

IC2

Systemes automatisés

# Systemes de transport intelligents

*modélisation, information et contrôle*

*sous la direction de*  
Saïd Mammar

*Hermès*

*Lavoisier*

---

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	19
Saïd MAMMAR	
<b>PREMIÈRE PARTIE. LA MODÉLISATION DU TRAFIC ROUTIER</b> . . . . .	25
<b>Chapitre 1. La modélisation macroscopique du trafic</b> . . . . .	27
Jean-Patrick LEBACQUE	
1.1. Introduction . . . . .	27
1.2. Les variables macroscopiques . . . . .	28
1.3. Les principales familles de modèles . . . . .	30
1.3.1. Les faits expérimentaux fondamentaux . . . . .	30
1.3.2. Equations fondamentales . . . . .	31
1.3.3. Modèles du premier ordre ou modèles LWR . . . . .	32
1.3.4. Modèles du second ordre . . . . .	33
1.3.5. Modèles cinétiques . . . . .	36
1.3.6. Modèles bidimensionnels . . . . .	37
1.4. Le modèle LWR . . . . .	38
1.4.1. Propriétés élémentaires du modèle LWR . . . . .	38
1.4.1.1. La notion de caractéristique . . . . .	38
1.4.1.2. Ondes . . . . .	39
1.4.2. Conditions aux limites, schéma de Godunov . . . . .	41
1.4.2.1. Offre et demande locales de trafic . . . . .	41
1.4.2.2. Conditions aux limites . . . . .	43
1.4.2.3. Le schéma de Godunov . . . . .	44
1.5. Modélisation des intersections . . . . .	46
1.5.1. Intersections ponctuelles . . . . .	46
1.5.1.1. Intersections ponctuelles avec état interne . . . . .	47
1.5.1.2. Intersections ponctuelles sans état interne . . . . .	49
1.5.2. Modèles discrétisés . . . . .	52

1.6. Extensions, modèles connexes . . . . .	54
1.6.1. Le modèle LWR à accélération bornée . . . . .	54
1.6.2. Discrétisation du modèle de Payne-Whitham, le modèle Metacor . . . . .	55
1.6.3. Discrétisation des modèles de la famille EARZ . . . . .	57
1.6.4. Modèles particuliers . . . . .	58
1.7. Conclusion . . . . .	59
1.8. Bibliographie . . . . .	59

## **Chapitre 2. La modélisation microscopique du trafic . . . . .** 65

Saïd MAMMAR et Salim MAMMAR

2.1. Introduction . . . . .	65
2.2. Les enjeux et les composantes des modèles microscopiques . . . . .	66
2.2.1. Les enjeux des modèles microscopiques . . . . .	66
2.2.2. Les composantes longitudinales . . . . .	66
2.2.3. Les composantes latérales . . . . .	67
2.3. Variables microscopiques . . . . .	68
2.4. Le choix d'une vitesse désirée en conduite libre . . . . .	69
2.5. Les modèles d'interdistance de sécurité . . . . .	70
2.5.1. La règle de Pipes . . . . .	71
2.5.2. Les modèles de poursuite à anticollision . . . . .	72
2.5.3. La législation actuelle . . . . .	72
2.6. Les modèles de poursuite à <i>stimuli</i> . . . . .	73
2.6.1. Les premiers modèles de poursuite . . . . .	73
2.6.2. Les modèles à vitesse optimale . . . . .	75
2.6.3. Modèle de conducteur intelligent . . . . .	76
2.7. Les modèles psycho-physiques . . . . .	77
2.8. Les modèles neuro-flous . . . . .	79
2.9. Les modèles discrets et à automates cellulaires . . . . .	80
2.9.1. La discrétisation temporelle . . . . .	80
2.9.2. Les modèles à automates cellulaires . . . . .	81
2.9.3. Les modèles multiagents . . . . .	83
2.10. Relation micro-macro . . . . .	83
2.11. Le calibrage des modèles . . . . .	84
2.12. Les modèles actuels et leurs limitations . . . . .	85
2.12.1. VISSIM ( <i>Verkher in Städten-simulation</i> ) . . . . .	85
2.12.2. PARAMICS ( <i>Parallel Microscopic Simulation</i> ) . . . . .	86
2.12.3. AIMSUN . . . . .	86
2.12.4. CORSIM-TSIS . . . . .	86
2.12.5. MITSIM-MITSIMLAB . . . . .	87
2.12.6. INTEGRATION . . . . .	87
2.13. Conclusion . . . . .	87
2.14. Bibliographie . . . . .	87

