grand champ d'application (véhicule et infrastructure à la fois). Cela justifie de se concentrer uniquement sur ce type de capteur pour la suite de l'état de l'art.

		Véhicule	Infrastructure
Capteur proprioperceptif		x	
Systèmes de localisation		x	
Capteur contact		x	
Capteur extéroceptif	Vision active	Télémétrie matricielle	x
		Télémétrie unidirectionnelle	x
		Caméra stéréo	x
	Vision passive	Caméra monoculaire	x
		Caméra infrarouge	x
Systèmes de communication		x	x
Capteur infrastructure			x

Tableau 4 – Les capteurs et leur champ d'application.

4.2 - Étude spécifique des capteurs de vision passive

Parmi les capteurs de type vision au sens large (image, vidéo, télémétrique, domaine visible ou infrarouge, monoculaire ou stéréo), deux grandes catégories se distinguent comme le montre la figure 2 :

- la vision active (télémétrie) qui requiert l'émission d'un signal dont le retour est ensuite analysé (LIDAR, télémètre laser, radar, capteur à ultrasons, caméras TOF) ;
- la vision passive qui analyse directement la scène sans émission d'un signal (caméra monoculaire, caméra stéréo, caméra infrarouge).

4.2.1 - Les atouts des caméras (vision passive, domaine du visible)

La NHTSA recommande l'utilisation de caméras (vision passive) en tant que capteurs pour l'aide à la conduite [67]. Elles présentent en effet de nombreux avantages :

- L'utilisation simultanée de plusieurs caméras (plusieurs véhicules par exemple) est possible alors qu'elle pourrait créer des perturbations dans le cas de plusieurs capteurs télémétriques (mélange des signaux de retour si ces derniers ne sont pas synchronisés). Ainsi, on dit que les capteurs de type caméra (vision passive) sont non invasifs car ils ne modifient pas leur environnement.
- Le développement informatique (parallélisation, puissance de calcul) ainsi que l'amélioration des capteurs (résolution, rapidité, haute plage dynamique) permettent d'obtenir des résultats meilleurs qui concurrencent ceux de la télémétrie. Ces développements se poursuivront et permettront d'utiliser des algorithmes de plus en plus lourds (et donc de plus en plus fiables).
- L'apparition de caméras à bas coût peut permettre leur utilisation et leur déploiement à grande échelle dans le domaine de l'industrie automobile. En particulier, les caméras sont bien moins chères que les LIDARs et que les caméras infrarouge.
- L'utilisation de caméras permet d'obtenir de nombreuses données complémentaires par un seul capteur.
- D'après [6], l'homme acquiert par la vue 90% de l'information nécessaire pour conduire. Ceci montre que l'utilisation de l'information visuelle passive est très pertinente.
- Les caméras permettent une plus grande gamme d'utilisation. Une caméra peut servir à la fois à la détection d'obstacles (FCW) et à du suivi de voie (LDW). C'est le cas des caméras intelligentes Mobileye par exemple. De plus l'information acquise pour l'une des tâches peut aider à trouver l'information de l'autre tâche de manière complémentaire. Enfin, cela permet de minimiser les coûts, d'optimiser l'espace requis et de réduire les risques de panne en utilisant qu'un seul capteur pour plusieurs applications.
- Les caméras actuelles sont légères et compactes. De plus elles peuvent être logées derrière le pare-brise et ne modifient donc pas l'aspect du véhicule.
- Par rapport à des boucles de détection, les caméras installées sur les infrastructures permettent de détecter les trajectoires (et non pas des mesures en un seul point) [76]. Dans ce domaine, les caméras sont aussi peu onéreuses car elles permettent d'acquérir une grande quantité de données pour un coût assez limité [135].

- Les caméras permettent en plus de la mesure automatique de procéder à une surveillance du trafic sur écran par l'homme ce que ne permettent pas les autres types de capteurs [77].
- Sur l'infrastructure, une seule caméra permet de traiter plusieurs voies ce qui limite les coûts d'installation et d'entretien [77]. De plus, les caméras permettent à la fois d'obtenir des informations sur les véhicules de manière individuelle (trajectoire par exemple) et des informations macroscopiques sur les conditions de trafic sur plusieurs voies (flux par exemple) [77]. Ceux sont donc des capteurs permettant de recueillir une grande quantité d'informations [102].
- De nombreuses caméras sont déjà présentes sur la planète : sur l'infrastructure, sur les véhicules mais aussi dans d'autres domaines (smart-phone, vidéo-surveillance). Les images de certaines d'entre elles sont même publiquement disponibles. Il y a donc un très grand potentiel à utiliser une caméra plutôt qu'un capteur dédié pour faire de la mesure de conditions météorologiques dégradées [71].
- Actuellement, l'un des seuls moyens d'obtenir des informations sur le comportement des conducteurs (distance de sécurité, changement de voie, vitesse) est de faire des sondages [81]. Les caméras installées en bord de voie peuvent alors permettent de mesurer toutes ces informations de manière beaucoup plus juste [81]. Dans le cadre de la gestion du trafic, les caméras en bord de voies permettent d'obtenir des informations de niveau supérieur par rapport aux autres systèmes [81]. Ces informations sont d'ailleurs indispensables pour une gestion optimisée de trafic [81]. Particulièrement elles permettent la détection des incidents, la classification des véhicules, ou encore la création des matrices origine destination [81].

4.2.2 - Limites des autres capteurs de vision

Les caméras présentent donc de nombreux avantages. Les autres capteurs de vision présentent de plus des limites particulières par rapport aux caméras monoculaires :

Caméra stéréo

- Les caméras stéréo nécessitent une calibration. Or, des problèmes se posent pour maintenir une calibration juste. De plus, à cause des vibrations, une simple calibration fixe de la paire de caméras ne peut suffire dans le contexte routier. Une calibration dynamique doit donc être envisagée [52].
- La reconstruction 3D à partir d'une caméra stéréo est onéreuse en calculs.
- Bien que les caméras stéréo possèdent une résolution importante (meilleure que pour les caméras TOF par exemple) et qu'elles ont un temps d'acquisition plus court que les LIDARs, elles possèdent une précision sur la profondeur beaucoup plus faible que celle des capteurs télémétriques (vision active).
- Les caméras stéréo posent un problème concernant le design des véhicules. Elles prennent en effet plus de place que les caméras monoculaires car les deux caméras utilisées doivent être assez éloignées l'une de l'autre pour que l'estimation de la distance soit fiable.
- Les caméras stéréo nécessitent une acquisition synchronisée de deux flux vidéo. Leur utilisation entraîne donc des problèmes matériels supplémentaires par rapport à celle d'une caméra monoculaire même si des solutions sont proposées [25].

- Avec une caméra stéréo, la profondeur est évaluée assez aisément pour des objets proches. En revanche, plus les objets sont éloignés, plus cette estimation est difficile.
- L'estimation de la distance par les caméras stéréo est difficile lorsque les zones évaluées sont unies ou texturées avec un motif répétitif.

Caméra infrarouge

- Les caméras infrarouge possèdent une moins bonne résolution que les caméras standard.
- Elles sont plus onéreuses que les caméras du domaine visible car produites en quantité beaucoup plus faible.
- Les caméras infrarouge doivent normalement être calibrées une fois par an environ [2].
- Les caméras infrarouge détectent moins facilement les humains lorsque la température ambiante est élevée. En effet, l'écart entre la température du corps humain et les autres objets est alors plus faible.
- L'utilisation de caméras infrarouge avec refroidissement implique une dépense en énergie plus importante [77].
- Les caméras utilisant des capteurs ferro-électriques présentent un effet de halo autour des zones très chaudes ou très froides [33].

LIDAR

- Cette famille de capteur n'est pas très adaptée pour faire du suivi de file : en effet, la route n'a pas forcément de bordure verticale. Dans ce cas, le LIDAR ne peut pas détecter les bords de la route aisément ([72] propose tout de même une méthode). Ce problème se présente en particulier dans le cas d'un suivi de file sur une route possédant plusieurs voies.
- Ce type de capteur nécessite l'utilisation d'une pièce mécanique mobile (miroir), il y a donc un risque d'usure précoce, voir de casse prématurée, par rapport à un système de type caméra. De plus, le LIDAR prend plus de place qu'une caméra à cause de la partie mécanique (miroir).
- Les LIDARs sont généralement installés à l'extérieur du véhicule, cela pose un problème lié à l'étanchéité par rapport à une caméra installée derrière le pare brise du véhicule. De plus, leur intégration est plus difficile car ils apparaissent en façade du véhicule ce qui peut poser des problèmes esthétiques.
- Les LIDARs sont fortement impactés par le brouillard [64]. En effet, la longueur d'onde de la source lumineuse utilisée est de l'ordre de grandeur de la taille des gouttelettes d'eau. Dans ce cas le rayon est donc diffracté lorsqu'il y a du brouillard et la mesure est impossible. Ces derniers peuvent en revanche servir à la mesure du brouillard [64].
- Le prix des LIDARs est très élevé par rapport à celui des caméras. C'est pour cette raison que les constructeurs automobiles ne l'utilisent pas du tout actuellement.
- Un LIDAR permet d'obtenir seulement des informations sur la position en trois dimensions des objets. Il ne permet en revanche pas, ou très difficilement, de faire de la reconnaissance d'objet car seulement la taille et la silhouette sont disponibles.

- Les LIDARs présentent un temps d'acquisition plus lent que les caméras à cause du balayage. Ce problème serait cependant corrigé sur les derniers modèles de LIDARs [118].
- La distance de détection des LIDARs est limitée et dépend des modèles. Elle ne dépasse pas 200m.
- Les LIDARs ne peuvent pas se rencontrer à moins d'être synchronisés car c'est la lecture de la lumière émise et réfléchi qui permet le calcul de distance. Si un second LIDAR émettait son signal lumineux en face d'un premier, il viendrait perturber ce dernier. Ceci est un réel problème pour le développement de véhicules car ils se rencontreront forcément.
- Le champ de vision des LIDARs est plus restreint que celui des caméras (pour des raisons mécaniques), la résolution obtenue est plus faible que celle que l'on obtient sur les caméras actuelles.
- Pour pouvoir détecter correctement la surface d'un objet, le LIDAR nécessite une réflexion sur cet objet. Dans certains cas limites, si l'orientation de la surface à détecter est presque tangente au rayon émis, la réflexion sera très faible. Dans ce cas, le signal émis ne sera pas retourné au capteur et la détection échouera.
- La résolution des LIDARs est inférieure à celle des caméras. Ce problème serait corrigé sur les dernier modèles de LIDARs [118].
- Une difficulté supplémentaire pour les LIDARs embarqués sur des véhicules est que le rayon émis doit l'être parallèlement à la route. Sinon, un obstacle peut être omis ou la route peut être considérée comme un obstacle [52].

Télémétrie unidirectionnelle

- Les radars sont bien adaptés pour détecter tous les objets métalliques, en revanche ils détectent moins bien les obstacles non métalliques comme le bois, le ciment, les animaux [137] ou encore les humains [105]. La NHTSA a rapporté que les systèmes basés sur les radars et les sonars n'étaient pas de bonnes solutions du fait qu'ils détectent mal les piétons [67].
- Seul, un télémètre unidirectionnel ne permet pas de détecter avec précision la forme des objets. Une reconnaissance n'est donc pas possible. Des systèmes permettant l'identification commencent tout de même à apparaître en utilisant une combinaison de plusieurs télémètres unidirectionnels.
- La position latérale des objets détectés est parfois incertaine car les radars ont tendance à détecter un des bords de l'objet plutôt que le centre de l'objet. La difficulté vient du fait qu'il est difficile de savoir quel est le bord détecté [48].
- En embarqué, les télémètres omnidirectionnels ne permettent pas de faire de la détection et du suivi de voie. Ils ne peuvent en effet détecter que des objets en volume. Or, les marquages au sol sont plats et sont donc invisibles pour ces capteurs.
- Les capteurs ultrasons ont une portée très limitée (inférieure à 5m). Les radars et les télémètres lasers ont aussi une portée assez limitée (inférieure à 200m).
- les capteurs ultrasons ont une mauvaise directivité (détection dans un cône large), les radars ont une directivité moyenne alors que les LIDARS et les télémètres lasers ont une très bonne directivité.

- Comme pour les LIDARs, pour pouvoir détecter correctement la surface d'un objet, le télémètre nécessite une réflexion sur cet objet. Dans certains cas limites, si l'orientation de la surface à détecter est presque tangente au rayon émis, la réflexion sera très faible. Dans ce cas, le signal émis ne sera pas retourné au capteur et la détection échouera.
- Les capteurs ultrasons sont très sensibles aux conditions météorologiques (vent, température, pression) [22] [77]. Particulièrement, ils sont sensibles aux vents forts et aux changements de température [77]. Leur performance est cependant dégradée à longue distance [77] ce qui n'est pas leur condition d'utilisation majeure (ces capteurs étant utilisés pour les détections proches).
- Pour les capteurs ultrasons, le type de vêtements porté par les piétons influe sur la performance de la détection. Ainsi, des piétons portant des vêtements en fibres naturelles sont moins bien détectés que ceux portant des vêtements en fibres synthétiques [22].
- Les télémètres lasers, dont le support d'information est la lumière, sont sensibles aux conditions météorologiques dégradées (brouillard, pluie, neige) [27].
- Sur l'infrastructure, les radars ne permettent pas une bonne mesure lorsque la vitesse est faible (lors d'une congestion par exemple) [77]. L'utilisation de caméras est alors préférable dans ce cas [77].

Caméra TOF

- L'avantage des caméras temps de vol par rapport aux LIDARs et que l'acquisition est plus rapide (acquisition simultanée des différents points). En revanche, la résolution est relativement faible par rapport à un LIDAR.
- Les caméras TOF sont bien moins chères que les LIDAR et ont une résolution supérieure à prix équivalent.
- Comparativement à une caméra stéréoscopique, la caméra TOF permet d'obtenir une information sur la profondeur beaucoup plus précise. La résolution est en revanche beaucoup plus faible comparativement à une caméra stéréoscopique.
- Les caméras temps de vol ne sont pas encore très utilisées dans le domaine routier. Leur portée est en effet assez courte (quelques mètres) et de nombreux modèles sont réservés à une utilisation intérieure.
- Tout comme les LIDARs, les caméras TOF permettent uniquement de détecter la position et la silhouette des objets ce qui rend la reconnaissance de ces derniers plus difficile qu'avec une caméra.

Détecteur de marquage infrarouge

- Bien que peu onéreux, les détecteurs de marquage infrarouge sont limités à la seule application de la détection du marquage au sol. De plus, alors qu'une caméra permet d'estimer la trajectoire complète du véhicule et d'anticiper un franchissement, ces détecteurs permettent seulement de réagir quand le marquage est atteint.

