

VÉHICULES AUTONOMES ET CONNECTÉS

**Dominique Paret,
Hassina Rebaine**

VÉHICULES AUTONOMES ET CONNECTÉS

Technologies, architectures et réseaux :
du multiplex à l'Ethernet automobile

DUNOD

Cet ouvrage a été réalisé avec le soutien de Vector

Conception graphique : Pierre-André Gualino

Illustration de couverture : Suwin / Shutterstock

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2019

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-078827-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

Tout d'abord, je voudrais remercier Dominique Paret et Hassina Rebaine pour leur excellente initiative d'écriture d'un livre sur les technologies nécessaires à nos futurs véhicules autonomes. Peu de littérature technique existe encore sur ce sujet mais tous les jours nous constatons de nombreux nouveaux développements.

La France doit se positionner dans ces domaines et à l'horizon 2030, il s'agit d'une opportunité extraordinaire car l'automobile vit aujourd'hui une période de changement extraordinaire. Les véhicules seront (partiellement) autonomes, connectés, électrifiés, partagés, etc. Leurs usages évoluent aussi, et les nouvelles mobilités élargissent le champ des possibles. De plus, les utilisateurs sont avides de nouvelles expériences, conséquences de l'évolution de leur mode vie et de leur environnement.

De nouvelles technologies et compétences associées apparaissent chaque jour pour comprendre, développer et mettre en applications ces expériences. Les sciences traditionnelles de l'ingénieur du xx^e siècle et du début du xxi^e deviendront aussi des sciences humaines et l'ingénieur de demain sera/devra être également designer, marketeur, psychologue, juriste, philosophe, etc.

Les termes conventionnels aussi évoluent : le confort devient bien-être, l'ergonomie devient interface homme-machine, l'électronique embarquée devient capteurs, big data et algorithmes, la réglementation s'élargit aux données personnelles, l'automatisation se transforme en éthique...

Le monde de la formation des ingénieurs n'est pas en reste. Toutes les filières vivent de profonds changements ; nouvelles écoles, nouvelles orientations, regroupement d'écoles, école/université, taille des promotions, double diplôme, international, apprentissage, cursus projet, spin-off, digital, nouvelles technologies. Mais ce n'est pas encore suffisant. L'industrie doit apporter à ses techniciens et ingénieurs l'expertise de ses experts et bâtir avec eux le monde académique, son contenu, les cursus, stages, rencontres, projets, postes chaires... À ce jour il est admis par tous que le véhicule du futur s'appuiera fortement sur le concept d'intelligence artificielle, mais en fait celui-ci s'appuiera tout d'abord et fondamentalement sur l'intelligence élargie des ingénieurs qui l'auront conçu !

C'est dans ce sens que cet ouvrage très complet s'adresse aussi bien aux lecteurs désireux de bien cerner la complexité des véhicules autonomes (toutes applications confondues), de leurs mises en applications connectées ou non qu'à ceux qui les conçoivent.

La grande particularité de ce travail est, à mon sens, de repositionner les fondamentaux de nos métiers, à la fois fonctionnels, logiciels et matériels des briques technologiques pour en décrire les architectures, d'appréhender les différents protocoles mis en œuvre, de sensibiliser le concepteur aux réglementations et normalisations, aux traitements de données sensibles et enfin, de traiter la sécurité et cyber sécurité de bout en bout. D'autres points sont mis en exergue *via* de nombreux éléments abordés sur la conception globale de la chaîne des véhicules autonomes et connectés sécurisés et sur sa concrétisation technico-économique.

Dominique et Hassina sont depuis de longues années des experts techniques reconnus en technologies des architectures et des réseaux pour l'automobile tant « multiplexés » (LIN, CAN, CAN FD, FlexRay, etc.) que « point à point commutés » (Ethernet 100 M, 1 G et multi G) en ce qui concerne les protocoles, les couches physiques et les développements logiciels et outils, le haut niveau de technicité des thèmes abordés dans ce livre ne peut qu'en attester.

Puisse cet ouvrage contribuer à l'édifice de compétences nécessaires au développement du véhicule autonome en France !

Philippe AUMONT

Vice-Président de la SIA – Société des Ingénieurs de l'Automobile

Table des matières

Préface	V
Remerciements	XV
Les auteurs	XVII
Dominique Paret	XVII
Hassina Rebaine	XVII
Avant-propos	XIX
Pourquoi cet ouvrage ?	XIX
Comment est construit et comment aborder cet ouvrage	XX
À qui s'adresse ce livre	XXI
Le niveau technique	XXI
La pédagogie	XXI
Note importante	XXI
Introduction	XXIII
Avertissement	XXIII
En préambule...	XXIII
1 Le buzz des véhicules autonomes et connectés	1
1.1 Le pourquoi et les limites de cet ouvrage	2
1.1.1 Architectures	2
1.1.2 Réseaux de communication	3
1.2 Terminologies	3
1.2.1 Véhicules autonomes et/ou connectés	3
1.2.2 Termes et vocabulaire de la conduite autonome	5

1.3 Un peu d'histoire du véhicule autonome	19
1.3.1 Véhicules autonomes	19
1.3.2 Types de motorisation et véhicules autonomes	21
2 Aspects connexes aux véhicules autonomes et connectés	23
2.1 Un peu de vocabulaire	24
2.2 Aspects réglementaires et recommandations	25
2.2.1 Réglementations actuelles et réglementations nécessaires à l'introduction des véhicules autonomes	25
2.2.2 Assouplissement de la législation pour le véhicule autonome	26
2.2.3 La France et les véhicules autonomes	27
2.2.4 Exemple de la région Île-de-France	29
2.3 Aspects législatifs – Codes	30
2.3.1 Article R415-5	30
2.3.2 Article R110-2 – de l'arrêt	31
2.3.3 Article R417-10 – de l'arrêt et du stationnement	31
2.4 Aspects normatifs	33
2.4.1 ISO, CEN et IEC, CENELEC	33
2.4.2 BNA	34
2.4.3 ETSI	34
2.4.4 ASCQUER	34
2.5 Aspects juridiques	35
2.5.1 Aspects internationaux	35
2.5.2 Aspects nationaux	35
2.6 Aspects assurantiels	40
2.6.1 Responsabilité civile	41
2.6.2 Responsabilité pénale	41
2.6.3 Qui paiera en cas d'accident ?	42
2.6.4 Autres problèmes à régler	43
2.7 Aspects choix moraux et éthiques du VA	43
2.7.1 Les dilemmes à résoudre	43
2.7.2 Une solution au problème	44

