

Table des matières

| | |
|---|----|
| Avant-propos | 1 |
| Léo MENDIBOURE | |
| | |
| Partie 1. Introduction aux systèmes de transport intelligents coopératifs | 3 |
| | |
| Chapitre 1. Interactions locales pour les ITS coopératifs : opportunités et contraintes | 5 |
| Jean-Marie BONNIN et Christophe COUTURIER | |
| 1.1. Introduction | 5 |
| 1.2. Interactions locales éphémères : concept et exemples | 6 |
| 1.2.1. Exemples de services utilisant les interactions locales éphémères | 6 |
| 1.2.2. Caractéristiques des interactions locales éphémères | 8 |
| 1.2.3. Avantages des interactions locales éphémères | 10 |
| 1.2.4. Adéquation des technologies de communication à ce type d'interaction | 11 |
| 1.3. Les interactions locales au service des ITS coopératifs | 14 |
| 1.3.1. Services ITS coopératifs | 15 |
| 1.3.2. Intérêt des interactions locales éphémères pour les ITS coopératifs | 16 |
| 1.3.3. Technologies de communication V2X | 17 |
| 1.3.4. Propriétés des services C-ITS construits sur des interactions locales | 19 |
| 1.3.5. Limites et contraintes de la mise en œuvre de services construits sur des interactions locales | 23 |

| | |
|---|----|
| 1.4. Rôle de l'infrastructure dans les services ITS coopératifs | 28 |
| 1.4.1. Infrastructures dédiées aux ITS coopératifs. | 28 |
| 1.4.2. Vers une infrastructure active. | 30 |
| 1.5. Conclusion | 30 |
| 1.6. Bibliographie. | 32 |

Chapitre 2. Évolution des cas d'usage pour les systèmes de transport intelligents 35

Sassi MAALOU, Hasnaa ANISS, Marion BERBINEAU et Léo MENDIBOURE

| | |
|--|----|
| 2.1. Introduction. | 35 |
| 2.2. Les technologies de communication véhiculaire | 36 |
| 2.2.1. La technologie ITS-G5/IEEE 802.11p. | 37 |
| 2.2.2. Le standard 3GPP : C-V2X | 38 |
| 2.2.3. Déploiement de technologies ITS | 39 |
| 2.3. Évolution des cas d'usage | 40 |
| 2.3.1. Classification des cas d'usage. | 40 |
| 2.3.2. Performances requises | 43 |
| 2.3.3. Exemple de cas d'usage | 44 |
| 2.4. Challenges et futurs services V2X | 51 |
| 2.5. Conclusion | 52 |
| 2.6. Bibliographie. | 52 |

Partie 2. Optimisation de la transmission de données pour les systèmes de transport intelligents coopératifs 55

Chapitre 3. Vers des systèmes de transport intelligents coopératifs efficaces énergétiquement. 57

Mohamed BENZAGOUTA, Ramzi BOUTAHALA, Secil ERCAN, Sassi MAALOU, Hasnaa ANISS, Léo MENDIBOURE, Marwane AYAIDA et Hacène FOUCAL

| | |
|--|----|
| 3.1. Introduction. | 57 |
| 3.2. Contexte. | 58 |
| 3.2.1. Services C-ITS | 59 |
| 3.2.2. Normes de communication | 60 |
| 3.3. Évaluation expérimentale de la performance du système de diffusion des messages C-ITS | 61 |
| 3.3.1. Projet C-Roads France et application COOPITS | 61 |
| 3.3.2. Environnement d'expérimentation et mesures | 62 |
| 3.3.3. Analyse des résultats | 62 |

| | |
|--|----|
| 3.4. Discussion sur les principales causes | 70 |
| 3.4.1. Absence d'adaptation aux conditions réelles | 70 |
| 3.4.2. Duplication d'informations non évolutives | 71 |
| 3.4.3. Diffusion des informations dans des zones géographiques larges | 71 |
| 3.4.4. Niveau de sécurité élevé par rapport aux risques encourus. | 71 |
| 3.5. Recommandations et pistes de recherche | 74 |
| 3.5.1. Différentiation par conditions de trafic | 74 |
| 3.5.2. Diffusion intelligente de messages constants. | 75 |
| 3.5.3. Définition intelligente des zones de diffusion des messages. | 75 |
| 3.5.4. Optimisation du niveau de sécurité. | 75 |
| 3.6. Conclusion | 76 |
| 3.7. Remerciements. | 76 |
| 3.8. Bibliographie. | 77 |