<b>Chapitre 3. Les approches d'hybridation</b> . . . . .	93
Salim MAMMAR	
3.1. Introduction . . . . .	93
3.2. Couplage d'un modèle macroscopique et d'une loi de poursuite . . . . .	95
3.2.1. Modèle hybride homogène . . . . .	95
3.2.2. Modèles hybrides hétérogènes . . . . .	97
3.2.2.1. Modèle hybride couplé SIMRES-SITRA-B+ . . . . .	97
3.2.2.2. Modèle hybride couplé Payne-IDM . . . . .	98
3.2.2.3. Modèle hybride couplé LWR-OVM . . . . .	99
3.3. Modèle hybride fondé sur les systèmes multiagents . . . . .	101
3.3.1. Modèle hybride associant SSMT et ARCHISIM . . . . .	101
3.3.2. Modèle hybride multiagent et modèle de Payne . . . . .	102
3.3.3. Modèles hybrides fondés sur des approches mésoscopiques . . . . .	103
3.3.3.1. Modèle associant PARAMICS et DYNASMART . . . . .	104
3.3.3.2. Modèle associant METROPOLIS et MITSIMLab . . . . .	104
3.3.4. Le modèle Transmodeler . . . . .	105
3.4. Modèle hybride couplé ARZ-OVM . . . . .	105
3.5. Indicateurs pour la validation d'un modèle hybride . . . . .	107
3.6. Etude et validation en simulation d'un schéma de couplage . . . . .	108
3.6.1. Etude en régime hors équilibre . . . . .	109
3.6.2. Etude de l'influence de la discrétisation . . . . .	110
3.7. Conclusion . . . . .	111
3.8. Bibliographie . . . . .	112
<b>Chapitre 4. Le recueil de données du trafic et le calibrage des modèles de simulation</b> . . . . .	115
Habib HAJ-SALEM	
4.1. Le recueil de données du trafic . . . . .	115
4.2. Capteurs pneumatiques . . . . .	116
4.3. Les boucles électromagnétiques . . . . .	117
4.4. Les capteurs à ultrasons . . . . .	119
4.5. Les radars à effet Doppler-Fizeau . . . . .	120
4.6. Les capteurs vidéo . . . . .	120
4.7. Aperçu du problème des données manquantes . . . . .	123
4.8. Calibrage des modèles de trafic . . . . .	125
4.8.1. Formulation du problème du calibrage . . . . .	125
4.8.1.1. Algorithme de Box . . . . .	127
4.8.1.2. Algorithme fondé sur le gradient : RPROP . . . . .	127
4.9. Calibrage de METACOR sur site réel . . . . .	128
4.10. Conclusion . . . . .	132
4.11. Bibliographie . . . . .	133