Table des matières

2.8 Aspects sécuritaires	44
2.8.1 Les maillons faibles	45
2.8.2 Niveaux de sécurité applicables en véhicules	47
2.8.3 Cryptographie	49
2.8.4 Vulnérabilités et attaques de la chaîne véhicule	50
2.8.5 Applications aux véhicules standards et véhicules autonomes	50
2.9 Aspects cybersécuritaires	50
2.9.1 Généralités	51
2.9.2 Pour les véhicules particuliers	52
2.9.3 Le problème des flottes de véhicules	52
2.9.4 Que faire ?	52
2.9.5 Cybersécurité et assurance	53
2.10 Aspects sociétaux – CNIL – GDPR	54
2.10.1 Réglementations de libertés individuelles et sociétales	54
2.10.2 La CNIL et la Loi informatique et libertés	55
2.10.3 Le mandat 436	57
2.10.4 Le GDPR (<i>general data protection regulation</i>)	57
2.11 Aspects liés aux recommandations sanitaires	62
2.12 Aspects liés aux réglementations environnementales	63
2.12.1 Recyclage	63
2.12.2 Traitements des déchets électroniques	63
2.13 Aspects liés à l'acceptabilité du grand public	64
2.13.1 Facteurs humains	64
2.14 Aspects liés aux technologies des batteries dans les VE et VA	66
2.14.1 Électrique et autonome... mais sur combien de kilomètres ?	66
2.14.2 Principe de fonctionnement d'une batterie électrique	67
2.14.3 Technologies actuelles et futures des batteries	69
2.15 Autres aspects	74
2.15.1 Les essais	74
2.15.2 Les tests	75
2.15.3 Validation	75

2.15.4	Homologation	76
2.15.5	Certification	78
2.16	Le planning des véhicules autonomes	79
3	Du DAS à l'ADAS puis HADAS au VA L3, L4, L5 !	81
3.1	Les fonctionnalités à assurer	81
3.2	Les capteurs et leurs technologies	88
3.2.1	Généralités	88
3.2.2	Ce qui touche à la vision	89
3.2.3	Caméras	89
3.2.4	Radar	101
3.2.5	Lidar	105
3.2.6	Capteurs à ultrason (sonar)	122
3.2.7	De position	123
3.2.8	Mesure de la dynamique du véhicule	125
3.2.9	En résumé	125
3.2.10	Exemples d'applications aux véhicules autonomes	129
3.3	Les ADAS et C ^{ie}	134
3.3.1	AD – <i>assistance driver</i>	134
3.3.2	ADAS – <i>advanced driver-assistance systems</i>	134
3.3.3	HADAS – <i>high advanced driver-assistance systems</i>	134
3.3.4	ADAS – plus en détail	134
3.3.5	Exemples non limitatifs de quelques ADAS représentatifs	138
4	Réseaux et architecture	151
4.1	Les différents réseaux en lice	151
4.1.1	La gestion de la motorisation (<i>power train</i>)	152
4.1.2	La gestion du châssis	153
4.1.3	La gestion de l'habitacle (<i>body part</i>)	153
4.1.4	La gestion de communications	155
4.1.5	La gestion de la sécurité et des ADAS	155
4.1.6	La gestion supervisée, organisée, de tout ce beau monde	155

4.2 Le véhicule connecté	155
4.2.1 Le <i>big data</i> – les <i>golden data</i> et l'automobile	155
4.2.2 La communication	157
4.3 Véhicule autonome : fusion de données, IA et consort	166
4.3.1 Fusions de données des capteurs	168
4.3.2 IA (intelligence artificielle) – <i>e-learning</i> – <i>deep learning</i>	173
4.3.3 <i>E-learning</i> – <i>machine learning</i> – <i>deep learning</i>	175
4.4 Architectures hardwares des véhicules	181
4.4.1 Topologies spécifiques aux réseaux	182
4.4.2 Architectures hardware automobiles	184
4.5 Types de réseaux et description des protocoles utilisés en véhicules autonomes	192
4.5.1 LIN	192
4.5.2 SENT	193
4.5.3 CAN – rappel du concept	196
4.5.4 FlexRay	218
4.5.5 MOST	223
4.5.6 LVDS	228
4.5.7 Résumé synthétique de l'héritage réseaux automobiles	229
5 Ethernet et l'automobile... et vice versa	231
5.1 Ethernet industriel	233
5.1.1 Un peu d'histoire	233
5.1.2 Le principe	233
5.1.3 La trame Ethernet de l'IEEE 802.3	234
5.1.4 Les variantes courantes d'Ethernet	237
5.1.5 Variantes de la couche physique d'Ethernet industriel	240
5.2 Les paradigmes des couches physiques d'Ethernet et l'automobile	250
5.2.1 Introduction	250
5.2.2 Goulet d'étranglement d'Ethernet en automobile = coût + EMC	251
5.2.3 Choix de la couche physique en automobile	252