Capteur de contact

- Le majeur défaut d'un capteur de contact est qu'il ne permet de prendre une décision que lorsque le contact est présent entre le véhicule et l'obstacle. Son utilisation est donc réservée à un arrêt d'urgence (lors de la défaillance d'autres capteurs par exemple) ou lors de déplacement à très faible vitesse.

Capteur de mouvement relatif

- Les capteurs de mouvement relatif permettent d'estimer la position relative d'un véhicule en mouvement par rapport à sa position initiale. Le problème des ces capteurs est que cette estimation se fait de proche en proche. Ainsi même une petite erreur d'une étape à une autre peut se propager et devenir de plus en plus importante, jusqu'à devenir conséquente. Lorsque le mouvement relatif est déduit de la vitesse ou l'accélération, l'incertitude propagée est encore plus grande.
- Lorsque le mouvement relatif est déduit de la rotation des roues, le problème du patinage induit une erreur supplémentaire.

Carte spécialisée

- Une carte permet d'obtenir simplement des informations parfois difficilement identifiables par une caméra. Par exemple, l'information de la vitesse maximale autorisée peut-être très simplement obtenue par une carte. Cependant, les problèmes liés à l'utilisation des cartes sont : la mise à jour, le temps d'accès et le positionnement. En effet, une carte ne peut pas contenir une information en temps réel, il faut donc qu'une mise à jour ait été effectuée récemment. Par exemple, lors de travaux, la vitesse maximale autorisée doit être changée. De plus, plus la carte contient d'information, plus le volume de données est important et plus le temps d'accès est long (serveur et communication). Enfin, l'utilisation d'une carte nécessite un positionnement précis du véhicule sur cette dernière.

Boucle de détection à induction

- Les boucles de détection nécessitent une intervention sur la chaussée, cette intervention peut causer une usure prématurée de la chaussée [77]. De plus, la boucle subie des contraintes mécaniques fortes entraînant une usure importante alors que l'entretien est difficile [73] [77]. Enfin, l'installation est onéreuse [73] et elle entraîne la fermeture de la voie [77].
- La boucle de détection permet de détecter des véhicules uniquement dans la zone où elle est installée. Il est donc nécessaire d'installer une boucle par file [81], les cas de véhicules changeant de file sont mal gérés et le changement de la zone de détection entraîne systématiquement une nouvelle intervention sur la chaussée. A l'inverse, une caméra effectue une mesure dans l'espace et non ponctuellement. Cela permet d'effectuer des mesures sur plusieurs voies simultanément [81] mais aussi de mesurer des paramètres supplémentaires comme la densité, le profil des vitesses, la longueur de file, les changements de voie, les véhicules arrêtés ou encore les différences de vitesses [27]. En particulier, la caméra est particulièrement plus efficace qu'une boucle de détection dans le cas d'intersections de voies multiples [73].
- Bien que la vitesse soit mesurable par boucle de détection, cela nécessite l'installation de deux boucles successives ce qui induit un coût et un entretien plus élevé [77].
- L'utilisation de caméras est beaucoup plus pertinente que celle des boucles de détection dans certains cas particuliers [27]. Par exemple, lorsque les voies sont provisoires dans le cas de travaux [27] ou dans des tunnels où l'information visuelle est indispensable ce qui induit systématiquement l'utilisation de caméras.
- La boucle de détection ne permet pas de détecter des véhicules à l'arrêt [73].

Capteur magnétique

- Les capteurs magnétiques sont moins discriminants longitudinalement lorsque les véhicules sont proches [77].
- L'utilisation d'un capteur magnétique, bien que moins destructrice que celle d'une boucle de détection (installation en surface possible), reste contraignante car elle se fait sur la voie [102].

Capteur de pression piézo-électrique

- Tout comme les boucles de détection le problème majeur de ce type de capteur est qu'il faut une intervention sur l'infrastructure.
- De plus, ce type de capteur permet d'obtenir une information très limitée : la présence ou non d'un piéton sur la zone de détection. Son application est donc généralement réservée à des zones particulières comme les passages piétons [22].

4.2.3 - Quelques points d'amélioration pour les caméras

Les caméras monoculaires dans le domaine visible, bien qu'ayant de nombreux avantages par rapport aux autres capteurs, présentent tout de même elles aussi quelques points d'amélioration :

- Une caméra monoculaire ne permet pas d'obtenir d'informations sur la profondeur directement. Il faut pour cela un calibrage qui n'est possible que dans des cas particuliers : avec une caméra fixe et un sol dont la topographie est connue, ou avec une caméra en mouvement. Dans ces cas particuliers, l'information de profondeur reste imprécise par rapport à un capteur de type télémétrique (vision active). De même, bien que les caméras stéréo permettent d'acquérir une information profondeur, cette dernière reste moins précise que celle fournie par les capteurs de vision active. Ce manque d'information sur la profondeur entraîne plusieurs difficultés lors de l'utilisation de caméras. D'abord, les occlusions (objets les uns derrière les autres) causent des problèmes pour le suivi de plusieurs objets par caméra. L'occlusion d'un objet par un autre (totale ou partielle) est en effet difficile à déterminer par caméra comme l'information sur la profondeur est inexistante [95]. Un problème d'occlusion peut se produire lorsqu'un véhicule de grande taille masque d'autres véhicules par effet de perspective [77]. De plus, par l'absence d'information sur la profondeur, il n'est pas possible d'évaluer l'échelle ou la taille réelle d'un objet. Ceci complique donc l'identification des objets.
- Les caméras sont sensibles aux conditions météorologiques dégradées ou aux changements d'illumination car elles utilisent la lumière comme support d'information [22] [77]. A l'inverse, comme les radars utilisent des ondes électromagnétiques de longueur d'onde plus grande, ils ne sont pas impactés par les perturbations liées à la météo ou les changements d'illumination [53] [8] [22] [27] [77] [64]. Pour la même raison, leur distance de mesure est beaucoup plus élevée dans de mauvaises conditions météorologiques. Ainsi, en termes de proportions, si une caméra (ou un humain) peut voir à 10m dans du brouillard ou sous la pluie, un radar peut voir à au moins 150m [118]. La performance des radars ne fluctue pas non plus dans les conditions suivantes : pluie, neige, vent, froid ou chaud extrême [77]. De même, sur les infrastructures, les capteurs magnétiques sont insensibles à la pluie et à la neige [77]. Enfin, quand les boucles de détection sont bien installées, leur performance reste stable dans des conditions météorologiques dégradées [77]. Ce n'est bien entendu pas le cas pour les LIDARs qui sont victimes de dégradations car ils utilisent aussi la lumière comme support d'information. Les caméras infrarouge

(FIR en particulier) sont quant à elles, bien que touchées, plus efficaces en présence de brouillard que les caméras du domaine visible [46] [77]. Elles ont en effet une meilleure distance de visibilité dans ces conditions. Cela n'est pas le cas pour les conditions de pluie ou de neige [77].

- Les changements d'illumination brutaux, les contre jours, les sorties de tunnel, ou encore les réflexions du soleil (sur route mouillée par exemple) dégradent complètement le signal visuel acquis par les caméras [77]. Pour limiter au maximum ce phénomène, l'utilisation d'une caméra HDR (*High Dynamic Range*, haute plage dynamique) est conseillée. Cela est parfois même indispensable pour pouvoir gérer ces cas d'illumination compliqués [101]. Le problème de l'acquisition HDR est qu'elle passe par une variation du temps d'exposition. Dans le cas d'une scène avec des zones sombres, ce temps d'exposition est alors élevé ce qui cause un phénomène de flou lorsqu'il y a un mouvement. De plus, la mesure prend plus de temps ce qui peut être handicapant pour des applications de détection qui nécessitent des temps de réactions courts. Les systèmes de vision active et les caméras infrarouge ne sont en revanche pas touchés par les changements d'illumination ou les contrastes lumineux élevés [118]. Enfin, pour les caméras du domaine visible, les algorithmes de détection sont différents le jour et la nuit ce qui apporte une difficulté supplémentaire [77]. En outre, pour les caméras en bord de voie, les phénomènes de réflexion sur les vitres ou sur les carrosseries des véhicules peuvent aussi changer l'apparence des véhicules très rapidement d'une image à l'autre et causer la perte du suivi [95].
- Dans les algorithmes de détection utilisant des caméras, les ombres portées peuvent poser aussi des problèmes [77]. D'abord elles peuvent être considérées comme une partie de l'objet dont elle est issue. La taille de l'objet et sa forme sont alors faussées. Deuxièmement, l'ombre peut créer des contours inexistant sur la surface sur laquelle elle est projetée lors de l'interprétation faite de l'image acquise.
- Les caméras du domaine visible ne peuvent pas fonctionner sans éclairage. Or, le ratio des accidents par rapport au nombre de kilomètres parcourus est beaucoup plus important la nuit [67]. La période nocturne représente en effet entre 32 et 55% des accidents mortels [67]. En complément des feux du véhicule, l'utilisation de capteurs permettant une mesure nocturne paraît donc indispensable (caméras FIR, radars, télémètres laser, LIDARs).
- Lorsque la caméra est embarquée, qu'il y a des vibrations, ou que le mât sur lequel elle est fixée est en mouvement, certains algorithmes de détection peuvent être mis en défaut. De plus, un phénomène de flou peut apparaître.
- Les caméras, comme tous les capteurs, sont victimes de bruit dégradant le signal d'origine.
- Les radars peuvent évaluer l'information vitesse avec plus de facilité que les caméras, qui doivent déduire la vitesse de deux positions successives [6] [8].
- Lorsque la scène est très encombrée, ou qu'un objet est peu contrasté par rapport au reste de la scène, il peut être difficile de faire de la détection par caméra.
- La plupart des caméras sont installées derrière le pare-brise du véhicule. Dans ce cas, il faut pouvoir prendre en compte la salissure du pare-brise, les gouttes lorsqu'il pleut mais aussi les balais essuie-glace lorsqu'ils sont actifs.
- L'homme utilise de nombreux a priori basés sur l'expérience pour utiliser la vision, créer des systèmes de vision artificielle utilisant des caméras nécessite donc le même travail [24].

- Utiliser des systèmes de vision passive permet d'obtenir beaucoup plus d'information, mais cela requiert plus de traitements que pour les systèmes de vision active [51]. L'utilisation de caméras nécessite donc de disposer d'une puissance de calcul plus importante que pour d'autres types de capteurs comme les radars ou les capteurs ultrasons.
- À l'inverse des caméras, les radars peuvent être installés derrière le pare-choc du véhicule et sont donc mieux intégrés [22]. De même, pour l'infrastructure, les capteurs ultrasons sont de petite taille et peuvent être facilement installés à l'inverse des caméras qui nécessitent un mât [77].

	Capteur	Capteur ultrason	Radar	Télé- mètre laser	LIDAR	Caméra TOF	Caméra Omni- dir.	Caméra Fish-eye	Caméra Mono.	Caméra Stéréo	Caméra NIR	Caméra FIR
Support physique de l'information		Acous- tique	Electro- magnétique	Lumière pulsée uni- directionnelle	Lumière pulsée multi- points	Lumière pulsée multi- points	Lumière visible	Lumière visible	Lumière visible	Lumière visible	Lumière IR proche	Lumière IR lointain
Technique de vision		Active	Active	Active	Active	Active	Passive	Passive	Passive	Passive	Passive	Passive
Applications en embarqué		Ve, P	Ve	Ve, P	Ve, P	Ve, P	Vo, Ve, P, S	Vo, Ve, P, S	Vo, Ve, P, S	Vo, Ve, P, S	Vo, Ve, P	Ve, P
Applications sur l'infrastructure		Ve	Ve	Ve	Ve			Ve, P	Ve, P		Ve	Ve
Reconnaissance d'objets		Non	Moyen	Non	Forte	Moyen	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyen
Complexité des algorithmes		Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne
Nuit		Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui
Pluie / Neige		Oui	Oui	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Oui	Oui
Brouillard		Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Moyen	Moyen
Eblouissement		Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Mesure de distance		Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui*	Oui*	Oui	Oui*	Oui*
Distance minimale (en m)		0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Distance maximale (en m)		5	80-200	300	300	20	70	70	70	70	200	200
Résolution en profondeur		Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible
Champ de vision vertical (en °)		50	40-150	20	20	30	360	180	30	30	30	30
Résolution transversale		Faible	Faible	Nulle	Forte	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte
Champ de vision horizontal (en °)		50	40-150	20	360	50	360	180	50	50	50	50
Commercialisation		Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Forte	Forte	Faible	Faible
Coût		Faible	Faible	Moyen	Elevé	Elevé	Faible	Faible	Faible	Faible	Elevé	Elevé

Tableau 5 – Caractéristiques et applications des différentes technologies de vision artificielle. Vo = Voies, Ve = Véhicules, P = Piétons, S = Signalisations. * Possible si la caméra est en mouvement.

4.2.4 - Conclusion

Le tableau 5 présente un récapitulatif des capteurs de vision répertoriés en fonction des principales caractéristiques à prendre en compte pour évaluer un capteur. De nombreux éléments sont en effet importants pour définir un bon capteur en contexte routier. Parmi ces caractéristiques les plus importantes sont : les possibilités de détection (piéton, véhicule, voie, signalisation), la complexité des traitements de données, la résolution (latérale et longitudinale), l'angle de vision et la distance de vision, la sensibilité aux conditions météorologiques et d'éclairement (éblouissement, conditions météorologiques dégradées, nuit), le niveau de commercialisation, et le coût. D'autres caractéristiques comme la compacité ou la robustesse mécanique sont importants dans le cas de capteurs dédiés au véhicule.

En effet, le capteur idéal détecte et reconnaît l'ensemble des objets présent sur la route. Il voit loin, sur un champ large et il est précis. Son utilisation demande peu de calculs : la consommation en énergie et le temps de réaction seront donc faibles. Le capteur parfait s'adapte à toutes les conditions qu'il rencontre (jour, nuit, toutes conditions météorologiques) et il est compact et solide. De plus, son haut niveau de commercialisation permet de le développer et de l'améliorer, mais aussi d'avoir de nombreux retours d'expérience sur son utilisation. Enfin, ce capteur idéal ne coûte pas cher, d'un point de vue industriel quelques dizaines d'euros tout au plus, ce qui permet de l'installer massivement à bord des véhicules et sur l'infrastructure. Bien entendu, ce capteur idéal n'existe pas. Une revue sommaire des capteurs existants permet cependant de montrer que des compositions de capteurs peuvent répondre à de nombreux critères.