Chapitre 4. Hybridation efficace des technologies

de communication C-ITS 79

Badreddine Yacine YACHEUR, Toufik AHMED et Mohamed MOSBAH

| | |
|---|----|
| 4.1. Introduction. | 79 |
| 4.2. Travaux connexes | 81 |
| 4.3. Définition d'une architecture de réseau hétérogène et conception d'une pile de protocoles | 83 |
| 4.4. L'apprentissage par renforcement pour la sélection du mode de communication | 85 |
| 4.4.1. Apprentissage par renforcement profond | 86 |
| 4.4.2. Correspondance avec les éléments clés de l'apprentissage par renforcement | 86 |
| 4.5. Évaluation de la performance | 91 |
| 4.5.1. Cadre et scénario de simulation. | 91 |
| 4.5.2. Paramètres de l'algorithme DDQL. | 93 |
| 4.5.3. Résultats des simulations | 94 |
| 4.6. Conclusion | 98 |
| 4.7. Bibliographie. | 99 |

Chapitre 5. Utilisation de la technologie SDN pour le contrôle des C-ITS : vers des approches décentralisées 101

Romain DULOUT, Lyliya ALOUACHE, Tidiane SYLLA, Léo MENDIBOURE,
Hasnaa ANISS, Virginie DENIAU et Yannis POUSSET

| | |
|----------------------------|-----|
| 5.1. Introduction. | 101 |
| 5.2. Contexte. | 103 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.1. Les architectures C-ITS contrôlées par SDN (SDVN) | 103 |
| 5.2.2. La technologie <i>blockchain</i> | 105 |
| 5.3. Application de la <i>blockchain</i> aux architectures SDVN | 107 |
| 5.4. Optimisation de la technologie <i>blockchain</i> pour les architectures SDVN | 110 |
| 5.4.1. De nouvelles architectures. | 111 |
| 5.4.2. De nouveaux mécanismes | 111 |
| 5.5. Pistes de futures recherches | 112 |
| 5.5.1. Positionnement optimal des nœuds <i>blockchain</i> | 113 |
| 5.5.2. Réduction de la consommation énergétique | 113 |
| 5.5.3. Intégration entre IA et <i>blockchain</i> | 114 |
| 5.5.4. Une intégration plus complète entre SDN et <i>blockchain</i> | 114 |
| 5.6. Conclusion | 115 |
| 5.7. Bibliographie. | 115 |

Chapitre 6. Application du *Network Slicing* dans les systèmes C-ITS 119

Abdenour RACHEDI, Toufik AHMED et Mohamed MOSBAH

| | |
|--|-----|
| 6.1. Introduction. | 119 |
| 6.2. Communications <i>Vehicle-to-Everything</i> (V2X) | 120 |
| 6.3. Présentation des technologies V2X. | 122 |
| 6.3.1. ITS-G5 | 123 |
| 6.3.2. LTE-V2X. | 126 |
| 6.3.3. 5G-V2X | 127 |
| 6.4. <i>Network Slicing</i> pour la 5G-V2X | 129 |
| 6.4.1. <i>Network Slicing</i> pour le C-V2X | 131 |
| 6.4.2. <i>Network Slicing</i> pour l'ITS-G5 | 133 |
| 6.5. Conclusion | 143 |
| 6.6. Bibliographie. | 144 |

Partie 3. Nouvelles approches de traitement de données au service des systèmes de transport intelligents coopératifs . . . 147