5.3 Les variantes d’Ethernet PHY utilisées en automobile	278
5.3.1 Ethernet à 100 Mbit/s en automobile	278
5.3.2 Ethernet à 1 Gbit/s en Automobile	286
5.3.3 Ethernet Multi-Giga en automobile	290
5.3.4 Ethernet à 10 Mbit/s en automobile	290
5.3.5 Power over Ethernet – PoE IEEE 802.3bu	291
5.3.6 Résumé général d’Ethernet dans l’automobile	292
5.3.7 Open Alliance (<i>One-Pair Ether-Net</i>)	293
5.3.8 Les composants électroniques pour Ethernet automobile	293
5.4 Le déterministe, le temps réel et l’Ethernet automobile	300
5.4.1 Ethernet déterministe et temps réel ou les TSN	300
5.4.2 TSN (<i>time-sensitive networking</i>)	302
5.4.3 Résumé des normes applicables	311
6 Simulations, applications et architectures logicielles automobiles	313
6.1 Simulations logicielles du véhicule autonome et de son environnement	313
6.1.1 La simulation	314
6.1.2 Acquisitions synchronisées à hauts débits des données	315
6.1.3 Solution logicielle pour les mesures et calibrations	316
6.1.4 Solution matérielle pour l’acquisition à haut débit	318
6.1.5 Solution pour l’enregistrement au Gbyte/s	318
6.1.6 Solutions pour le transport des Tbytes enregistrés	320
6.1.7 Les trois aspects des simulations	321
6.1.8 Simulations physiques et environnementales	321
6.1.9 Conclusion de la simulation	328
6.2 Évolutions des architectures électrique/électroniques (E/E) et logicielles des systèmes embarqués	328
6.2.1 Évolutions des architectures E/E	328
6.2.2 Évolution de l’architecture logicielle dans l’automobile	333
6.2.3 Ethernet automotive	339

Table des matières

6.3 Les fonctionnalités	344
6.3.1 Le modèle de communication en automobile	344
6.3.2 XCP on Ethernet	345
6.3.3 DoIP (<i>diagnostics over IP</i>)	347
6.3.4 AVB (<i>audio video bridging</i>) (IEEE 802.1)	351
6.3.5 SOME/IP (<i>scalable service-oriented middleware over IP</i>)	359
6.4 Outils de tests et analyses	372
6.4.1 Outils nécessaires pour ces nouvelles architectures	372
6.4.2 Évolution des outils de développement	373
6.5 Architecture de l'outil face à l'évolution PDU et service	379
Conclusion	397
Références	399
Index	403

Remerciements

Comme d'habitude, il y a beaucoup de personnes à remercier pour leurs gentilles, écoutes, remarques et commentaires constructifs. Donc à toutes celles-là qui se reconnaîtront facilement : un très grand et amical merci !

Et maintenant, quelques remerciements et pensées destinés à des amis plus spécifiques, pour de longues discussions informelles :

- ▶ Dans l'Automobile et le monde industriel : Jean Philippe Dehaene et son équipe (Vector France), Karim El Attachi (Renault), Robert Chen (Faurecia), Denis Bugnot, Muriel Partouche (NXP), Stéphane Blanchon (Rohde & Schwarz – solutions de tests de la couche physique pour l'Ethernet automobile) ;
- ▶ au SIA : Philippe Aumont.

Nous tenons également à remercier deux membres et amis du groupe d'experts « GDPR – Associates » cofondé par Dominique Paret, Pierre Crégo, pour leur aide permanente :

- ▶ Maître Gaëlle Kermorgant – Avocate à la Cour de Paris, pour son aide précieuse et son implication dans les domaines juridiques de l'automobile d'aujourd'hui et de demain et des Données à Caractère Personnel ;
- ▶ M. Jean-Paul Huon, directeur de la société Z#bre, coauteur de l'ouvrage *Secured Connected Objects* (édité en français et en anglais chez ISTE) dont nous avons ponctuellement repris quelques extraits pour construire et assurer la cohérence de celui-ci...
- ▶ ... ainsi que de nombreux amis dont Daniel Rousseau, qui, chacun à leur niveau, nous ont fait passer de très beaux instants... et bonnes humeurs partagées.

Dominique PARET – Hassina REBAINE
Meudon le 9 mai 2019

Les auteurs

Les auteurs sont liés de longue date par les techniques hardwares et softwares des systèmes embarqués, des protocoles, structures et architectures des réseaux de communications dans les domaines de l'automobile et l'aéronautique et toutes leurs variantes, etc.

Dominique Paret

Ingénieur en électronique (Breguet-ESIEE) et détenteur d'un DEA de physique de la faculté Paris VI, fut pendant de très nombreuses années expert technique et responsable du support technique des domaines Contactless/RF (cartes à puces sans contact, RFID, NFC, Geoloc, Zigbee, BT, BLE, UWB, UNB, IEEE 804-xxx, etc.) et d'automobile et réseaux multiplexés auprès d'un grand groupe international de composants électroniques (Philips – NXP). Il était également membre et délégué à l'AFNOR, l'ISO, BNA, CEN pour ces domaines. Conjointement, il enseigna dans une quinzaine d'écoles d'ingénieurs en France et à l'étranger.

Depuis douze ans Dominique Paret est fondateur-CEO de la société de Consultants et Experts Techniques dp-Consulting et co-fondateur de GDPR Associates. Il est également l'auteur de plus de 30 ouvrages techniques en français (Dunod), anglais (ISTE – John Wiley), espagnol (Parainfo), coréen et chinois !

Bref, nul n'est parfait, que de la technique !

Hassina Rebaine

Ingénieure généraliste en électronique est diplômée de l'école nationale polytechnique d'Alger, docteure en électronique sur les systèmes CAD/VLSI et détentrice d'un DEA en traitement de l'information à l'ISTN de l'Université Paris XI.