Le choix actuellement fait pour la commercialisation est l'utilisation simultanée de caméras (domaine visible, monoculaire ou stéréo) et de radars. Comme le montre le tableau 5, cette composition permet en effet de répondre à l'ensemble des critères pour un coût raisonnable. Les solutions de détection actuellement adoptées dans le monde de la recherche sont plutôt basées sur une composition de LIDARs et de caméras visible et infrarouge. Cette solution permet d'obtenir de meilleurs résultats. Elle est en revanche très onéreuse ce qui explique qu'elle ne soit pas encore utilisée pour la commercialisation. L'utilisation de radars semble tout de même encore indispensable pour compléter la détection dans des conditions météorologiques dégradées. Enfin, la tendance est à la fusion des différents capteurs en un seul capteur. Cela permet un gain en compacité, mais cela a aussi des attraits en ce qui concerne l'électronique du capteur (mutualisation des calculateurs), son coût (optimisation des matériaux), et la qualité de la fusion des données (rapidité).

La fusion de différents types capteurs pourraient donc être une solution pour limiter les erreurs des algorithmes de détection [51]. Cette fusion pourrait permettre à terme de se rapprocher du capteur idéal. Cependant, en mettant de côté les compositions de capteurs, l'étude des caméras présente un grand intérêt malgré leurs quelques limites. D'abord, elles sont présentes dans toutes les compositions. De plus, comme le montre le tableau 5, leur champ d'application est l'un des plus larges, avec à la fois une utilité à bord des véhicules mais aussi sur l'infrastructure. Elles présentent aussi de nombreux autres atouts : économique, compacité (esthétique), simplicité de mise en œuvre, possibilité de détection et reconnaissance, mesure non intrusive.

L'essentiel

- Les critères déterminants pour un bon capteur : objets détectables, complexité du traitement des données, résolution, angle de vision, distance de vision, sensibilité aux conditions météorologiques et d'éclairement, niveau de commercialisation et coût.
- La composition de capteurs la plus utilisée aujourd'hui : radar et caméra visible.
- La composition de capteurs probablement la plus utilisée demain : LIDAR et caméra infrarouge/visible.

5 - Les algorithmes de vision artificielle en contexte routier

5.1 - Introduction

5.1.1 - Les principaux algorithmes existants

La partie 2 a permis de décrire les différentes applications liées à des systèmes de vision et rencontrées sur les infrastructures et les véhicules. Ces applications finales utilisent des algorithmes d'analyse d'images spécifiques pour différentes tâches (par exemple, détection de piétons, détection de bord de voies...). Certaines applications finales utilisent parfois même plusieurs algorithmes. Les tâches de ces algorithmes sont récapitulées dans le tableau 6. Elles seront décrites plus en détail dans les parties 5.2 (sur l'infrastructure) et 5.3 (sur le véhicule). Comme l'objet de cette étude porte sur la vision artificielle en conditions météorologiques dégradées, les références sur le domaine des conditions météorologiques dégradées ont aussi été traitées même hors du contexte routier. Ainsi, pour l'ensemble des algorithmes utilisant la vision artificielle en contexte routier ou pour la détection des conditions météorologiques dégradées, 864 références ont pu être recensées de 1986 à 2015. L'utilisation de la vision artificielle pour les STI est donc l'objet de nombreuses recherches. Parmi ces références, 497 ont été analysées et les descripteurs d'images utilisés identifiés. Les références traitées sont donc assez représentatives de l'ensemble du domaine avec un taux de 57%. La suite de cette partie présente plus en détail chaque type d'algorithmes rencontré dans des systèmes de vision artificielle en contexte routier. Les algorithmes liés aux conditions météorologiques dégradées et non spécifiques au contexte routier ne sont pas détaillés dans ce rapport, ils feront l'objet d'analyses plus poussées ultérieurement.

5.1.2 - Les états de l'art existants

Des études recensant les différents modèles existants pour l'analyse d'image (que ce soit en embarqué ou en bord de voie) ont déjà été réalisées. Certaines études traitent aussi de l'aspect historique avec le déroulement des différents projets fédérateurs autour des STI ([44], [6]). Ce second point a été détaillé dans la partie 3.

Application	
Surveillance (caméra fixe)	Traffic
	Piéton
	Gouttes sur vitre
ADAS (Caméra embarquée)	Détection d'obstacles
	Piéton
	Véhicule
	Signalisation
	Détection de voie
	SLAM
	SFM
Conditions météorologiques	Gouttes pare brise
	Flaque d'eau
	Feux anti pluie
	Détection et caractérisation
	Pluie
Conditions météorologique	Brouillard
	Pluie sur vidéo
	Pluie sur image
	Goutte en chute libre
	Neige

Tableau 6 – Les algorithmes de vision artificielle en contexte routier analysés.

Les états de l'art existants : systèmes de vision artificielle installés sur les infrastructures.

De nombreux états de l'art sur les systèmes de vision artificielle installés sur les infrastructures existent déjà et leurs approches sont très différentes. [27] propose un état de l'art des technologies et des algorithmes permettant la détection automatique d'incident (DAI). Il propose aussi un *benchmark* de cinq systèmes et conclue sur les éléments indispensables à prendre en compte pour un système de DAI. Cette étude ne se concentre pas uniquement sur la partie détection (algorithmes) mais traite de toute la chaîne du système de vision permettant la DAI. Plusieurs types de capteurs sont d'ailleurs évoqués : boucle de détection, radar, caméra. [30] répertorie plusieurs systèmes de vision artificielle commercialisés pour le management de trafic intelligent. Les systèmes présentés sont basés sur la vision passive (caméra) ou la vision active (LIDAR, radar). [66] fait un état de l'art général sur les systèmes de vidéo surveillance intelligents basés sur des caméras. Il traite pour cela de toutes les étapes couramment rencontrées dans les algorithmes. Les systèmes de détection pour les véhicules et les piétons sont décrits. [77] propose d'abord une liste des paramètres à déterminer pour caractériser le trafic. Il propose ensuite un essai des systèmes de détection de véhicules (capteurs) les plus courants sur différents sites et dans diverses conditions météorologiques. Les résultats de ces essais des différentes technologies existantes sont ensuite rapportés et les avantages et inconvénients de chaque technologie sont finalement décrits. [102] rapporte les conclusions d'une étude financée par la FHWA aux états-unis de 1995 à 1997. Cette étude porte sur les solutions de détection du trafic non intrusives pour l'infrastructure. Dans ce cadre, l'étude se concentre sur : les capteurs infrarouge, les capteurs magnétiques, les radars (avec et sans modulation), les capteurs ultrasons, les capteurs acoustiques et les caméras. [94] propose un état de l'art des techniques de détection des véhicules (algorithmes) à partir de vidéos acquises par des caméras installées sur l'infrastructure. Il propose pour cela de classer les algorithmes selon dif-

férents critères : les conditions météorologiques (jour, nuit, pluie, nuageux), la prise en compte des ombres portées, ou encore la prise en compte des conditions d'embouteillage. [95] propose un état de l'art des méthodes de suivi d'objets (algorithmes). Il dessine ainsi un schéma général des variantes des algorithmes de suivi. Il se concentre ensuite sur le cas particulier du suivi de véhicules pour la gestion du trafic. Il compare alors trois méthodes dans ce contexte particulier. [135] propose un état de l'art des systèmes de détection et de suivi des véhicules à partir de caméra fixées sur l'infrastructure. Il décompose pour cela l'état de l'art en trois volets : sélection des zones d'intérêt, détection des véhicules, et suivi des véhicules. Il fait aussi un focus sur les méthodes de suppression des ombres portées. [115] propose un guide sur les système de comptage temporaire du trafic routier. Ce guide recense les différents capteurs temporaires à installer sur l'infrastructure. Il décrit aussi leur mise en œuvre et leur précision. [109] et [110] propose une synthèse sur le développement des STI en France. Ces rapports traitent du cadrage européen, des acteurs, de la gouvernance, du cadre juridique ou encore du rôle de l'action publique et des actions qu'elle doit mener.

Les états de l'art existants : systèmes de vision artificielle embarqués à bord de véhicules.

De nombreuses revues de la littérature sur les systèmes de vision artificielle embarqués récapitulent l'ensemble des systèmes de vision artificielle existants à bord des véhicules. [6] et [8] référencent et classent les différents algorithmes de vision artificielle rencontrés à bord des véhicules. Ils proposent alors un état de l'art des algorithmes de suivi de voie, de détection d'obstacles, et de détection de piétons. [117] répertorie les algorithmes de vision artificielle permettant de détecter les autres véhicules sur la voie grâce à une caméra embarquée. [118] reprend et complète cet état de l'art. [12] fait un état de l'art sur les véhicules intelligents. Il recense pour cela les applications existantes : avertisseur de collision, système anti-collision (freinage d'urgence), ou encore conduite partiellement ou complètement autonome. Il décrit aussi les contextes dans lesquels sont rencontrés les véhicules intelligents : automobile, poids-lourd, transport en commun, véhicules industriels ou militaires. [80] fait un état des lieux très complet des systèmes de vision artificielle embarqués sur les véhicules et utilisant des caméras. Après avoir décrit les capteurs de vision rencontrés et les grandes familles de traitement et d'analyse d'images rencontrés dans ce contexte, il classe les algorithmes de vision artificielle en fonction de leur application et non des traitements internes aux algorithmes. Les catégories recensées sont : la détection de voie, la détection de fatigue du conducteur, la détection des véhicules et la détection et reconnaissance des signalisations verticales.

Il existe aussi des bibliographies plus spécifiques. [134] recense par exemple les systèmes de suivi de voie en général (LDW, LCA, LCW, LKA). Il répertorie aussi les normes associées à ces systèmes. Enfin, il présente des données sur les accidents et les bénéfices à tirer de tels systèmes.

Les systèmes de détection de piéton utilisant la vision artificielle à bord des véhicules font aussi l'objet de bibliographies spécifiques. [51] liste les différents systèmes de prévention des collisions de piétons pour les véhicules. Il ne se focalise pas uniquement sur la partie détection mais aussi sur le suivi et la prédiction du comportement des piétons. Il traite les systèmes de vision actifs et passifs, des domaines visible et infrarouge. [52] reprend et développe l'état de l'art précédant de [51]. Cette nouvelle étude ne se concentre pas uniquement sur les systèmes de vision mais traite de toute la chaîne de protection des piétons (infrastructure, design du véhicule, systèmes de détection de piéton, systèmes de prédiction de collision). [55] récapitule les différentes techniques employées pour la détection des piétons par des systèmes de vision embarqués sur des véhicules. Il traite à la fois des systèmes actifs et passifs, des domaines

visible et infrarouge. [57] propose un état de l'art des algorithmes de détection des piétons basés sur des systèmes de vision passifs du domaine visible (caméras) pour les véhicules. Ces systèmes de détection de piéton font aussi l'objet de nombreuses évaluations et *benchmarks*. [10] décrit un logiciel utilitaire pour l'annotation manuelle des piétons sur une séquence vidéo. L'utilitaire permet ensuite d'évaluer un algorithme de détection face à la sélection manuelle par une règle de correspondance. [39] présente une base de données pour l'évaluation des algorithmes de détection de piétons avec une caméra embarquée sur un véhicule. Une méthode d'évaluation et un *benchmark* comprenant sept algorithmes de détection de piétons sont ensuite proposés. [41] fait d'abord un état de l'art de tous les systèmes de détection de piétons. Une analyse de quatre systèmes de détection de piétons courants est ensuite faite sur une base de données acquise par une caméra embarquée sur un véhicule. [68] propose une méthode d'évaluation des détecteurs de piétons pour les véhicules. Il l'utilise sur deux exemples tirés de la littérature. [22] propose un récapitulatif des capteurs permettant la détection de piétons. Il en teste ensuite une combinaison dans le cas d'un détecteur de piétons pour les bus associant des capteurs sur le véhicule et l'infrastructure. [40] propose un état de l'art des systèmes de détection de piétons basés sur des capteurs de vision passive monoculaires. Il compare ensuite seize systèmes de ce type. Pour cela, il propose une base de données et une méthode unifiée. Cette étude approfondit le travail fait dans [39].

Au delà des systèmes spécifiques aux véhicules, certaines études bibliographiques recensent l'ensemble des travaux portant sur la détection de personnes par un système de vision artificielle (voire sur la détection d'objets en général). [42] fait un état de l'art plus général sur les méthodes permettant de détecter les personnes, mais aussi de les reconnaître, d'analyser leur humeur par leurs expressions faciales ou leurs mouvements, ou encore de reconnaître leur activité. [54] fait un état de l'art des systèmes de détection et de suivi du corps humain et du bras. En plus de la simple détection de personnes, [54] cite donc de nombreux modèles de reconnaissance d'activité ou de mouvement qui sont hors de notre cadre. [87] présente un état de l'art sur les méthodes de vision artificielle pour la détection des mouvements humains avec des systèmes de vision passifs. Il se concentre ainsi sur la partie reconnaissance des activités qui est hors de notre cadre. Cet état de l'art est complété plus tard par [88]. [138] fait un état de l'art des grandes méthodes pour le suivi d'objets par un système de vision passive en général. Les objets détectés et suivis ne sont pas spécifiques ici, ce qui peut inclure des piétons ou des véhicules.

Pour en revenir aux systèmes de vision artificielle propres aux véhicules, des recherches bibliographiques portent uniquement sur les systèmes de détection et de reconnaissance de signalisations verticales. [89] propose une revue de la littérature sur les systèmes de détection et de reconnaissance des signalisations verticales (TSR). Il analyse les résultats des différents systèmes existants. Il se concentre pour cela uniquement sur la partie détection des systèmes de TSR. [58] présente des méthodes permettant la segmentation des signalisations verticales (partie détection des signalisations). Les méthodes sont classées en trois ensembles : segmentation couleur, détection des contours et décomposition chromatique/achromatique. Une évaluation des algorithmes par une méthode unifiée est aussi proposée.

Les méthodes de navigation visuelle (SLAM, *Simultaneous Localisation And Mapping*, odométrie visuelle) font aussi l'objet d'états de l'art spécifiques. Ces états de l'art peuvent porter sur des systèmes embarqués à bord de véhicules mais aussi parfois employés sur des robots mobiles. [15] fait un état de l'art des méthodes de navigation visuelle en général (robot mobile en intérieur, véhicules sur route et hors route). Il répertorie en particulier les applications dédiées au domaine routier et propose un classement en fonction de la technique utilisée dans les algorithmes. [24] référence les différentes méthodes de SLAM visuel. Il traite ce sujet en

général et ne se concentre pas sur le contexte routier spécifiquement. [35] propose un état de l'art des systèmes de navigation visuelle pour les robots. Il inclut aussi dans cette étude les systèmes de suivi de route. Il traite séparément la navigation dans un environnement intérieur ou extérieur. [124] fait un état de l'art sur la création de carte par un robot (*robotic mapping*). Il se concentre en revanche sur les applications intérieures.