Chapitre 7. Une nouvelle approche *Cloud* pour les véhicules connectés 149

Geoffrey WILHELM, Marwane AYADA et Hacène FOUCAL

| | |
|---|-----|
| 7.1. Introduction. | 149 |
| 7.2. État de l'art | 150 |
| 7.2.1. Standards ETSI pour les STI-C. | 150 |

| | |
|---|-----|
| 7.2.2. <i>Vehicular Cloud Computing</i> | 152 |
| 7.2.3. <i>Information-Centric Networking</i> | 153 |
| 7.3. Approche GeoVCDN | 155 |
| 7.3.1. Une architecture <i>Context Cloud</i> centralisée. | 155 |
| 7.3.2. Protocole de routage géographique ICN | 159 |
| 7.3.3. Discussion | 161 |
| 7.4. Modèle analytique. | 166 |
| 7.4.1. Description du modèle | 166 |
| 7.4.2. Modélisation du réseau. | 167 |
| 7.4.3. Modélisation de l'environnement de communication | 170 |
| 7.4.4. Modélisation de la dissémination des messages | 171 |
| 7.4.5. Approches | 179 |
| 7.4.6. Discussion | 185 |
| 7.5. Évaluation. | 185 |
| 7.5.1. Description du simulateur | 186 |
| 7.5.2. Résultats de la simulation pour la charge réseau. | 188 |
| 7.6. Résultats de la simulation relatifs à l'utilité des données | 193 |
| 7.6.1. Résultats de la simulation relatifs à la validité des données | 193 |
| 7.6.2. Résultats de la simulation relatifs à la fraîcheur des données | 194 |
| 7.6.3. Discussion sur la simulation. | 198 |
| 7.7. Étude d'un cas d'usage | 199 |
| 7.7.1. Scénario | 200 |
| 7.7.2. Discussion | 202 |
| 7.8. Conclusion | 203 |
| 7.9. Remerciements. | 204 |
| 7.10. Bibliographie | 204 |

Chapitre 8. Placement optimal des serveurs *Edge* dans les systèmes C-ITS

209

Sabri KHAMARI, Toufik AHMED et Mohamed MOSBAH

| | |
|---|-----|
| 8.1. Introduction. | 209 |
| 8.2. Contexte. | 211 |
| 8.2.1. Applications véhiculaires | 211 |
| 8.2.2. <i>Multi-Access Edge Computing</i> (MEC) | 211 |
| 8.2.3. Déploiement des systèmes MEC | 212 |
| 8.3. État de l'art | 212 |
| 8.4. OptPlacement : placement efficace des serveurs <i>Edge</i> | 214 |
| 8.4.1. Modélisation du système. | 215 |
| 8.4.2. Méthodologie et simulation | 218 |
| 8.4.3. Évaluation des performances | 224 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 8.5. Conclusion | 231 |
| 8.6. Bibliographie | 232 |

Chapitre 9. L'estimation du risque, une nécessité pour le véhicule automatisé connecté 235

Dominique GRUYER, Sio-Song IENG, Sébastien GLASER, Sébastien DEMMEL, Charles TATKEU et Sabine BELMEKCI

| | |
|--|-----|
| 9.1. Contexte et objectifs | 235 |
| 9.2. Estimation du risque local à l'égo-véhicule : quelques métriques existantes | 239 |
| 9.3. Développement de stratégies de communication pour étendre le risque : CBL et CBLG | 246 |
| 9.4. Calcul des risques coopératifs : risque local étendu, risque global | 249 |
| 9.5. Impact du risque global et anticipation des situations à risque | 250 |
| 9.6. Discussion | 256 |
| 9.7. Conclusion | 261 |
| 9.8. Bibliographie | 263 |

Chapitre 10. Résilience de la perception collective dans les C-ITS : apprentissage profond par renforcement multi-agent 267

Imed GHNAYA, Hasnaa ANISS, Marion BERBINEAU, Mohamed MOSBAH et Toufik AHMED

| | |
|--|-----|
| 10.1. Introduction | 267 |
| 10.1.1. Contexte et problématique | 268 |
| 10.1.2. Motivation et contribution | 269 |
| 10.2. État de l'art | 271 |
| 10.2.1. Normalisation de la perception collective par l'ETSI | 272 |
| 10.2.2. Techniques de sélection et d'échange des données de perception | 273 |
| 10.3. Modélisation mathématique de l'environnement de conduite coopérative | 274 |
| 10.3.1. Échange de données de sensibilisation et de perception | 274 |
| 10.3.2. Utilité des données de perception dans l'environnement de conduite | 277 |
| 10.4. Apprentissage multi-agent avec DRL pour la sélection et l'échange de données de perception | 278 |
| 10.4.1. Conception du système | 278 |
| 10.4.2. Algorithme d'apprentissage | 279 |

| | |
|--|-----|
| 10.5. Simulations, résultats et évaluations | 281 |
| 10.5.1. Outils, scénarios et paramètres de simulation. | 282 |
| 10.5.2. Résultats et évaluations. | 282 |
| 10.6. Conclusion | 286 |
| 10.7. Bibliographie | 286 |