Spécialisée dans un premier temps dans la conception d'outils de simulation (SAT – Société Anonyme des Télécommunication) pour les circuits ASICs VLSI, puis sur la conception FPGA/ASICs VHDL/Verilog (Europe Technologies).

À ce jour, Hassina est Responsable de la Formation chez Vector sur les solutions pour systèmes embarqués en automobiles. Ses centres d'intérêt sont orientés vers les outils de validation de l'usage des protocoles de communications CAN/LIN/FlexRay/Ethernet. Par ailleurs elle déploie ses compétences en enseignant dans diverses écoles d'ingénieurs et universités.

Avant-propos

Ayant eu une longue carrière de responsable du support technique dans l'industrie du semi-conducteur chez RTC/Philips Semi-conducteurs/NXP, j'ai eu la chance d'être impliqué directement et activement aux naissances, conceptions, développements, comités de normalisations ISO, BNA, Consortium, etc. des CAN (avec Bosch), LIN (avec Motorala), FlexRay (avec BMW et Freescale), CAN FD (avec Bosch – CiA), Ethernet BroadR-Reach (avec BroadCom). De plus, depuis toujours, aimant transmettre le *savoir*, pendant les mêmes périodes j'ai formé professionnellement et scolairement (en BTS, Maîtrise et en dernière année d'écoles d'ingénieurs) de bonnes centaines de personnes aux « Embedded Systems & Networks » et aux « IVN – In Véhicule Network » et parallèlement publié de nombreux ouvrages – dont certains avec Hassina Rebaine responsable du support technique chez Vector – pour laisser des traces écrites !

Pourquoi cet ouvrage ?

Au cours des dernières années nous avons déjà publié aux éditions Dunod de nombreux d'ouvrages techniques génériques très détaillés sur les sujets du *Bus CAN*, de *FlexRay et ses applications* et des *Réseaux multiplexés automobiles*. Dans ce dernier, nous décrivions notamment l'arrivée industrielle imminente du CAN FD, des tsunamis des futurs ADAS et les prémices des premières applications de l'Ethernet dans des véhicules commençant à avoir de petites et légères pseudo-autonomies. Depuis nous avons cherché sur le marché s'il existait une synthèse de bon niveau, claire, simple, précise et aisément accessible concernant le fondement, le pourquoi, le comment, et autres des architectures réseaux de communications dans des véhicules autonomes qui sont l'âme, la colonne vertébrale fonctionnelle d'un véhicule... et nous sommes restés un peu sur notre faim ! Nous n'avons trouvé que soit des ouvrages très simplistes, soit quelques ouvrages très spécialisés et des thèses de troisième cycle sur un pan particulier de ce domaine. À l'exception de quelques articles, ouvrages, revues, etc. cités en bibliographie, un grand désert ! En revanche, depuis environ trois ans, beaucoup, énormément des conférences (chères) génériques de hautes volées, de symposium à humeur marketing (chers) sur tous les domaines et sujets des véhicules autonomes et la/les mobilités, etc. Lorsqu'on voulait vraiment mettre les mains dans le « cambouis » (les vraies architectures hardware et software, les vrais débits numériques, les vrais problèmes... en résumé le quotidien des constructeurs, équipementiers, SME, PME, Start up, etc.) un autre désert !

De plus, après avoir (très !) longuement circulé sur le terrain, nous nous sommes rendu compte d'un manque de support technique en fonction de leurs définitions et applications dans le monde des véhicules intelligents et/ou autonomes ! Cet état intellectuel ne nous ayant pas satisfaits, après de nombreuses discussions avec quelques collègues professionnels et amis nous avons décidé de prendre une fois de plus notre courage à quatre mains pour fouiller ce domaine et, en espérant qu'il couvre une modeste partie de ce vide, opté pour la réalisation de cet ouvrage essentiellement technique conçu autour de ce pan spécifique que sont les « véhicules autonomes (ou presque) » dont l'avènement en grand public est maintenant fortement prévisible, voire imminent.

Comment est construit et comment aborder cet ouvrage

Après avoir une bonne dizaine de fois remis l'intégralité de l'ouvrage sur le métier, afin que sa lecture soit cohérente, agréable et que vous puissiez vous retrouver aisément voici donc l'architecture globale de ces 432 pages, divisée en cinq grands volets.

Tout d'abord, pour bien cibler le débat et avoir une connaissance détaillée du vaste périmètre lié et partie intégrante de la technicité de notre sujet, un **premier grand volet** qui commence par :

- ▶ une **introduction générale** du monde des véhicules autonomes incluant les définitions précises des différents *niveaux d'autonomies* et de connexions/connectivités d'un véhicule automobile, ainsi que des termes utilisés, les marchés, les tendances d'avenir (chapitre 1) ;
- ▶ une description et un état détaillé des nombreux aspects, contextes, contraintes et problèmes réglementaires, juridiques, normatifs, étatiques, moraux, éthiques, etc. dans lesquels doivent être conçus et sont soumis les véhicules autonomes qui seront mis en circulation de 2020 à 2035... et qui, souvent, semblent annexes au premier abord mais dont il est nécessaire de tenir compte techniquement quels que soient les projets de véhicules autonomes envisagés (chapitre 2).

Ensuite vient un **second volet plus technique** que nous avons décomposé en deux grands ensembles illustrés par de très nombreux exemples applicatifs et qui comprend :

- ▶ une revue technique détaillée des très nombreux capteurs qui sont en relations directes et indirectes avec des propriétés d'autonomies d'un véhicule (à infrarouge, à ultra son, caméras, RADARs, LIDARs, centrales inertielles, etc.) (chapitre 3) ;
- ▶ une revue technique détaillée de beaucoup de systèmes ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) possibles et imaginables et surtout comment doivent être réalisées les fusions de leurs données avec l'intégration d'IA (intelligence artificielle) incluse dans le système pour satisfaire les prises de décisions aptes un niveau d'autonomie souhaité incluant les problèmes liés à la mobilité, le confort du voyage et la sécurité de transport (chapitre 3).