Les états de l'art existants : analyses globales.

Des études bibliographiques proposent des points de vue beaucoup plus généraux sur les STI. [44] propose un historique sur les STI assez général. Cet historique reste tout de même axé sur les projets marquants du domaine routier des années 1970 aux années 2000 en Europe, aux États-unis et au Japon. Il fixe ainsi trois grandes phases de développement : la préparation de 1930 à 1980, l'étude de faisabilité de 1980 à 1995 et le développement produit de 1995 à 2001 (l'année de la publication). Les catégories de STI recensées dans cette bibliographie sont : les systèmes de management de trafic avancés, les systèmes d'information aux usagers avancés et les systèmes de transport public avancés. [67] fait un état des lieux de la législation en vigueur pour les véhicules dans les principales zones de développement des STI. Il se penche aussi sur les statistiques du domaine routier (accidentologie). En outre, il détaille les technologies utilisant la vision passive existantes et leurs applications. Enfin, [73] fait un état de l'art complet des systèmes de vision artificielle employés dans le contexte routier. Il traite ainsi à la fois des systèmes installés sur l'infrastructure et des systèmes embarqués à bord des véhicules. Il classe pour cela les algorithmes selon leur type de mécanisme : description (descripteur d'images, région, ou modèle) ; selon leur application : caméra stationnaire ou embarquée ; et selon leur domaine : spatial ou temporel. Cet article se limite tout de même à l'étude de la reconnaissance des voies et de la détection des véhicules. C'est l'article qui se rapproche le plus de la recherche bibliographique qui est faite dans la suite. Il garde cependant une analyse générale du point de vue des mécanismes alors que la bibliographie suivante se concentre sur les descripteurs d'images uniquement.

5.1.3 - Cadre de la recherche bibliographique

Après avoir établi un bref historique des éléments marquants (partie 3), nous tenterons ici de traiter un maximum d'algorithmes de vision artificielle en les triant selon les applications citées précédemment (partie 2). Cette recherche bibliographique, bien que la plus large possible, ne comprend pas toutes les références du domaine car certains articles ont pu être oubliés ou sont indisponibles.

L'étude bibliographique se concentre ici uniquement sur les applications tournées vers l'extérieur : l'analyse du conducteur par caméra est par exemple exclue. En effet, même si l'analyse du comportement du conducteur par caméra existe et qu'elle est très importante [89], l'extérieur est privilégié car c'est dans ce cas qu'il y aura des problèmes liés aux conditions météorologiques.

Tous les algorithmes évoqués dans la suite sont en temps réel (ou *online*, plusieurs images traitées par seconde) car c'est une condition indispensable pour l'emploi d'un algorithme de vision en contexte routier [73]. Certains articles décrivent clairement le matériel employé et le temps de calcul des algorithmes mis en jeu alors que d'autres ne donnent pas ce type d'informations mais affirment pouvoir être implémentés en temps réel. Pour certaines applications (détection d'obstacles par exemple) le temps de calcul disponible dépend directement des conditions de sécurité (distance de freinage correspondante). Certains algorithmes *online* requièrent tout de

même une initialisation plus couteuse en temps de calcul et non temps réel (initialisation *of-line*). Ces algorithmes sont tout de même considérés car la phase d'initialisation n'est ensuite plus réitérée.

Enfin, dans le contexte routier, les algorithmes doivent présenter une très bonne précision et une grande fiabilité (*reliability*) [73]. L'erreur n'est en effet pas permise car elle peut entraîner de lourdes conséquences (accident). Comme peu de comparatifs communs existent ce critère ne sera cependant pas pris en compte dans cette étude.

Alors que les états de l'art existants se basent tous du point de vue traitement d'image (en classant uniquement les algorithmes par les méthodes qu'ils emploient) ou du point de vue application (en classant les algorithmes uniquement d'après leur objectif), cette nouvelle bibliographie propose de croiser ces deux visions.

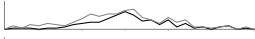

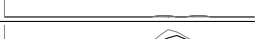

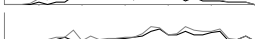











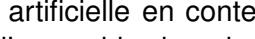
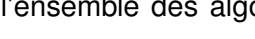





Application		1986	1990	1995	2000	2005	2010	2015	Analysé	Total	%
Surveillance (caméra fixe)	Traffic								85	146	58
	Piéton								23	27	85
	Gouttes sur vitre								2	2	100
ADAS (Caméra embarquée)	Détection d'obstacles								60	85	70
	Piéton								86	170	50
	Véhicule								71	113	62
	Signalisation								98	212	46
	Analyse de la route								21	27	77
	Détection de voie								1	1	100
	SLAM								7	7	100
	SFM								1	1	100
	Gouttes pare brise								7	7	100
Conditions météorologiques	Conditions météorologiques								1	1	100
	Flaque d'eau								2	3	66
	Feux anti pluie								5	11	45
	Détection et caractérisation								7	10	70
	Pluie								18	35	51
	Brouillard								3	5	60
	Pluie sur vidéo								1	1	100
Conditions météorologique	Suppression - Segmentation								6	8	75
	Pluie sur image										
	Goutte en chute libre										
	Neige										

Tableau 7 – Les algorithmes de vision artificielle en contexte routier au cours du temps. En noir les algorithmes analysés, en gris l'ensemble des algorithmes repérés (analysés et non analysés).

5.2 - Surveillance du trafic : caméra fixe

Deux grandes applications existent pour les algorithmes de vision artificielle utilisés sur les images des caméras de surveillance : la mesure du trafic (détection et suivi des véhicules) et la détection des piétons (détection et suivi). Quelques algorithmes traitant des conditions météorologiques dégradées existent pour ce type d'application, cependant, la majorité des algorithmes concernant de telles conditions sont uniquement utilisés sur des images obtenues en laboratoire et non sur des applications déployées sur l'infrastructure. C'est d'ailleurs pour cette raison que la figure 3 comprend une catégorie météo indépendante, elle correspond à des algorithmes de vision artificielle traitant de conditions météorologiques mais non spécifiques au contexte routier. Enfin, les algorithmes permettant de faire de la lecture de plaque d'immatriculation par caméra n'ont pas été répertoriés. Cette technologie ne sert en effet généralement

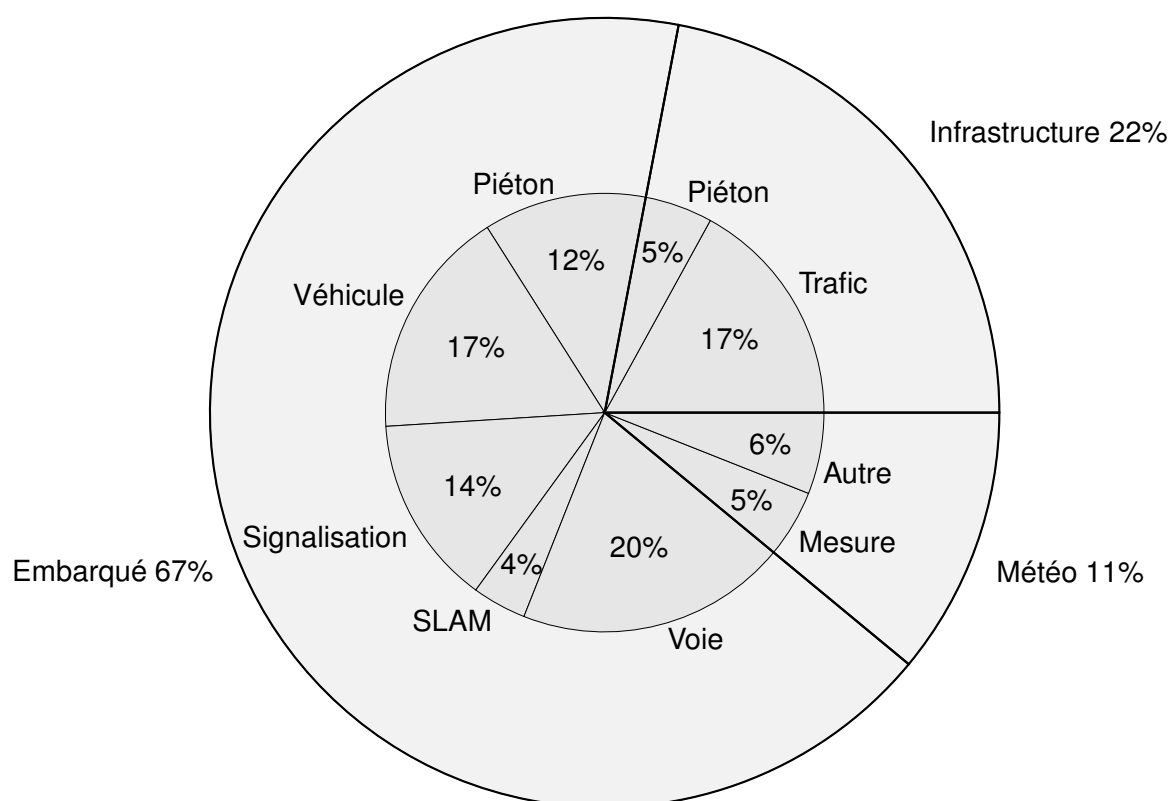


Figure 3 – Répartition en volume des algorithmes de vision artificielle en contexte routier analysés.

pas à la sécurité ou à l'optimisation des déplacements mais plutôt au contrôle (verbalisation). En plus de ces deux applications majeures des algorithmes de vision artificielle utilisés derrière des caméras de bord de voie, d'autres modules algorithmiques apportent un complément : ces modules concernent le traitement du problème des ombres portées (qui sont considérées comme des objets par la plupart des algorithmes de détection), les problèmes de changement d'illumination, la gestion des occlusions (lorsqu'un objet à détecter passe derrière un autre ou derrière un élément fixe de la scène), les conditions de nuit [139], les changements de position de la caméra (en cas de choc) [73] et la stabilisation de l'image. Ces modules complémentaires ne sont pas la base des algorithmes de vision artificielle mais des patchs de correction ajoutés à ces derniers, ils ne seront donc pas étudiés ici. Ces modules ne sont pour autant pas négligeables car les systèmes de vision artificielle déployés sur l'infrastructure doivent être capables de s'adapter aux changements cités précédemment [73].

Les algorithmes de vision artificielle comportent généralement trois grandes phases : la détection, le suivi (*tracking*) et la classification. Dans le domaine particulier des caméras installées en bord de voie, comme la scène est statique (caméra fixe), la phase de détection se fait souvent par extraction fond-forme (*background subtraction*). Cette extraction fond-forme doit être basée sur une initialisation automatique pour prendre en compte les problèmes évoqués précédemment sans intervention humaine [73]. Enfin, les algorithmes de surveillance doivent fonctionner en temps réel pour pouvoir être utilisables dans des cas concrets [34].

5.2.1 - Détection et suivi des véhicules

Trois types de systèmes de vision artificielle basés sur des caméras existent pour la surveillance du trafic [27]. Les systèmes de type boucle de détection (*tripewire*) pour lesquels une zone d'intérêt est définie sur l'image à l'endroit de la voie de circulation. Sur cette zone d'intérêt, un changement d'intensité est considéré comme la présence d'un véhicule. Ce type d'algorithme ne donne pas plus d'informations qu'une boucle de détection. Il permet tout de même le positionnement de plusieurs boucles virtuelles sur une même image. Le second groupe de systèmes de vision artificielle comporte les algorithmes de suivi des véhicules (*tracking*). Ces systèmes beaucoup plus complets permettent de suivre les trajectoires. Ce suivi permet d'obtenir des informations supplémentaires par rapport à celles fournies par des boucles de détection. Enfin, le dernier groupe est composé des systèmes de vision artificielle de type analyse statistique. Ces algorithmes considèrent une analyse globale de l'image pour déterminer le taux d'occupation de la route. Ce dernier type de système est beaucoup plus simple que le second mais fournit une information différente et complémentaire des boucles de détection (par exemple, vitesse des véhicules ou sens de parcours).

Seul le second type de système passe par une détection et un suivi des véhicules, c'est donc sur ce dernier que se concentre l'étude. D'ailleurs, dans toute la chaîne de gestion automatique du trafic (de l'acquisition à la prise de décision), c'est justement cette partie de détection et de suivi des véhicules qui est la moins performante [135]. Il y a donc un enjeu très fort pour le développement de tels systèmes [135].

Comme le montre le tableau 6 et la figure 3, la détection et le suivi des véhicules est la troisième application en termes de volume, avec 85 publications sur 497 soit 17%. La quantité de recherches sur ce sujet est donc à la hauteur de l'enjeu qui lui correspond. D'après le tableau d'historique 7, les recherches dans le domaine de la détection et du suivi des véhicules par des caméras de bord de voie ont débuté au milieu des années 1980. Cette dernière a connu un fort développement à partir des années 1990 pour atteindre un pic en 2000.

5.2.2 - Détection et suivi des piétons

La détection des personnes est en général l'une des applications les plus attendues pour les systèmes de vision artificielle [10]. La détection des personnes (ou des piétons dans le contexte routier) existe de plus à la fois pour les systèmes embarqués et pour les systèmes installés en bord de voie pour la surveillance. Ce second champ d'application sera développé dans la partie 5.3. L'objectif de la détection de piétons par des caméras de surveillance est de cibler et d'identifier chaque piéton (comme une entité) sur une séquence d'images. Il existe aussi des systèmes permettant de détecter la posture, l'attitude, les actions ou les mouvements du corps humain (*gait* en anglais). Ces systèmes détectent chaque membre et estiment en trois dimension la position des ces derniers. Ils permettent entre autres le suivi et l'analyse du mouvement pour les sportifs, l'enregistrement de mouvement pour la création d'images de synthèse ou encore la détection automatique de vandalisme. D'autres systèmes permettent la reconnaissance des individus, ces systèmes peuvent servir à donner accès à des zones protégées automatiquement par exemple. Enfin, d'autres permettent la reconnaissance des émotions (par analyse de l'expression faciale ou des mouvements). Ces types de systèmes, beaucoup plus lourds en calcul, ne sont pas l'objet de cette étude. Leurs applications sont en effet éloignées de la vidéo-surveillance en contexte routier. De plus, certains d'entre eux ne sont pas exécutables en temps réel ou nécessitent un dispositif d'acquisition particulier (combinaison de caméras). Seule la tâche de détection et de suivi des piétons (en temps qu'une entité unique, c'est à dire sans décomposition des membres du corps) par des caméras de surveillance est donc abordée ici.