Partie 4. Sécurisation des systèmes de transport intelligents coopératifs 289

Chapitre 11. Les protocoles délimiteurs de distance. 291

David GÉRAULT, Pascal LAFOURCADE et Léo ROBERT

| | |
|--|-----|
| 11.1. Introduction | 292 |
| 11.2. Relations entre les menaces pour les protocoles DB | 294 |
| 11.2.1. Modèles de menaces | 295 |
| 11.2.2. Relation entre les différents modèles de menaces | 298 |
| 11.3. Vue d'ensemble des protocoles existants | 300 |
| 11.3.1. Amélioration des attaques | 301 |
| 11.3.2. Comparaison des protocoles DB | 303 |
| 11.4. Bibliographie | 305 |

Chapitre 12. Vers une sécurité et une protection de la vie privée sensibles au contexte pour le véhicule automatisé et connecté 311

Tidiane SYLLA, Mohamed Aymen CHALOUF, Léo MENDIBOURE
et Francine KRIEF

| | |
|---|-----|
| 12.1. Introduction | 311 |
| 12.2. Sécurité, protection de la vie privée et confiance des applications du véhicule autonome et connecté | 313 |
| 12.2.1. Principales applications du véhicule autonome et connecté . . . | 313 |
| 12.2.2. Services de sécurité, protection de la vie privée et confiance pour le véhicule autonome et connecté | 317 |
| 12.3. Architecture de sécurité et de protection de la vie privée | 319 |
| 12.3.1. Sécurité et protection de la vie privée sensibles au contexte . . . | 319 |
| 12.3.2. Lacunes des solutions existantes | 321 |
| 12.3.3. Solution proposée | 322 |
| 12.4. Sélection auto-adaptative des technologies d'accès réseau | 328 |
| 12.4.1. Infrastructure <i>Edge Computing</i> | 330 |
| 12.4.2. Orchestration et placement des services | 333 |

| | |
|---|-----|
| 12.5. Principaux travaux de recherche à mener | 335 |
| 12.6. Conclusion | 336 |
| 12.7. Bibliographie | 336 |

Chapitre 13. Les communications sans fil véhiculaires : risques et détection d’attaques 339

Jonathan VILLAIN, Virginie DENIAU et Christophe GRANSART

| | |
|---|-----|
| 13.1. Introduction | 339 |
| 13.2. Caractéristiques générales des communications sans fil pour les véhicules connectés | 340 |
| 13.2.1. Les enjeux liés au véhicule connecté. | 341 |
| 13.2.2. Les communications V2V | 342 |
| 13.2.3. Les communications V2I. | 342 |
| 13.3. Caractéristiques des communications sans fil | 343 |
| 13.3.1. Principe des communications sans fil | 343 |
| 13.3.2. Communications longue portée | 344 |
| 13.3.3. Communications courte portée | 344 |
| 13.3.4. Arrivée de la 5G | 345 |
| 13.4. Susceptibilités des communications et risques encourus | 346 |
| 13.4.1. Principe des attaques visant les couches 1 et 2 des systèmes de communication | 346 |
| 13.4.2. Attaque Sybil. | 347 |
| 13.4.3. Attaque par trame de désauthentification | 347 |
| 13.4.4. Attaque par trou noir | 348 |
| 13.4.5. Attaque par brouillage | 348 |
| 13.4.6. Attaque par <i>flooding</i> | 349 |
| 13.4.7. Risques et indicateurs de performance | 350 |
| 13.5. Détection d’attaques | 351 |
| 13.5.1. Nécessité d’un système de détection | 351 |
| 13.5.2. Méthodes de détection | 352 |
| 13.5.3. IA et détection | 354 |
| 13.6. Conclusion | 357 |
| 13.7. Bibliographie | 358 |

Liste des auteurs 361

Index 365