Puis est présenté un **troisième volet technique et technologique** concernant :

- ▶ les différentes architectures (hard et soft) possibles de mise en œuvre des différents réseaux selon les zones de motorisation, châssis, confort, info divertissement,

Note importante

ADAS, etc., aptes à satisfaire les véhicules autonomes et/ou connectées tant du côté sécurité de fonctionnement que de celui des cyber-attaques (chapitres 4) ;

- ▶ la montée en puissance de ces réseaux en fonction des débits numériques nécessaires aux fonctions d'automatisations souhaitées en passant d'une façon détaillée par les protocoles CAN FD, FlexRay.

Le **quatrième volet technique et technologique très technique** décrit une description des possibilités de l'Ethernet dans le monde industriel et les caractéristiques spécifiques au marché automobile et les nouvelles structures « backbones » en réseaux Ethernet « switchés » à 100 Mbit/s, 1Gbit/s et multi Giga spécifiques à l'Automobile (chapitre 5).

L'ouvrage se termine enfin, par un **cinquième volet décrivant en détail les logiciels et outils nécessaires** qui prennent de plus en plus une place importante dans les phases de **simulations, de développements, de tests, de calibrations**, etc. de tous les équipements de nos « futurs super PC autonomes à roulettes » (chapitre 6) !

À qui s'adresse ce livre

Cet ouvrage s'adresse aux personnes curieuses de ce nouveau (ou presque) domaine qui couvre de vastes et multiples aspects physiques, technologiques, techniques, industriels, marketing, et bien sûr aux étudiants et aux très nombreux professionnels et nouveaux arrivants de cette branche !

Le niveau technique

Il n'y a pas de niveau technique spécifique d'accueil. Tout le monde est le bienvenu mais, tout au long de l'ouvrage il y a une volonté de satisfaire la curiosité du lecteur et de monter le niveau d'accueil des lecteurs assez rapidement.

La pédagogie

Ayant tous deux exercé simultanément pendant de longues années des activités d'enseignement et de formateurs pour experts de cette branche, le langage et le ton se veulent résolument courants, agréables, tout en restant très précis. Pour imager l'ensemble, de très nombreux exemples d'applications industrielles sont présentés. Par ailleurs, il y a également une volonté pédagogique constante dans cet ouvrage car, à notre sens, écrire pour soi-même ne rime pas à grand-chose. De plus, pour les curieux et/ou courageux, nous avons disposé de très nombreux tableaux de synthèse, de petits secrets et d'anecdotes au fur et à mesure du texte. En un mot cet ouvrage est pour vous, pour le plaisir de comprendre, d'apprendre, de se faire plaisir et de rester « Autonomement vôtre » !

Note importante

Bien sûr, dans cet ouvrage il y aura quelques points communs, identiques, similaires à ceux déjà décrits dans l'un ou l'autre de nos ouvrages précédents. Dans ce cadre-là,

certaines répétitions seront donc obligatoires mais c'est le prix à payer si l'on désire que cet ouvrage puisse représenter une entité sur ce nouveau domaine.

Nous demandons donc que nos lecteurs fidèles et assidus depuis de longues années soient indulgents et ne nous en tiennent pas trop rigueur !

Pour mémoire, Ethernet a été conçu à partir de 1975, l'I2C de 1979, le D2B (ancêtre du MOST) autour de 1981, le CAN de 1983... tout ça a donc déjà autour de 40 ans... C'est le côté *vintage* de notre profession !

Introduction

Avertissement

Cet ouvrage ne se veut pas une encyclopédie conçue autour des véhicules autonomes et/ou connectés ! Son seul but est d'expliquer les types, les choix, les fonctionnements, les propriétés des réseaux et les architectures des réseaux qu'implique la volonté d'aller vers des véhicules autonomes en fonction des très nombreux paramètres extérieurs mis en cause. Une partie de l'ouvrage (principalement les premiers chapitres) détaille donc ces paramètres dans le seul but de pouvoir quantifier concrètement leurs implications techniques, par exemple, en termes de choix de topologies de réseaux utilisables, de débits binaires nécessaires, de temps de latences, de niveaux de sécurité à utiliser, de performances, de conformités à des normes et réglementations, etc.

Tout au long de cet ouvrage plusieurs mondes se croisent, s'entrechoquent, principalement le monde de l'automobile et de ses dérivés et de nombreuses entités du monde de l'électronique, de la mécanique et la communication. Tous ont leurs vocabulaires propres, spécifiques, leurs manières d'être et d'agir, leurs méthodes de conceptions, de marketing et commerciales qui sont généralement très différents... et c'est normal !

Souvent, la manière de penser des métiers de l'électronique est considérée comme linéaire, cartésienne, où on agit phase après phase. Au contraire, dans le monde de l'automobile cela devient beaucoup plus enchevêtré car tout réagit à tout et il faut souvent considérer le tout comme devant être la réalisation que souhaite le client final.

En préambule...

En préambule aux nombreux chapitres de cet ouvrage, commençons à annoncer immédiatement la couleur à l'aide de deux petits points spécifiques.