L'application de détection et de suivi des piétons par des caméras de surveillance ne représente que 5% de l'ensemble des publications référencées. Cette dernière n'est donc pas majoritaire bien qu'elle soit complémentaire de l'application de détection des piétons à bord du véhicule. Comme le montre le tableau 7, les recherches sur la détection des piétons par caméra de surveillance débutent plus tard que celles sur le trafic. Elles commencent en effet seulement au milieu des années 1990 pour connaître un développement seulement dans les années 2000.

5.3 - Conduite assistée ou automatisée : caméra embarquée

D'après [48], équiper les véhicules d'un système de vision artificielle permet l'amélioration de trois éléments clés : la sécurité, le confort et l'efficacité. Les systèmes de vision artificielle embarqués dans les véhicules sont composés de très nombreuses facettes, parmi lesquelles, la détection et le maintien automatique sur la voie, les systèmes anti-collisions (basés sur des détecteurs d'obstacles, véhicules ou piétons), l'amélioration de la visibilité, la géo-localisation des véhicules (par carte ou par vision), la lecture automatique de la signalisation, ou encore la détection et la prise en compte des conditions météorologiques dégradées. Tous ces systèmes n'utilisent pas uniquement des caméras. La suite de cette partie abordera en revanche uniquement les systèmes pouvant utiliser une caméra.

Les algorithmes sont regroupés par sous-applications dans la suite. En effet, certaines applications rencontrées à bord des véhicules nécessitent des entrées et des capteurs différents : utilisation de la couleur ou non, résolution de la caméra variable, plage dynamique élevée ou non. Les différents algorithmes utilisés pour chaque application ne sont donc pas forcément cumulables derrière un même capteur.

Par rapport aux systèmes de vision artificielle de l'infrastructure, le fait d'avoir une caméra en mouvement apporte de nouvelles contraintes. Par exemple, la détection des objets à partir

de leur mouvement est rendu plus difficile car le fond est aussi en mouvement. De plus, le mouvement peut créer un flou de bouger selon le temps d'exposition et la vitesse du véhicule ce qui peut perturber la détection ou l'identification des objets.

5.3.1 - Détection d'obstacles : général

Dans la littérature, le terme obstacle est assez vague. Dans cette étude, un obstacle est considéré comme un objet, en mouvement ou non, pouvant se placer dans la zone de conduite du véhicule qui se déplace. Les objets qui pourraient devenir des obstacles prochainement (dans les secondes suivantes) sont aussi inclus dans les obstacles à détecter pour anticiper une collision (par exemple, un piéton qui s'apprête à traverser). Les systèmes de détection d'obstacles doivent permettre de détecter beaucoup d'objets très différents. La première distinction se fait entre les obstacles de l'infrastructure (obstacles immobiles appartenant à la scène) et les usagers (ou obstacles en mouvement ou susceptibles de l'être). Parmi les usagers sont présents les véhicules, les piétons, les motocyclistes, les cyclistes, mais aussi les animaux. Ils peuvent être immobiles (voiture stationnée, piéton assis, ou attendant à un passage piétons) ou en mouvement (voiture en circulation, piéton traversant la chaussée ou marchant sur le trottoir). Les systèmes de détection d'obstacles sont classiquement fondés sur trois étapes : détection, suivi et classification.

Il existe des détecteurs d'obstacles génériques qui détectent tous les obstacles sans distinction. Ces derniers sont souvent basés sur l'hypothèse du mouvement de l'obstacle ou sur l'information de profondeur (obtenue par télémétrie ou stéréoscopie) [8]. Les détecteurs d'obstacles génériques ne permettent pas forcément l'identification du type d'obstacle ni d'anticipation. Ils peuvent cependant permettre de faire fonctionner un système de freinage d'urgence anti-collision dont l'objectif est d'éviter la collision pour tout type d'obstacles. D'autres détecteurs d'obstacles permettent la détection d'un obstacle de type précis (voiture ou piéton par exemple). Pour ce type de détecteur, les informations sur la taille, la forme ou l'apparence de l'obstacle peuvent être prises en compte [8]. La détection peut alors être faite sur une seule image monoculaire (c'est à dire sans hypothèse de mouvement ni de profondeur) [8].

La distance de détection doit être d'environ $100m$ dans des conditions normales pour une application automobile [136]. Cette distance permet en effet de couvrir la distance de freinage d'un véhicule sur autoroute (à $130km.h^{-1}$) par temps sec. Cette distance devra encore être augmentée pour maintenir la vitesse du véhicule en conditions météorologiques dégradées en toute sécurité.

5.3.2 - Détection d'obstacles : véhicules

Pour les systèmes de vision artificielle embarqués, la détection des véhicules permet, entre autre, de participer aux applications de Stop&Go, de conduite coopérative, de conduite automatique, d'ACC, d'AEB ou encore de FCW. Les modules de détection de véhicules présentent donc des enjeux fort quant à la sécurité mais aussi au confort de conduite. D'après la figure 3, ce domaine d'application représente 17% du volume des algorithmes analysés et se place ainsi dans les trois plus grands domaines utilisant la vision artificielle en contexte routier. Les recherches dans ce domaine ont débuté dans les années 1990 (figure 7) ce qui place la détection des véhicules dans les premiers travaux de recherche sur la vision artificielle en contexte routier avec la détection des voies. Les recherches sur la détection de véhicules sont restées assez constantes jusqu'à maintenant.

Malgré les nombreuses recherches dans ce domaine, de nombreux problèmes sont encore

à résoudre [80]. Ils sont liés au fait que les véhicules et leur environnement présentent une grande variabilité : forme, taille et couleur pour les véhicules [118] [80] ; ensoleillement, nuit, neige, pluie, salissure, brouillard pour l'environnement [80]. Une difficulté supplémentaire est que les algorithmes doivent être robustes et rapides pour garantir la sécurité [80].

Les algorithmes de détection des véhicules utilisent tous un schéma commun en deux étapes. Tout d'abord, il y a une phase de sélection de zones d'intérêts qui pourraient être des véhicules. Puis, après une phase de filtrage des zones clairement non identifiables à des véhicules, une seconde phase consiste à trier les zones d'intérêts restantes pour déterminer si elles correspondent ou non à un véhicule [118]. Cette recherche en deux étapes permet de réduire le temps de calcul. En effet, l'identification (seconde phase) est la plus onéreuse en complexité. La première phase permet ainsi de limiter le volume de données à traiter. D'après [118], la première phase peut-être de trois types : basée sur un a priori (d'après des descripteurs a priori sensibles aux véhicules), basée sur l'information profondeur (souvent évaluée par stéréoscopie), ou encore basée sur le mouvement (seuls les éléments ayant un mouvement relatif non nul sont détectés) [80]. Pour la phase d'identification, deux grandes catégories existent [118]. La première est basée sur un modèle (*template*) et la seconde est basée sur l'apparence. Alors que la première utilise un modèle prédéfini à la main, la seconde peut s'assimiler à de la reconnaissance de forme avec deux classes (véhicule ou non). Cette seconde méthode utilise des descripteurs d'images, qui servent d'entrée à un algorithme de classification.

5.3.3 - Détection d'obstacles : piéton

La détection des piétons présente de réels enjeux en termes de sécurité. Ils font en effet partie des usagers vulnérables de la route et doivent être pris en compte de manière spécifique. Les recherches sur la détection des piétons par caméra embarquée ont débuté vers 1995 et ont connu un pic de développement en 2005. C'est donc un domaine de recherche assez récent. Ce domaine de recherche est important, il représente 12% du volume total des publications sur la vision artificielle rencontrées dans le contexte routier. Malgré cette activité importante, il y a encore un ordre de grandeur à franchir sur le nombre d'erreurs commises par les systèmes de détection de piétons pour être viable dans le contexte automobile [41].

La définition de la tâche de détection des piétons nécessite une précision. En effet, les termes d'humain (*human*), de piéton (*pedestrian*), ou encore de personne (*people*, *person*) peuvent être rencontrés dans la littérature. D'après les applications rencontrées, le piéton peut-être défini comme étant un humain (marchant ou étant immobile) debout sur le sol (sur la voie ou non). Dans cette étude bibliographique, seuls les détecteurs de piétons en contexte routier sont traités. Les algorithmes utilisés pour la détection de la posture (*human pose recovery*, *gait*, *human body posture estimation*, détection des membres du corps indépendamment et non du piéton en tant qu'une entité unique) et de reconnaissance d'activité (*activity recognition*) n'ont pas été retenus dans cette recherche bibliographique. Ces algorithmes sont en effet plus lourds en calcul et ne sont pas utilisés dans le contexte routier. Ils servent plutôt à des applications d'analyse du mouvement (sport de haut niveau, analyse de pathologies).

Les systèmes de vision artificielle pour la détection de piétons utilisent des caméras dans le domaine visible ou dans le domaine infrarouge. Deux approches existent pour la détection des piétons [107]. La première méthode consiste à détecter des parties du corps humain indépendamment avant de tenter une reconstruction du corps [107]. Bien que cette méthode passe par une décomposition du corps en morceaux, le mouvement de chaque partie n'est pas analysé indépendamment dans ce type de modèle à l'inverse des modèles de type analyse de la posture (*gait*). L'autre type de méthode est basée sur une phase de présélection de fenêtres.

Cette présélection peut reposer sur la géométrie (liée à la perspective), sur l'analyse de la profondeur (caméra stéréo), sur l'analyse des formes (silhouettes) ou sur l'analyse du mouvement [22]. Cette phase de présélection est suivie d'une validation de chaque fenêtre par classification de cette dernière. Pour cette phase de validation (ou de classification) des piétons, [41] propose deux grandes catégories. La première regroupe les modèles génératifs (*generative models*) qui utilisent une base de données et des descripteurs pour entraîner un classifieur. La seconde regroupe les modèles de forme (*shape models*). Cette dernière consiste à mesurer la distance entre une forme de silhouette type d'un piéton et la forme de la silhouette de l'objet à classer. Cette seconde méthode est fondée sur l'utilisation des contours. Cette méthode requiert un temps de calcul plus important pour la mise en correspondance de la forme [22] (compromis entre précision et temps de calcul).

Malgré les nombreux travaux de recherche sur le sujet, la détection de piétons présente encore de nombreuses difficultés [112]. La première difficulté pour la détection des piétons par caméra embarquée est que leur forme varie beaucoup d'une position à l'autre (marche, course, statique, légèrement courbé, vu de face ou de profil). En plus de la forme, la couleur change aussi beaucoup d'un piéton à un autre car leurs vêtements et l'illumination peuvent être différents [41] [22]. Cette variabilité rend la détection plus difficile à la fois pour les modèles basés sur une décomposition en parties (les positions possibles des membres doivent toutes être connues) ou pour les modèles basés sur la classification de fenêtres (un apprentissage spécifique doit être effectué pour chaque position). Les conditions climatiques ont aussi un impact fort. En effet, le domaine visible est clairement impacté par les conditions météorologiques dégradées (pluie, neige, brouillard). Pour le domaine de l'infrarouge, la pluie et le brouillard créent aussi de fortes perturbations [9]. De plus, aucun modèle généraliste explicite n'est disponible ce qui induit l'utilisation d'algorithmes avec apprentissage d'un modèle implicite [41]. Comme cela a été dit, des modèles existent pour la reconnaissance de posture mais ils sont très lourds à mettre en œuvre (non temps réel et avec installation spécifique des caméras) et hors du cadre de cette étude. A ces difficultés spécifiques s'ajoutent les problèmes traditionnels de détection d'objets comme la gestion du fond, la prise en compte des occlusions entre objets, les rassemblements d'objets, ou encore les séparations d'objets.

5.3.4 - Détection de signalisation verticale

La détection de signalisation verticale ne représente pas un enjeu fort du point de vue de la sécurité. Elle est en revanche indispensable pour de futures applications comme la régulation de vitesse adaptative (AAC), la conduite autonome ou encore la localisation. Elle est dès à présent utilisée dans les systèmes de reconnaissance des signalisations (TSR), une aide précieuse au conducteur qui lui rappelle les signalisations qu'il aurait pu omettre (vitesse maximale autorisée par exemple). Les cartes et la localisation GPS ne sont en effet pas suffisantes pour cette tâche car une mise à jour en temps réelle serait nécessaire (en cas de signalisation temporaire par exemple). De plus, les panneaux de signalisation ne sont pas tous détectés de la même manière par l'homme. Par exemple, les panneaux de vitesse sont mieux détectés que d'autres panneaux [89]. Un système de détection des signalisations verticales peut donc palier cette lacune du conducteur.

La catégorie de détection de signalisation verticale comprend ici les algorithmes de détection, de reconnaissance et de suivi des signalisations verticales présentes sur la voie. Certaines méthodes ne proposent que la partie reconnaissance de signalisation. Ce type de méthodes n'est pas inclus dans cette bibliographie car ce n'est pas directement applicable au domaine de l'automobile. Certaines de ces méthodes n'offrent en effet pas de possibilités de temps réel.

De plus, la partie reconnaissance des signalisations des algorithmes n'utilise généralement pas de descripteurs d'images. Elle utilise directement l'information contenue dans l'image pour faire un apprentissage (exemple du *deep learning*).

Les travaux de recherche sur la détection des signalisations verticales ont débuté dans les années 1990 mais ils se sont réellement développés entre 2000 et aujourd'hui [58] comme le montre la figure 7. Ils représentent 14% des travaux de recherche dans le cadre de l'étude (quatrième sujet de recherche le plus important) ce qui montre l'intérêt fort pour ce domaine. Les résultats positifs de reconnaissance des signalisations verticales (hors partie détection) peuvent atteindre 98% [48] ce qui montre que cette partie des algorithmes est bien maîtrisée. Contrairement à la reconnaissance, la partie détection des signalisations verticales est en revanche plus difficile.

Les méthodes de détection automatique des signalisations verticales (hors partie reconnaissance) sont décomposées en deux étapes : sélection de zones d'intérêt (parfois apparentée à une segmentation) et validation des zones d'intérêt (avec parfois précision de la forme et de la position) [58]. Cette étape de détection des signalisations est suivie d'une phase de reconnaissance (méthode par apprentissage en général) [58]. Pour l'étape de sélection des zones d'intérêt, qui consiste à pré-sélectionner rapidement des fenêtres susceptibles de contenir une signalisation verticale, l'utilisation de la segmentation couleur est fréquente [80]. Cette technique se justifie très bien par le fait que les signalisations sont conçues par l'homme pour être très contrastées et sont donc composées de couleurs très tranchées. Cette méthode est cependant très sensible aux facteurs qui influent sur la couleur des panneaux (ensoleillement, ombre, salissure, décoloration, conditions météorologiques) [89]. Une autre méthode de pré-sélection consiste à utiliser *a priori* sur la géométrie en tenant compte de la perspective. Cette méthode bien que très efficace en coût de calcul, échoue en revanche dès que la scène routière est compliquée : courbe en pente, signalisation sur un pont. Elle peut en revanche être utile si elle est couplée à un détecteur de voie par exemple. La dernière méthode de sélection des signalisations verticales rencontrée dans la littérature utilise la forme. Elle procède pour cela à une mise en correspondance des formes géométriques utilisées pour les panneaux. Cette méthode peut échouer dans le cas de panneaux partiellement occultés ou positionnés devant un fond fortement contrasté [89]. Les trois méthodes de présélection des zones d'intérêt s'emploient parfois ensemble (séquentiellement ou parallèlement). La seconde phase de validation des zones d'intérêts pré-sélectionnées met généralement en œuvre des méthodes basées sur un apprentissage [80]. Cette seconde phase comporte aussi parfois un module de suppression des doublons, par exemple, si deux régions d'intérêt ont été sélectionnées pour une même signalisation verticale.

De nombreux éléments causent des difficultés pour la détection des signalisations verticales. Ces dernières sont en effet très variées (interdiction, obligation, limitation) et changent selon les pays. Comme le rappelle [89], seules les signalisations verticales apprises par le système de détection pourront être détectées. Les signalisations verticales existent avec un fond coloré classique ou avec un affichage lumineux. L'orientation, la taille ou la distance à la route des panneaux varient, ceux sont autant de paramètres qui engendrent des problèmes de détection. En outre, bien que les panneaux soient conçus pour être clairement identifiables, ces derniers peuvent être sales, vandalisés ou détériorés [58], la réflexion de la lumière sur ces derniers peut aussi engendrer des problèmes de détection [45]. L'éclairement (heure de la journée, saison) et les conditions météorologiques dégradées sont encore des facteurs supplémentaires de difficulté [45] [58]. Les panneaux situés en hauteur peuvent aussi se trouver devant le ciel par effet de perspective. Le contraste en luminance très élevé est alors difficile à prendre en compte avec les capteurs actuels (non HDR). Le mouvement du véhicule peut parfois entraîner un flou

sur les images [58]. De plus, les panneaux réservés à certaines catégories de véhicules ou les panneaux des autres voies doivent être ignorés. Enfin, alors que pour certaines applications (comme le suivi de voie), il est possible d'utiliser un filtrage temporel pour stabiliser les résultats, la tâche de détection de signalisation verticale doit être exhaustive car un panneau peut être visible un laps de temps très court. Les signalisations verticales n'étant de plus pas prévisibles (zone de travaux ou d'accident par exemple), cette obligation d'exhaustivité pour la détection implique un coût en calculs important [48].

5.3.5 - Suivi de voie

Le suivi de voie consiste à détecter automatiquement la voie sur laquelle le véhicule se déplace (ou les bords de cette voie) par un système de vision artificielle embarqué. Cette application peut ainsi permettre de détecter un changement de file involontaire du conducteur (endormissement, erreur de direction) si le clignotant n'est pas enclenché ou si la limite est une bande blanche (LDW, *Lane Departure Warning*) [48]. Le véhicule peut alors simplement alerter le conducteur voire reprendre le contrôle pour se replacer sur la voie [61]. Les algorithmes de suivi de voie permettent aussi, couplés à un algorithme détecteur de véhicules, de déterminer quels sont les véhicules dans la même voie et dans les voies voisines (pour une application de régulateur de vitesse adaptatif (ACC) par exemple). Ce type d'algorithmes permet aussi le maintien automatique du véhicule sur la voie (*Lane Keeping*) [48]. Enfin les algorithmes de suivi de voie seront à terme une des briques de la conduite entièrement automatique [48]. Les enjeux liés au suivi de voie sont bien évidemment très importants car ce type d'algorithmes sera obligatoire pour toute conduite automatisée. De plus un défaut dans un algorithme de ce type peut entraîner des conséquences très lourdes en termes de sécurité. Pour clarifier le terme de suivi de voie, sont inclus sous cette nomenclature tous les algorithmes de détection de ligne, détection de bordure de voie, détection de voie (avec ou sans marquage). La route peut être structurée (autoroute) ou non structurée (chemin, milieu urbain). Les voies peuvent être double sens, urbaine, avec une ou plusieurs file. Elles peuvent être délimitées, entre autres, par un marquage ou non, par un trottoir, par un terre plein, par une bordure de campagne. Certains algorithmes se concentrent même sur le guidage dans des chemins.

Ce domaine de recherche est le plus important parmi les références recensées en contexte routier. Il représente 20% des publications rencontrées. Cela est dû au fait que c'est l'un des premiers domaines de recherche pour la vision artificielle embarquée. La difficulté pour créer ce type d'algorithme était, dans des cas simples (avec des marquages au sol bien distincts), plus faible que pour d'autres fonctions ce qui a permis son développement très tôt (vers 1986). Comme la difficulté de suivi de voie peut être toujours augmentée (multi-voies, détection malgré l'absence de marquages...), ce domaine est encore l'objet de nombreuses recherches aujourd'hui.

Les algorithmes de suivi de voie utilisent des techniques très différentes. Les méthodes simplement employées pour l'alerte de changement de voie nécessitent une initialisation par l'homme sur quelques mètres (pour la détection initiale de la route). Ces algorithmes permettent donc uniquement de corriger la trajectoire en cas de dérive. D'autres systèmes sont en revanche complètement autonomes et n'ont pas besoin d'initialisation humaine. La plupart des algorithmes de cette catégorie utilisent un descripteur d'images sur les contours suivi d'une transformée de Hough (généralisée ou non). Ce type de transformée est basée sur un système de vote et permet de détecter les lignes droites dans une image. Les lignes obtenues permettent alors dans certains algorithmes de faire correspondre un modèle de voie prenant en compte la position du véhicule et son orientation en se basant sur la perspective [8] [73]. Ce modèle est

alors défini par un ensemble d'équations. L'avantage de l'utilisation d'un modèle de voie est que la détection est rendue plus robuste aux occlusions ou aux ombres portées [8]. Le modèle simplifie aussi la commande du véhicule dans le cas d'un contrôle automatique [8]. En revanche, les algorithmes basés sur des modèles nécessitent de nombreux calculs pour l'optimisation des paramètres [8]. De plus, des problèmes importants surviennent si la voie ne correspond pas au modèle [8] (pente ou courbe non modélisées). Beaucoup d'algorithmes de détection de voie utilisent aussi l'hypothèse d'une route à l'inclinaison limitée voire plane [8] [73]. Cette hypothèse permet de simplifier la détection grâce à une calibration de la caméra. Les règles de la perspective peuvent en effet être utilisées pour simplifier les modèles [8]. Les distances peuvent alors être déterminées grâce à cette hypothèse [8]. En revanche, cette hypothèse n'est pas toujours respectée sur les routes, ce qui pose des problèmes de détection [8]. Avec cette méthode, la caméra nécessite de plus d'être calibrée à nouveau si elle bouge [8]. Un module de filtrage temporel est ensuite utilisé la plupart du temps [73], il renforce ainsi la robustesse de l'algorithme [48]. Ce dernier permet en effet de compenser une détection ratée sur certaines images par l'évaluation du mouvement du véhicule entre deux images successives. Outre la recherche de robustesse, le filtrage temporel permet aussi de prédire les zones de l'image ou sera susceptible d'être la voie lors de l'image suivante [6] [8]. Ainsi, seule cette zone est analysée à l'image suivante. Cela permet de limiter les calculs et d'améliorer le temps de réponse de l'algorithme [8]. En revanche, le défaut de cette méthode est que le choix de la zone à analyser peut-être critique si la voie en sort [8]. Le filtre temporel le plus couramment utilisé est le filtre de Kalman. Une hypothèse régulière est celle de la largeur constante [8] [73]. Cette hypothèse permet d'optimiser les calculs (modèle de voie plus simple) [8]. Il permet aussi de rendre l'algorithme plus robuste aux ombres portées ou aux occlusions [8]. En revanche, cette hypothèse s'avère négative lorsque la voie n'est pas de largeur constante [8]. C'est par exemple le cas lors d'un passage de deux voies à une voie. Une fois la détection faite, le suivi de la route (*Lane Keeping*) peut être effectué simplement en compensant en permanence l'écart avec le centre de la voie [6] [8].

De nombreux facteurs peuvent causer des difficultés aux algorithmes de détection des voies : craquelures sur la voie, marquage effacé, marquage sale, route mouillée (qui cause des réflexions), nuit, forte courbe, pente non constante, contre jour, réflexion du soleil sur la voie, ombres portées, occlusions par des objets (autres véhicules par exemple), saisons, neige, conditions météorologiques, ou encore réparation de la route en patch [8] [73].

5.3.6 - Localisation visuelle

Le terme de localisation visuelle regroupe en fait ici différents types d'algorithmes légèrement différents : le SLAM visuel (*Simultaneous Localisation And Mapping*), l'odométrie visuelle, l'estimation de la position 3D, le *visual homing*, ou encore le SFM (*Structure From Motion*). Toutes ces catégories d'algorithmes ont pour point commun d'estimer la position ou le mouvement du véhicule (en coordonnées réelles) à partir des images acquises par une caméra. Le SLAM visuel a pour objectif de localiser un véhicule dans un environnement inconnu tout en recréant une carte en parallèle. L'odométrie visuelle consiste à estimer le mouvement relatif du véhicule à partir d'une caméra. L'estimation de la position 3D consiste simplement à estimer la position du véhicule par rapport aux voies précédemment détectées par un algorithme de détection des voies, cette catégorie est plus simple puisqu'elle ne cherche qu'à trouver la position latérale du véhicule comme cela est le cas dans [74]. Le *visual homing* consiste à retrouver la position absolue du véhicule à partir d'une image acquise en directe et d'une base de données d'images et de positions correspondantes. Le SFM consiste à modéliser l'environnement du véhicule en

3D à partir d'une caméra, la position du véhicule est alors estimée dans cet environnement 3D. Pour les applications d'aide à la conduite ou de conduite automatisée, il est très important de pouvoir estimer la position du véhicule à partir de données visuelles. L'utilisation seule d'un GPS et d'une carte n'est en effet pas convenable pour deux raisons : le signal du GPS peut être perdu à cause de l'effet de canyon lorsque les bâtiments sont hauts et rapprochés et la carte devrait être mise à jour en permanence pour prendre en compte les aléas sur la route (accidents ou travaux par exemple). De plus, pour l'estimation du mouvement, l'odométrie visuelle présente un avantage par rapport à l'odométrie classique à partir des roues (estimation du mouvement à partir de la rotation des roues) ou de l'odométrie par centrale inertielle (estimation du mouvement par les accélérations). En effet, les roues peuvent déraiser ce qui provoque alors un décalage dans l'estimation du mouvement. Les centrales inertielles connaissent quant à elle un décalage constant [65]. L'enjeu lié aux méthodes de localisation visuelle est donc très important, d'autant plus que ce type d'algorithmes est utilisé dans de très nombreuses applications. Ces algorithmes de localisation visuelle viennent en effet compléter et faire le lien avec les algorithmes de détection de voie et de détection des obstacles (véhicules ou piétons).

Les algorithmes de localisation visuelle (SLAM, SFM, *visual homing*, odométrie visuelle) sont au départ plus développés dans le domaine de la robotique (en intérieur ou pour de l'exploration en extérieur sur terrain non structuré). Ils ont ensuite été adaptés à l'automobile. En parallèle, se développaient des algorithmes d'estimation de la position du véhicule sur les voies (après la détection de ces dernières) dans le contexte routier. La localisation visuelle en contexte routier est tout de même un domaine de recherche plus récent que d'autres, les premiers travaux ont en effet débuté au milieu des années 1990 (tableau 7). Pourtant, les recherches dans le domaine de la navigation robotique par caméra sont nombreuses dès les années 1980 et durant la première moitié des années 1990 [35]. Le domaine de la localisation visuelle en contexte routier n'a quant à lui connu un réel développement seulement dans les années 2000. Il reste encore un champ plutôt développé dans le contexte de la robotique que dans le contexte routier. Il ne représente en effet en tout que 4% de l'ensemble des travaux de recherche sur la vision artificielle dans le contexte routier (figure 3).

Les différentes sous familles d'algorithmes de localisation visuelle présentent des principes de fonctionnement particuliers. L'objet de cette bibliographie n'est pas de détailler chacun des mécanismes rencontrés. Seule l'idée générale et les points communs seront donc proposés ici. Pour toutes ces applications, deux problèmes sont posés : l'identification et le suivi de points entre deux images successives (partie traitement d'images) et la reconstruction de la position 3D de ces points (partie modélisation 3D) [24]. Il existe de nombreuses variantes pour les modèles de reconstruction 3D. Comme ces dernières ne concernent pas directement le traitement d'images, elles ne seront pas détaillées dans cette étude. Du point de vue de la technique de localisation visuelle, deux grandes variantes existent : la localisation locale ou relative, pour laquelle le véhicule se repère par rapport à sa position initiale (s'il perd la localisation à un instant il sera alors complètement perdu), et, la localisation globale qui permet de se retrouver sur une carte sans nécessairement connaître sa position précédente [108]. Du point de vue de la modélisation 3D, deux grandes classes existent [24]. La première est dite explicite : les amères (point 3D issus des points de l'image mis en correspondance) sont reconstruites et enregistrées dans un espace 3D. La seconde est dite implicite : la mise en correspondance des points entre deux images successives permet d'estimer le mouvement du véhicule de proche en proche et de placer des limites en 3D. Cette seconde méthode, bien plus simple, est souvent employée pour l'odométrie visuelle. Elle présente cependant des dérives importantes car l'erreur se cumule tout au long du parcours. A l'inverse la méthode explicite permet d'affiner la cartographie 3D des amères au fur et à mesure mais aussi de placer le véhicule de façon globale (et non

de proche en proche). Cette dernière est cependant beaucoup plus lourde en calcul (et souvent non en temps réel) par rapport à des méthodes implicites [65]. Du point de vue traitement d'images, deux grandes familles de méthodes existent aussi [78] : les méthodes dites denses (apparentées à des méthodes de flux optique), qui mettent en correspondance tout les points de l'image, et les méthodes avec point d'intérêt, qui sélectionnent les points les plus importants de l'image avant de les mettre en correspondance. Sur la route, les méthodes denses souffrent du fait que de nombreuses régions de taille conséquente sont lisses (ciel, chaussée). Or les zones non texturées et les zones à motif répété sont les plus compliquées à gérer pour les méthodes denses [24]. De plus, les autres véhicules ou la pluie créent des régions sur l'image qui faussent les résultats car elles sont en mouvement. Dans le contexte routier, les algorithmes de localisation visuelle sont majoritairement causals, c'est à dire que les images sont mises en correspondances les unes après les autres (images successives) [26]. Il existe aussi des méthodes dites non causales, ces dernières utilisent des images qui peuvent être capturées à des instants différents [26]. La plupart des méthodes utilisent un filtrage temporel afin de compenser d'éventuelles erreurs locales [78]. Ce dernier permet d'estimer la position suivante à partir du mouvement précédent. Le filtrage temporel le plus utilisé est le filtre de Kalman. La difficulté majeure pour les algorithmes de localisation en contexte routier est que les objets en mouvement faussent l'estimation de la position 3D ou du mouvement.