Il existe sur le sujet des véhicules autonomes et connectés des centaines d'articles sur Internet plus ou moins bien fait échafaudant de grandes et belles envolées théoriques, de marchés variés et gigantesques à venir de toutes espèces, de chiffres commerciaux faramineux et mirobolants, etc. Pour notre part, n'étant pas amateurs de redondances improductives, nous nous sommes uniquement concentrés sur les sujets sur lesquels on trouve beaucoup moins d'articles c'est-à-dire le côté terre-à-terre, quotidien de ce domaine, en traitant concrètement et techniquement du vaste champ des applications et

conceptions de toutes sortes. Ainsi, le but est de vous servir de guide, de ne rien oublier et éviter les chausse-trappes pouvant survenir lors de la conception et la concrétisation de véhicules autonomes et connectés sécurisés. En parler, faire de beaux discours, de belles conférences, de belles démonstrations c'est bien (combien de fois a-t-on vu et entendu cela...) mais réaliser concrètement, physiquement une solution connectée à vues commerciales et réussir à la vendre en quantité, à un prix raisonné et raisonnable c'est encore mieux... sinon autant ne rien faire, sans tapage inconsidéré ! Cet ouvrage décrira des démarches à suivre et à respecter pour que vos projets évitent les écueils habituels et que le passage du monde virtuel au monde réel, basement concret, soit facilité. Nous allons donc vous proposer une voie bâtie sur la prise en compte réelle des mondes normatifs techniques, économiques, ergonomiques, etc. et non de « demain, on rase gratis » !

À ce sujet, fin 2018, Bernard Favre, expert de l'Inria et ancien directeur de la recherche chez Volvo-Renault Trucks et du programme de recherche du Pôle de compétitivité LUTB Transport & Mobility Systems, estimait que « la voiture autonome est une technologie très complexe dans laquelle la mise à contribution de l'intelligence artificielle est probablement de l'ordre de difficulté la plus élevée. Nul autre secteur ne concentre une telle diversité de situations. Actuellement, nous sommes en plein processus d'innovation « en laboratoire ». Il n'y a pas, pour l'heure, de marché vraiment avéré. [...] Le nombre de tests indispensables pour valider les prestations du véhicule autonome explose chez les constructeurs automobiles. Ils associent expérimentations physiques en conditions réelles et simulations numériques... Ayant une certaine expérience sur l'incertitude relative au délai entre ce qu'un constructeur projette et annonce sur de nouvelles technologies, et leur commercialisation effective (pour des raisons diverses : maturité, réglementation, acceptabilité par le marché, coût, performance réelle...) je crains que la voiture autonome ne déroge pas à ce que j'ai constaté dans ma carrière », et, pour terminer, il a estimé que « la voiture autonome sera sur voie privée en 2025. Quant aux voies publiques, la date évoquée est de 2040 [...] ».

Les auteurs de cet ouvrage partagent eux aussi, depuis longtemps, cette vision !

Voilà donc le but avoué de cet ouvrage qui devrait donc rester sur vos tables de chevet jusqu'en 2035 au minimum... et ce sera déjà largement suffisant comme cela ! Beau challenge n'est-ce pas !



Le buzz des véhicules autonomes et connectés

En guise d'introduction générale et de façon à éviter de trop nombreuses confusions souvent existantes sur le terrain et aider à ne plus confondre les termes souvent évoqués sous l'appellation de véhicules autonomes, ce chapitre effectue un bref rappel de vocabulaire.

Sachant que :

- ▶ déjà plus d'un milliard d'automobiles circulent dans le monde (source : Comité des constructeurs français d'automobiles [CCFA]) ;
- ▶ en 2016, à Paris, les automobilistes ont passé plus de 65 heures dans les embouteillages, derrière Moscou (91 heures), ou encore Los Angeles (104 heures) (source : étude INRIX 2016) ;
- ▶ chaque année à travers le monde, 1,3 million de décès sont causés par des accidents de voiture (source : OMS) ;
- ▶ chaque année dans le monde, 2,6 millions de décès sont causés par la pollution de l'air extérieur, liée en partie à la circulation automobile ;
- ▶ en 2030, 2,3 millions de personnes mourraient à la suite d'un accident de la route (source : OMS) ;
- ▶ en 2050, selon les prédictions, les villes concentreraient 70 % de la population mondiale (source : OMS).

Et que la population ne cesse d'augmenter, entraînant :

- ▶ le développement de la circulation automobile ;
- ▶ la congestion des centres-villes ;
- ▶ l'accroissement des émissions de CO₂ ;
- ▶ la recrudescence des accidents de la route.

À court et moyen termes, tous ces sujets soulèvent la question de la future mobilité *urbi et orbi*. De plus, en ce début de XXI^e siècle, l'automobile vit une période de changements technologiques et, cela a été mentionné dans la préface, à terme, les véhicules seront (partiellement) autonomes, connectés, souvent électrifiés, partagés, etc. Leurs usages

évolueront et de nouvelles mobilités, technologies et compétences élargiront le champ des possibles.

Comme annoncé, cet ouvrage technique n'est qu'une modeste pierre à la connaissance de cet énorme édifice. Nous avons donc décidé de restreindre notre champ d'action à une partie spécifique de cet édifice !

1.1 Le pourquoi et les limites de cet ouvrage

Le véhicule autonome et/ou connecté est un sujet très vaste et très complexe autour duquel gravitent de très nombreux concepts. Aussi, présentons en quelques mots les champs que nous avons décidé de balayer dans cet ouvrage. Tout d'abord, nous avons choisi de n'être que technique et technologique, mais chaque domaine évoqué dans son titre possède et implique sa propre philosophie ou ses propres répercussions techniques.