L'essentiel



- Les grandes catégories d'algorithmes de traitement et d'analyse d'images pour les caméras de surveillance du trafic sont : la détection et le suivi des véhicules, la détection et le suivi des piétons.
- Les grandes catégories d'algorithmes de traitement et d'analyse d'images pour les caméras embarquées sur les véhicules sont : la détection d'obstacles (générique, véhicule, piéton), la détection de signalisation verticale, le suivi de voie et la localisation visuelle.
- Les travaux de recherche sur la vision artificielle en contexte routier commencent au milieu des années 1980.
- Les conditions météorologiques dégradées sont une source prépondérante de problèmes pour les algorithmes de vision artificielle en contexte routier (avec les problèmes d'illumination).

6 - Conclusion et perspectives

Les conclusions de cette bibliographie générale sont nombreuses. D'abord les STI concernent à la fois le développement des véhicules et de l'infrastructure, en ajoutant une dimension de coopération entre les deux. Les deux objectifs majeurs qui sont ainsi visés sont la sécurité et la mobilité. Alors que de grands groupes du numérique (Google) font des effets d'annonce sur les véhicules autonomes, il est plus probable que l'innovation incrémentielle est celle qui permette l'arrivée progressive de l'automatisation du véhicule, en coopération avec l'infrastructure, sur les routes. C'est en tout cas le choix de l'ensemble des constructeurs et des équipementiers. Ainsi, le niveau 2 d'automatisation de la SAE est déjà atteint avec le *Traffic jam assist*. Ce choix d'innovation incrémentielle permet en effet de valider progressivement les technologies, d'avoir des retours d'expérience techniques mais aussi sur le ressenti des usagers. Il permet aussi

de donner du temps pour que les aspects législatifs concernant la conduite automatisée soient réglés internationalement.

L'historique des STI qui a été dressé dans ce rapport est aussi riche en conclusions. Il a permis de montrer que les nouveaux systèmes d'automatisation des véhicules devront faire preuve d'adaptation. Adaptation à l'homme qui doit être pris en compte dès le début des développements afin d'assurer une bonne compréhension du système (HMI). Adaptation à l'environnement et non l'inverse : les exemples de test de guidages magnétiques montrent qu'il n'est pas envisageable d'investir plus sur l'infrastructure aujourd'hui, le véhicule doit être capable de s'adapter à l'existant. De plus, l'historique montre que le bon développement des STI est conditionné par une unification des méthodes et des recherches. En effet, la mise en place de ces systèmes nécessite une coopération entre de nombreux acteurs. Ainsi, l'historique montre que les financements publics sont la clef de voute du développement de nouveaux systèmes. En effet, ils permettent de déclencher les coopérations nécessaires au développement et de faire avancer les innovations. Enfin, l'historique permet de montrer que le point de blocage pour la commercialisation du niveau 3 d'automatisation SAE est la validation en toutes conditions. Ces conditions incluent les conditions météorologiques dégradées. Cela justifie pleinement les travaux engagés par le Cerema sur l'ORSI COMET mais aussi de manière plus générale avec le développement de la plateforme R&D Brouillard et Pluie.

Cette bibliographie complète a aussi permis de se concentrer sur des aspects plus techniques. Ainsi, l'ensemble des capteurs employés en contexte routier, sur le véhicule et l'infrastructure, a pu être référencé. Les avantages et les limites de chaque capteur ont pu être identifiés au travers des retours d'expérience des chercheurs et des comparatifs existants dans la littérature. Les critères d'un bon capteurs sont donc les suivants : la diversité des objets détectables, la complexité du traitement des données, la résolution, l'angle de vision, la distance de vision, la sensibilité aux conditions météorologiques et d'éclairement, le niveau de commercialisation et le coût. Bien sûr le capteur idéal n'existe pas aujourd'hui car toutes les technologies existantes présentent au moins une limite importante. La fusion de données, et non la simple juxtaposition, est donc essentielle. Le couple de capteurs le plus présent aujourd'hui est composé de radars et de caméras du domaine visible. Demain, ces deux capteurs seront probablement complétés par des LIDARs et des caméras infrarouge.

La bibliographie présentée a permis de montrer l'importance des caméras. En effet, ces dernières sont présentes à la fois sur le véhicule et l'infrastructure, de plus, elles sont et seront présentes dans les capteurs combinés les plus répandus. En outre, l'homme acquiert 90% de l'information nécessaire pour conduire par la vue. Enfin, ces dernières sont particulièrement sensibles aux conditions météorologiques dégradées ce qui est l'objet de notre étude. C'est même l'une des premières sources de problèmes avec les conditions d'illumination. Un focus particulier a donc été fait sur les applications des caméras en contexte routier et le fonctionnement des algorithmes de vision artificielle associés. Les travaux de recherche sur la vision artificielle en contexte routier commencent au milieu des années 1980. Sur l'infrastructure, les grandes catégories d'algorithmes de traitement et d'analyse d'images sont : la détection et le suivi des véhicules et des piétons. À bord des véhicules, les grandes catégories sont : la détection d'obstacles (générique, véhicule, piéton), la détection de signalisation verticale, le suivi de voie et la localisation visuelle.

Perspectives

Ce travail aboutit donc à un focus sur les méthodes de vision artificielle faisant appel à des caméras. Il montre que les conditions météorologiques dégradées constituent le principal point faible des systèmes de vision artificielle utilisant des caméras. Il permet aussi de cerner quels

sont les points sensibles et les éléments courants dans les algorithmes de vision artificielle. Parmi eux, les descripteurs d'images sont particulièrement critiques. Une identification des descripteurs d'images les plus rencontrés en contexte routier sera donc nécessaire. Cette identification permettra de sélectionner les descripteurs d'images les plus courants avant de les tester en conditions météorologiques dégradées.

Références

- [1] ADEME, 2014. Convention du 15 décembre 2014 entre l'Etat et l'ADEME relative au programme d'investissements d'avenir (action : « Véhicules et transports du futur »).
- [2] Alonso I.P., Llorca D.F., Sotelo M.Á., et al., 2007. Combination of feature extraction methods for SVM pedestrian detection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(2) :292–307.
- [3] Aycard O., Baig Q., Bota S., et al., 2011. Intersection safety using lidar and stereo vision sensors. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, pages 863–869.
- [4] Beauvais M., Kreucher C., and Lakshmanan S., 1997. Building world models for mobile platforms using heterogeneous sensors fusion and temporal analysis. *Proceedings of Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 230–235.
- [5] Bertozzi M. and Broggi A., 1998. GOLD : A parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection. *Image Processing, IEEE Transactions on*.
- [6] Bertozzi M. and Broggi A., 2002. Artificial vision in road vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 90(7) :1258–1271.
- [7] Bertozzi M., Broggi A., Conte G., and Fascioli A., 1997. Obstacle and lane detection on ARGO Autonomous Vehicle. *Proceedings of Conference on Intelligent Transportation Systems*, 130 :557.
- [8] Bertozzi M., Broggi A., and Fascioli A., 2000. Vision-based intelligent vehicles : State of the art and perspectives. *Robotics and Autonomous systems*.
- [9] Bertozzi M., Broggi a., Grisleri P., Graf T., and Meinecke M., 2003. Pedestrian detection in infrared images. *IEEE IV2003 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings (Cat. No.03TH8683)*, pages 662–667.
- [10] Bertozzi M., Broggi a., Grisleri P., Tibaldi a., and Rose M., 2004. A tool for vision based pedestrian detection performance evaluation. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004*.
- [11] Beymer D. and Konolige K., 1999. Real-time tracking of multiple people using continuous detection. *IEEE Frame Rate Workshop*.
- [12] Bishop R., 2000. Intelligent vehicle applications worldwide. *IEEE Intelligent Systems and their Applications*, 15.
- [13] Bishop R., 2001. Whatever Happened to Automated Highway Systems (AHS) ? *Traffic Technology International*.
- [14] Bombini L., Cattani S., Cerri P., et al., 2009. Test-bed for Unified Perception & Decision Architecture. *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2009 : Smart Systems for Safety, Sustainability, and Comfort*, pages 287–298.
- [15] Bonin-Font F., Ortiz A., and Oliver G., 2008. Visual Navigation for Mobile Robots : A Survey. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 53(3) :263–296.
- [16] Bossu J., Hautière N., and Tarel J.P., 2011. Rain or Snow Detection in Image Sequences Through Use of a Histogram of Orientation of Streaks. *International Journal of Computer Vision*, 93(3) :348–367.
- [17] Braid D., Broggi A., and Schmiedel G., 2007. The TerraMax autonomous vehicle. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 36(October 2005) :129–153.

- [18] Broggi a., 2000. Special issue on vision applications and technology for intelligent vehicles : Part II - vehicles [Editorial]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 01(3) :69–71.
- [19] Broggi A., Bertozzi M., and Fascioli A., 1999. ARGO and the MilleMiglia in Automatico Tour. *IEEE on Intelligent Systems and their Applications*, 14(1) :55–64.
- [20] Broggi A., Bertozzi M., Fascioli A., Bianco C.G.L., and Piazzi A., 1999. The ARGO Autonomous Vehicle's Vision and Control Systems. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 3(4) :409–441.
- [21] Broggi A., Cerri P., Felisa M., et al., 2012. The VisLab Intercontinental Autonomous Challenge : an extensive test for a platoon of intelligent vehicles. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems (IJVAS)*, 10(3) :147.
- [22] Bu F. and Chan C.Y., 2005. Pedestrian detection in transit bus application : Sensing technologies and safety solutions. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, vol. 2005, pages 100–105.
- [23] Campbell M. and Garcia E., 2007. Team Cornell : technical review of the DARPA urban challenge vehicle. *DARPA Urban Challenge*, pages 1–25.
- [24] Chen Z., Samarabandu J., and Rodrigo R., 2007. Recent advances in simultaneous localization and map-building using computer vision.
- [25] Chiu C.C., Chen W.C., Ku M.Y., and Liu Y.J., 2009. Asynchronous stereo vision system for front-vehicle detection. In *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, pages 965–968.
- [26] Chiuso A., Favaro P., Jin H., and Soatto S., 2000. 3-D Motion and Structure from 2-D Motion Causally Integrated over Time : Implementation. *Computer Vision - ECCV 2000*, 1843 :734–750.
- [27] Chung E. and Rosalion N., 1999. Effective incident detection and management on free-ways. Tech. rep., ARRB Transport Research Ltd.
- [28] Collado J.M., Hilario C., De La Escalera A., and Armingol J.M., 2005. Detection and classification of Road Lanes with a frequency analysis. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, vol. 2005, pages 78–83.
- [29] Collins R., Lipton A., Kanade T., et al., 2000. A System for Video Surveillance and Monitoring. Tech. Rep. Vol. 2, Carnegie Mellon University, the Robotics Institute, Pittsburg.
- [30] Condos F., 1996. Traffic surveillance and detection systems for intelligent transportation systems applications. *Compendium of Technical Papers for the 66th ITE . . .*, pages 354–356.
- [31] Crisman J.D. and Thorpe C.E., 1993. SCARF. A color vision system that tracks roads and intersections.
- [32] Dagan E., Mano O., Stein G., and Shashua A., 2004. Forward collision warning with a single camera. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004*, pages 37–42.
- [33] Davis J.W. and Sharma V., 2004. Robust detection of people in thermal imagery. *Proceedings - International Conference on Pattern Recognition*, 4 :713–716.
- [34] Davis L., Chelappa R., Rosenfeld A., et al., 1998. Visual surveillance and monitoring. *Image Understanding Workshop : Proceedings of a Workshop Held in Monterey, California, November 20-23, 1998*, pages 73–76.

- [35] DeSouza G. and Kak A., 2002. Vision for mobile robot navigation : A survey. *Pattern Analysis and Machine . . .*
- [36] Dickmanns E., 1997. Vehicles capable of dynamic vision. *IJCAI*.
- [37] Dickmanns E.D., 1998. Vehicles capable of dynamic vision. *Artificial Intelligence*, 103(1) :49–76.
- [38] Diebold Institute for Public Policy Studies and Information-Based Infrastructure Project, 1995. *Transportation Infostructures : The Development of Intelligent Transportation Systems*. Praeger.
- [39] Dollár P., Wojek C., Schiele B., and Perona P., 2009. Pedestrian detection : A benchmark. In *2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, CVPR Workshops 2009*, pages 304–311.
- [40] Dollár P., Wojek C., Schiele B., and Perona P., 2012. Pedestrian detection : an evaluation of the state of the art. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 34(4) :743–61.
- [41] Enzweiler M. and Gavrila D.M., 2009. Monocular pedestrian detection : Survey and experiments. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(12) :2179–2195.
- [42] Essa I., 1999. Computers seeing people. *AI magazine*, 20(2) :69–82.
- [43] FHWA, 1997. JAPAN'S VEHICLE CRASH AVOIDANCE RESEARCH PROGRAM(S) - Observational Report. Tech. rep.
- [44] Figueiredo L. and Jesus I., 2001. Towards the development of intelligent transportation systems. *Intelligent Transportation Systems*.
- [45] Fleyeh H., 2004. Color detection and segmentation for road and traffic signs. *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 2004.*, 2 :1–3.
- [46] FLIR, 2005. Seeing through fog and rain with a thermal imaging camera. Tech. rep., FLIR.
- [47] Forrest A. and Konca M., 2007. Autonomous Cars and Society. Tech. rep., Worcester Polytechnic Institute.
- [48] Franke U., Gavrila D., and Gern a., 2001. From door to door, principles and applications of computer vision for driver assistant systems.
- [49] Franke U., Pfeiffer D., Rabe C., et al., 2013. Making bertha see. *IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 214–221.
- [50] Freescale, 2011. Radar 77GHz fact sheet.
- [51] Gandhi T. and Trivedi M., 2006. Pedestrian collision avoidance systems : A survey of computer vision based recent studies. . . . *Systems Conference, 2006. ITSC'06. . . .*, pages 976–981.
- [52] Gandhi T. and Trivedi M.M., 2007. Pedestrian protection systems : Issues, survey, and challenges. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(3) :413–430.
- [53] Gat I., Benady M., and Shashua A., 2005. A monocular vision advance warning system for the automotive aftermarket. *SAE World Congress & Exhibition*.
- [54] Gavrila D.M., 1999. The Visual Analysis of Human Movement : A Survey. *Computer Vision and Image Understanding*, 73(1) :82–98.

- [55] Gavrila D.M., 2001. Sensor-based pedestrian protection. *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, 16(December) :77–81.
- [56] Geiger A., Lauer M., Moosmann F., et al., 2012. Team AnnieWAY's Entry to the 2011 Grand Cooperative Driving Challenge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pages 1–10.
- [57] Gerónimo D., López A., and Sappa A., 2007. Computer vision approaches to pedestrian detection : visible spectrum survey. *Pattern Recognition and Image ...*, 4478(c) :547–554.
- [58] Gomez-Moreno H., Maldonado-Bascon S., Gil-Jimenez P., and Lafuente-Arroyo S., 2010. Goal evaluation of segmentation algorithms for traffic sign recognition. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(4) :917–930.
- [59] Google. Google Car.
- [60] Guizzo E., 2011. How Google's Self-Driving Car Works. *IEEE Spectrum*.
- [61] Hanwell D. and Mirmehdi M., 2012. Detection of Lane Departure on High-speed Roads. *Icpram* (2).
- [62] Hautière N., 2005. Détection des conditions de visibilité et estimation de la distance de visibilité par vision embarquée.
- [63] Hautière N., Bossu J., Bigorgne E., et al., 2009. Sensing the Visibility Range at Low Cost in the SAFESPOT Roadside Unit. *ITS World Congress 2009*, pages 1–8.
- [64] Hautière N., Labayrade R., Boussard C., et al., 2008. Perception through Scattering Media for Autonomous Vehicles. *Autonomous Robots Research Advances*, page 223.
- [65] Howard A., 2008. Real-time stereo visual odometry for autonomous ground vehicles. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, pages 3946–3952.
- [66] Hu W., Tan T., Wang L., and Maybank S., 2004. A survey on visual surveillance of object motion and behaviors. *IEEE Transactions On Systems Man And Cybernetics*, 34(3) :334–352.
- [67] Hughes C., O'Malley R., O'Cualain D., Glavin M., and Jones E., 2011. Trends towards Automotive Electronic Vision Systems for Mitigation of Accidents in Safety Critical Situations. In M. Chiaberge, editor, *New Trends and Developments in Automotive System Engineering*, pages 493–512. InTech.
- [68] Hussein M., Porikli F., and Davis L.S., 2009. A Comprehensive Evaluation Framework and a Comparative Study for Human Detectors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10.
- [69] Ioannou P., 1998. Development and Experimental Evaluation of Autonomous Vehicles for Roadway / Vehicle Cooperative Driving Petros Ioannou University of Southern California. Tech. Rep. February, California PATH Research - University of Southern California.
- [70] IVHS AMERICA, 1993. Strategic Plan for Intelligent Vehicle-Highway Systems. Tech. Rep. 202.
- [71] Jacobs N., Burgin W., Fridrich N., et al., 2009. The Global Network of Outdoor Webcams : Properties and Applications. *Networks*, (c) :111.
- [72] Kammel S., Ziegler J., Pitzer B., et al., 2009. Team AnnieWAY's autonomous system for the DARPA Urban Challenge 2007. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 56(9) :359–391.

- [73] Kastrinaki V., Zervakis M., and Kalaitzakis K., 2003. A survey of video processing techniques for traffic applications. *Image and Vision Computing*, 21(4) :359–381.
- [74] Ke Q. and Kanade T., 2003. Transforming camera geometry to a virtual downward-looking camera : robust ego-motion estimation and ground-layer detection. *2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings.*, 1 :0–7.
- [75] Kim K., Oh S., and Kim S., 1995. An autonomous land vehicle PRV II : Progresses and performance enhancement. . . ., *Proceedings of the*.
- [76] Kim Z. and Malik J., 2003. Fast vehicle detection with probabilistic feature grouping and its application to vehicle tracking. In *Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*, vol. 1, pages 524–531.
- [77] Klein L.A. and Kelley M.R., 1996. Detection Technology for IVHS Volume I : Final Report. Tech. rep., US Department Of Transportation - Federal Highway Administration.
- [78] Konolige K., Agrawal M., and Sola J., 2007. Large scale visual odometry for rough terrain. *Proc International Symposium on Robotics Research*, 2 :1150–1157.
- [79] Korrapati H., Courbon J., Alizon S., and Marmoiton F., 2013. "The Institut Pascal Data Sets" : un jeu de données en extérieur, multicapteurs et datées avec réalité terrain, étalonnage et outils logiciels. In *Orasis, Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur*.
- [80] Kovacic K., Ivanjko E., and Gold H., 2013. Computer vision systems in road vehicles : a review. *Croatian Computer Vision Workshop*.
- [81] Kovacic K., Ivanjko E., and Gold H., 2014. Real Time Vehicle Trajectory Estimation on Multiple Lanes. In *Proceedings of the Croatian Computer Vision Workshop*, pages 21–26.
- [82] Lee D.D., 2007. The Ben Franklin Racing Team : Technical Paper, DARPA Urban Challenge. *DARPA Urban Challenge*.
- [83] Little C., 1997. The Intelligent Vehicle Initiative : Advancing " Human-Centered " Smart Vehicles. *Public Roads*, 61(2) :1–9.
- [84] Masahiko I., Minoru H., and Tomohiro F., 1998. Intelligent Transport Systems (ITS). *Automotive Transportation in Perspective*, (1998) :38–41.
- [85] Maurer M., Behringer R., Fürst S., Thomanek F., and Dickmanns E.D., 1996. A compact vision system for road vehicle guidance. *Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition*, 3 :313–317.
- [86] Milanés V., Alonso J., Bouraoui L., and Ploeg J., 2011. Cooperative maneuvering in close environments among cybercars and dual-mode cars. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(1) :15–24.
- [87] Moeslund T.B. and Granum E., 2001. A Survey of Computer Vision-Based Human Motion Capture.
- [88] Moeslund T.B., Hilton A., and Krüger V., 2006. A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis. *Computer Vision and Image Understanding*, 104(2-3) :90–126.
- [89] Mogelmose A., Trivedi M.M., and Moeslund T.B., 2012. Vision-based traffic sign detection and analysis for intelligent driver assistance systems : Perspectives and survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(4) :1484–1497.

- [90] Nooralahiyan a., 1998. Vehicle classification by acoustic signature*1. *Mathematical and Computer Modelling*, 27(9-11) :205–214.
- [91] Ohzora M., Ozaki T., Sasaki S., Yoshida M., and Hiratsukat Y., 1990. Video-Rate Image Processing System for an Autonomous Personal Vehicle System. *System*, pages 90–93.
- [92] ONISR and Salathé M., 2016. L'accidentalité routière en 2014. Tech. rep.
- [93] partners I., 2005. Intelligent Vehicle Initiative Final Report. Tech. Rep. September.
- [94] Patil S.P. and Patil M.B., 2014. Moving Vehicle Detection : A Review. *International Journal of Computer Applications*, 87(15) :35–37.
- [95] Pflugfelder R., 2000. A comparison of visual feature tracking methods for traffic monitoring. *ÖGAI Journal*.
- [96] Ploeg J., Shladover S., Nijmeijer H., and van de Wouw N., 2012. Introduction to the Special Issue on the 2011 Grand Cooperative Driving Challenge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3) :989–993.
- [97] Pomerleau D.a., 1989. Alvin : An autonomous land vehicle in a neural network. Tech. rep., Carnegie Mellon University.
- [98] Pomerleau D.a., 1995. RALPH : Rapidly adapting lateral position handler. ... *Vehicles' 95 Symposium., Proceedings of the*.
- [99] Pomerleau D.a. and Jochem T., 1996. Rapidly adapting machine vision for automated vehicle steering.
- [100] PROMOTE-CHAUFFEUR, 1999. Report on Safety Analysis of System Components and Hazard Analysis of Tow-Bar. Tech. rep.
- [101] Raphael E. and Kiefer R., 2011. Development of a camera-based forward collision alert system. *SAE Technical Paper*, page 12.
- [102] Reader N.T.O., 1997. FIELD TEST OF MONITORING OF URBAN NON-INTRUSIVE TECHNOLOGIES FIELD TEST OF MONITORING OF URBAN VEHICLE OPERATIONS USING NON-INTRUSIVE TECHNOLOGIES Final Report CR SO OW. Tech. rep., Federal Highway Administration.
- [103] Regensburger U. and Graefe V., 1994. Visual recognition of obstacles on roads. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)*, 2 :980–987.
- [104] Reinholtz C., Alberi T., Anderson D., et al., 2007. DARPA Urban Challenge - Technical Paper. *DARPA Urban Challenge*.
- [105] Reisman P., Mano O., Avidan S., and Shashua a., 2004. Crowd detection in video sequences. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004*.
- [106] SAE International, 2014. J3016 - Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems.
- [107] Schwartz W.R., Kembhavi A., Harwood D., and Davis L.S., 2009. Human detection using partial least squares analysis. *Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on*, (lccv).
- [108] Se S.S.S., Lowe D., and Little J., 2002. Global localization using distinctive visual features. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pages 226–231.
- [109] Sétra, 2011. Transports intelligents état des lieux et perspectives. Tech. rep.

- [110] Sétra, 2012. Transports intelligents Mise en œuvre de la directive 2010 / 40. Tech. rep.
- [111] Shafer M., 1993. A comparison of international IVHS. In *CVEN 689*.
- [112] Shashua A., Gdalyahu Y., and Hayun G., 2004. Pedestrian detection for driving assistance systems : single-frame classification and system level performance. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004*.
- [113] Shladover S., 2000. PATH Cars Popular Attractions at SmartCruise Demo 2000. *Intellimotion*, 9(3) :8–9.
- [114] Shladover S., 2007. National Automated Highway System Consortium Reports Posted Online to Commemorate Tenth Anniversary of Demo 97.
- [115] Stanczyk D., 2004. Comptage temporaire du trafic routier. Tech. rep., Sétra.
- [116] Stanford Racing Team, 2007. Stanford's Robotic Vehicle 'Junior' : Interim Report. *DARPA Urban Challenge*.
- [117] Sun Z., Bebis G., and Miller R., 2004. On-road vehicle detection using optical sensors : a review. In *The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 585 – 590.
- [118] Sun Z., Bebis G., and Miller R., 2006. On-road vehicle detection : A review. *IEEE PAMI*.
- [119] Team MIT, 2007. Technical Report - DARPA Urban Challenge. *DARPA Urban Challenge*, pages 1–25.
- [120] Thorpe C., 1997. Mixed traffic and automated highways. *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Innovative Robotics for Real-World Applications. IROS '97*, 2.
- [121] Thorpe C., Carlson J., and Duggins D., 2005. Safe robot driving in cluttered environments. *Robotics Research*.
- [122] Thorpe C., Jochem T., and Pomerleau D.a., 1997. The 1997 automated highway free agent demonstration.
- [123] Thorpe C., Shafer S., Kanade T., Lab, and the members of the Strategic Computing Vision, 1987. *Vision and Navigation for the Carnegie Mellon Navlab*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.
- [124] Thrun S., 2002. Robotic Mapping : A Survey. *Science*, 298(February) :1–35.
- [125] Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., et al., 2007. Stanley : The robot that won the DARPA Grand Challenge. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 36(April) :1–43.
- [126] Tsinas L. and Graefe V., 1992. Automatic Recognition of Lanes for Highway Driving. *IFAC Conference on Motion Control for Intelligent . . .*
- [127] Tsugawa S., 2000. An introduction to Demo 2000 : The cooperative driving scenario. *IEEE Intelligent Systems*, 15(4) :78–79.
- [128] Tsugawa S., Watanabe N., and Fujii H., 1991. Super smart vehicle system - Its concept and preliminary works. In *Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, pages 269–277. IEEE.
- [129] Urmson C., Anhalt J., Bagnell D., et al., 2007. Tartan Racing : A Multi-Modal Approach to the DARPA Urban Challenge. *DARPA Urban Challenge*, 94 :386–387.
- [130] Urmson C., Anhalt J., Bagnell D., et al., 2009. Autonomous driving in Urban environments : Boss and the Urban Challenge. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 56(February) :1–59.

- [131] Urmson C., Anhalt J., Bartz D., et al., 2007. A robust approach to high-speed navigation for unrehearsed desert terrain. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 36(8) :45–102.
- [132] USDOT, 1999. Problem Area Descriptions - Motor Vehicle Crashes - Data Analysis and IVI Program Emphasis. Tech. Rep. November.
- [133] VisLab, 2013. VisLab PROUD-Car Test 2013 Webpage. vislab.it/.
- [134] Visvikis C., Smith T.L., Pitcher M., and Smith R., 2008. Study on lane departure warning and lane. Tech. rep., Transport Research Laboratory.
- [135] Wang G., Xiao D., and Gu J., 2008. Review on vehicle detection based on video for traffic surveillance. *IEEE ICAL*.
- [136] Widmann G.R., Bauson W.a., and Alland S.W., 1998. Development of Collision Avoidance Systems at Delphi Automotive Systems. *1998 IEEE International Conference on Intelligent Vehicles vol.2*, pages 353–358.
- [137] Williamson T. and Thorpe C., 1998. Detection of Small Obstacles at Long Range Using Multibaseline Stereo. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, 1 :311–316.
- [138] Yilmaz A., Javed O., and Shah M., 2006. Object tracking : A survey.
- [139] Yoneyama A., Yeh C.H., and JayKuo C.C., 2005. Robust vehicle and traffic information extraction for highway surveillance. *Eurasip Journal on Applied Signal Processing*, 2005(ii) :2305–2321.
- [140] Ziegler J., Bender P., Schreiber M., et al., 2014. Making bertha drive-an autonomous journey on a historic route. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(2) :8–20.

Rédigé le

Le chargé d’Affaire

Pierre Duthon

Vu et vérifié, le

L’adjoint à la
responsable de l’unité

Frédéric Bernardin

Vu et approuvé, le

Le responsable de
groupe

Alexandre Cuer



Cerema

Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Énergie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures
Impacts sur la santé - Mobilités et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Département Laboratoire de Clermont-Ferrand - 8-10 rue Bernard Palissy - ZI du Brézet - 63017 CLERMONT-FERRAND Cedex - +33 (0)4 73 42 10 10

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

Établissement public - Siret 130 018 310 00 107 - TVA intracommunautaire : FR 94 130018310 - www.cerema.fr