1.1.1 Architectures

Dans un véhicule automobile, il existe de très nombreuses architectures qui s'entrecroquent, se superposent, se mélangent... que nous examinerons par endroits, citons par exemple :

- ▶ **L'architecture fonctionnelle** qui a pour but de gérer la manière dont doit être globalement organisé l'ensemble des fonctions système d'un véhicule et qui ne sera ici que légèrement évoquée.
- ▶ **L'architecture réseau** qui a pour fonction de s'occuper de la manière dont les protocoles et les communications entre les fonctions et les ECU (calculateurs) du véhicule doivent être choisis et structurés... ce dont traitera principalement cet ouvrage, qui sera notre tâche de fond et nous amènera à passer progressivement de systèmes réseaux multiplexés à des architectures Ethernet automobile.
- ▶ **L'architecture hardware/matérielle** qui a pour mission de structurer et définir les choix des ECU (calculateurs), les types d'électroniques, de capteurs, d'actionneurs... dont nous détaillerons également, car directement impliqués dans les différents types de données à transmettre.
- ▶ **L'architecture software/logicielle** qui assure la structure et la gestion des différents modules logiciels du véhicule. En fin d'ouvrage, nous examinerons les architectures SW dédiées à la partie réseau.
- ▶ **L'architecture organique** qui s'occupe de la façon dont sont implémentées les différentes fonctions dans les organes électriques et électroniques du véhicule.
- ▶ **L'architecture topologique** qui gère la manière dont vont être disposés physiquement les différents organes dans le véhicule et qui est fondamentale pour estimer et minimiser les longueurs de réseaux et qui ont de profondes relations avec les débits numériques utilisables.
- ▶ **L'architecture câblage** qui gère la façon dont les réseaux et les faisceaux de câbles sont physiquement découpés et implémentés dans le véhicule, leurs performances, leurs diamètres, leurs poids, etc.

1.1.2 Réseaux de communication

Comme nous le verrons, depuis de nombreuses années, de très nombreux réseaux de communication sont présents dans un véhicule, chacun d'entre eux est adapté à des typologies applicatives particulières.

L'essentiel de cet ouvrage porte sur l'analyse de leurs qualités et performances dans le but de réaliser des applications adaptées, sûres, portées par des véhicules de hauts niveaux d'autonomie et de connectivité. Jusqu'à hier, ces réseaux étaient profondément basés sur des modes de fonctionnements de types « multiplexés » et beaucoup d'entre eux sont en train de muter vers des modes de fonctionnement orientés autour de la philosophie Ethernet adapté à l'automobile. Le but principal de cet ouvrage est de vous guider dans ce passage technologique.

1.2 Terminologies

Il paraît surprenant de commencer dès les premières lignes d'un premier chapitre d'un ouvrage par une rubrique de terminologies. Afin de parler de véhicules autonomes, il sera cependant nécessaire de commencer par définir clairement et décrire les niveaux (*levels*) d'autonomie de ces derniers, afin de retirer de nombreuses équivoques et de bien comprendre, sans faire de l'à-peu-près journalistique, typique des médias généralistes !

1.2.1 Véhicules autonomes et/ou connectés

Établissons tout de suite le profond distinguo important entre véhicules « autonomes » et véhicules « connectés » qui sont deux termes représentant fondamentalement deux choses totalement différentes ! À ne pas confondre !

- ▶ Un (vrai) véhicule autonome doit être capable de circuler par ses propres moyens, seul, sans l'aide quelconque d'un conducteur.
- ▶ Un véhicule connecté est un véhicule qui est relié à d'autres systèmes grâce à des systèmes de télécommunication, de téléphonie, etc.
- ▶ Un véhicule « autonome » n'est pas spécialement « connecté » et *vice versa*.

En revanche, il est vrai qu'il est fréquent qu'un véhicule autonome ait souvent besoin d'être connecté pour réussir à effectuer et remplir d'autres fonctions et d'autres tâches (par exemple : montées ou descentes d'informations concernant la route sur laquelle on circule, etc.) ! D'où la fréquente confusion.

Véhicules autonomes

Les terminologies « autonomes » et « véhicules autonomes » sont bien trop larges et indéfinies. Dans notre domaine, afin de retirer à nouveau de nombreuses confusions, dans cet ouvrage décrivant les us et coutumes de la profession automobile s'intéressant aux véhicules allant de ceux d'hier à ceux de demain (ou d'après-demain), nous utiliserons des niveaux précis pour définir ces autonomies. Nous y reviendrons plus en détail dans quelques lignes.

Véhicules connectés

Parler de véhicules connectés est très bien... mais connectés à quoi, dans quel but et comment ? La figure 1.1 représente schématiquement quelques liaisons et connexions possibles. Nous y reviendrons plus en détail au chapitre 4.

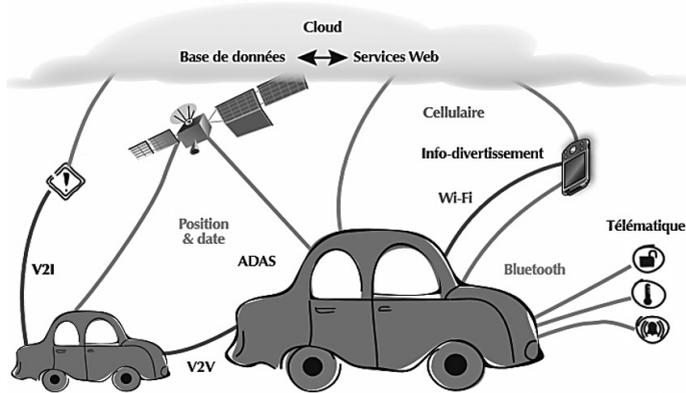


Figure 1.1 – Exemple de liaisons et connexions d'un véhicule connecté

Pour conclure ces quelques mots d'introduction générale, la figure 1.2 présente une solution de véhicule ayant des fonctionnalités permettant une certaine autonomie et disposant d'autre part des fonctions de connexion.

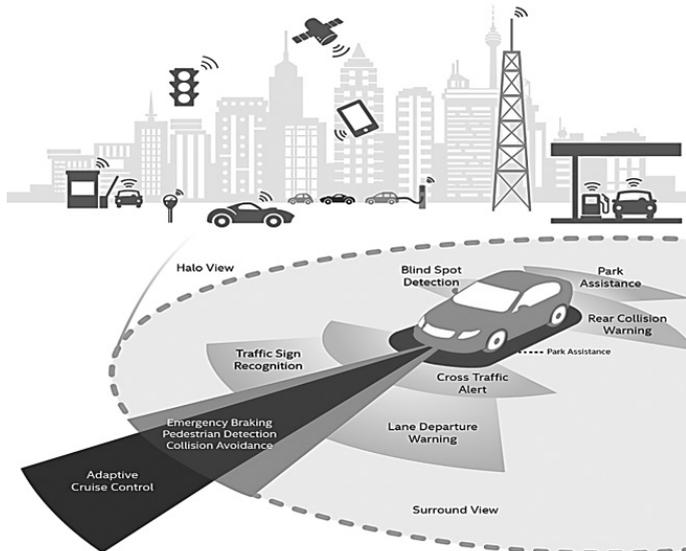


Figure 1.2 – Exemple de fonctions aidant à l'autonomie d'un véhicule

1.2.2 Termes et vocabulaire de la conduite autonome

Les évolutions du secteur automobile se traduisent jusque dans le dictionnaire ! C'est ainsi qu'une certaine terminologie (jusqu'ici largement utilisée en anglais) liée aux véhicules autonomes a été publiée au *Journal officiel – Vocabulaire de l'automobile* (liste de termes, expressions et définitions adoptés au *Journal officiel* NOR:CTNR1807401K ELI).

Termes et définitions

Parmi eux, des termes en référence aux fameux « ADAS » (systèmes avancés d'aide à la conduite) font leur entrée dans le dictionnaire, tout comme « taxi sans chauffeur », « géonavigateur participatif », etc. Prenons quelques autres exemples :

- ▶ Assurance à la conduite : « contrat d'assurance d'un véhicule dont la prime est calculée en fonction du comportement au volant des conducteurs et du mode d'utilisation du véhicule ». Notons que le comportement des conducteurs et le mode d'utilisation du véhicule sont appréciés en fonction des données transmises à la compagnie d'assurances par des capteurs embarqués.
 - ▷ Équivalent étranger : *pay-how-you-drive insurance, PHYD insurance*.
- ▶ Caméra-témoin de circulation : « caméra embarquée qui enregistre ce qui se passe en avant du véhicule ». Notons que souvent seules les dernières minutes de l'enregistrement sont conservées en mémoire ; elles servent, par exemple, à documenter les circonstances d'un accident.
 - ▷ Équivalent étranger : *dashboard camera, dashcam, dash camera, scene recorder*.
- ▶ Conduite autonome : « mode de conduite automatique d'un véhicule, qui ne requiert pas l'intervention de ses utilisateurs ; par extension, système qui permet ce mode de conduite. »
 - ▷ Équivalent étranger : *automated driving, autonomous driving*.
- ▶ Conduite autonome en embouteillage : « système qui permet à un véhicule de se déplacer de façon automatique dans les embouteillages ». Notons que les conduites autonomes en embouteillage les plus simples permettent seulement de suivre le véhicule précédent dans une même file ; les plus élaborées permettent également le changement de file.
 - ▷ Équivalent étranger : *traffic jam assist, traffic jam chauffeur, traffic jam pilot*.
- ▶ Contrôle de vigilance : « dispositif embarqué qui, au moyen de capteurs, analyse le comportement du conducteur afin de détecter une éventuelle baisse de sa vigilance et de l'en avertir ». Forme développée : système de contrôle de vigilance.
 - ▷ Les capteurs utilisés peuvent être des caméras qui analysent le mouvement des yeux et de la tête du conducteur. Il existe également des systèmes d'analyse de la rotation du volant qui permettent d'apprécier l'état de vigilance du conducteur.
 - ▷ *L'attention assist* est un nom de marque déposée. Il ne doit pas être utilisé et il se dit « oculométrie ».
 - ▷ Équivalent étranger : *driver alert, driver alert system, driver monitoring, driver monitoring system*.

Pour information, la figure 1.3 donne une table d'équivalence entre quelques autres termes anglais et français.

Termes étrangers	Équivalents français
<i>Driverless cab, autonomous taxi, driverless tax</i>	Taxi sans chauffeur, taxi autonome
<i>Mirroring, screen mirroring</i>	Duplication d'écran

Figure 1.3 – Autres exemples d'équivalents français

Passons maintenant aux définitions des niveaux d'autonomie.

Les niveaux (*levels*) d'autonomie

Dans le monde automobile, la conduite autonome suit industriellement une progression technologique échelonnée, définie selon une classification, elle-même établie selon plusieurs niveaux d'autonomie, le niveau zéro correspondant à un véhicule 100 % manuel et le niveau plus élevé (4 ou 5 selon les standards ci-après) à un véhicule complètement autonome dans des cas d'usages définis pour lequel aucun conducteur n'est nécessaire.

Cas d'usages

Attention

Au jour où nous écrivons (courant 2019), ces différents niveaux d'autonomie correspondent uniquement à des applications dans des environnements et des cas d'usages bien définis.

Les trois cas d'usages définis et leurs spécificités particulières sont :

- ▶ Pour les véhicules particuliers :
 - ▷ en embouteillage, sans changement de voie ;
 - ▷ sur autoroute, sans changement de voie ;
 - ▷ parking en mode autonome.
- ▶ Pour les véhicules industriels :
 - ▷ régulation de vitesse par l'infrastructure ;
 - ▷ *platooning* (circulation en « peloton ») ;
 - ▷ benne à ordures ;
 - ▷ pulvérisateur agricole.
- ▶ Pour le transport public :
 - ▷ flotte en libre-service sur site privé ;
 - ▷ navette sur site protégé.

Remarque

Tous ces cas d'usage sont très restrictifs. En aucun cas, de ces trois cas d'usage n'est évoquée la circulation de véhicules autonomes totalement « libre » ou « ouverte » !

Revenons maintenant aux niveaux d'autonomie et leur classification.