**DEUXIÈME PARTIE. INFORMATION ET GUIDAGE DES USAGERS . . . . . 135**

**Chapitre 5. La détection automatique des incidents . . . . . 137**

Simon COHEN

- 5.1. Introduction . . . . . 137
- 5.2. Une panoplie technologique étayée . . . . . 138
- 5.3. Les méthodes conventionnelles et leurs extensions . . . . . 138
  - 5.3.1. Principes de la DAI . . . . . 138
  - 5.3.2. Une classification des algorithmes de détection . . . . . 140
    - 5.3.2.1. Notations . . . . . 140
    - 5.3.2.2. Les algorithmes utilisant les données macroscopiques . . . . . 141
    - 5.3.2.3. L'utilisation des données microscopiques . . . . . 144
    - 5.3.2.4. L'utilisation des réseaux de neurones . . . . . 144
- 5.4. La détection par traitement d'images vidéo . . . . . 145
- 5.5. La détection par communication entre la route et le véhicule . . . . . 147
- 5.6. Indicateurs de performance . . . . . 148
- 5.7. Le calibrage des algorithmes . . . . . 149
  - 5.7.1. Les données de calibrage . . . . . 149
  - 5.7.2. Le calibrage optimal . . . . . 150
    - 5.7.2.1. Exemple de calibrage . . . . . 152
- 5.8. Evaluation et performances des systèmes de DAI . . . . . 153
  - 5.8.1. DAI par capteurs ponctuels . . . . . 153
  - 5.8.2. DAI par réseaux de neurones . . . . . 153
  - 5.8.3. DAI par traitement d'images vidéo . . . . . 154
  - 5.8.4. Fusion des données multisources . . . . . 154
  - 5.8.5. DAI par communication entre la route et le véhicule . . . . . 155
- 5.9. Une sensibilité à de nombreux facteurs . . . . . 155
- 5.10. Quelles perspectives pour la DAI? . . . . . 156
- 5.11. Bibliographie . . . . . 157

**Chapitre 6. Technologies de la navigation et des télécommunications . . . . . 159**

Jacques EHRLICH et Yves ROBIN-JOUAN

- 6.1. Introduction . . . . . 159
- 6.2. Le mécanisme de l'accident et le rôle des aides à la conduite . . . . . 161
  - 6.2.1. Le rôle de l'erreur humaine dans l'accident . . . . . 161
    - 6.2.1.1. L'analyse séquentielle de l'accident . . . . . 161
    - 6.2.1.2. Le mécanisme de la défaillance . . . . . 161
    - 6.2.1.3. Le rôle des aides à la conduite . . . . . 161
    - 6.2.1.4. Typologie des situations concernées . . . . . 162
    - 6.2.1.5. Un exemple : le freinage d'urgence . . . . . 162
  - 6.2.2. Les « briques technologiques » sous-jacentes . . . . . 162
    - 6.2.2.1. La perception de l'environnement proche . . . . . 163
    - 6.2.2.2. La localisation . . . . . 163

6.2.2.3. La perception de l'environnement lointain . . . . .	163
6.2.2.4. Le contrôle commande . . . . .	164
6.3. Navigation appliquée aux mobiles des transports intelligents . . . . .	164
6.3.1. Classification et organisation des systèmes de localisation . . . . .	164
6.3.2. Localisation à base d'infrastructure . . . . .	166
6.3.3. Classe de la navigation par satellite et limitations . . . . .	168
6.3.4. Amélioration des algorithmes de navigation satellitaire . . . . .	171
6.3.5. Systèmes de navigation inertiels . . . . .	173
6.3.6. Résultats récents en matière de fusion . . . . .	173
6.3.7. Interfaces d'exploitation . . . . .	174
6.4. Télécommunications pour les mobiles . . . . .	175
6.4.1. Règles de dimensionnement des transmissions sans fil . . . . .	175
6.4.1.1. Espace libre . . . . .	175
6.4.1.2. Autres conditions de propagation . . . . .	177
6.4.1.3. Comparaison quantifiée des solutions RF . . . . .	178
6.4.1.4. Radio logicielle . . . . .	179
6.4.2. Notions d'architecture pour la mise en réseau . . . . .	179
6.4.2.1. Modèle de référence des réseaux . . . . .	179
6.4.2.2. Typologie actuelle de la desserte radio . . . . .	180
6.4.3. Interconnectivité par l'ouverture aux standards et le multivecteur . . . . .	184
6.4.4. Orientations pratiques pour les STI . . . . .	185
6.5. Deux applications : le LAVIA et l'alerte . . . . .	186
6.5.1. Le limiteur s'adaptant à la vitesse autorisée (LAVIA) . . . . .	186
6.5.1.1. Une aide pour un meilleur respect des vitesses autorisées . . . . .	186
6.5.1.2. Qu'est-ce que le LAVIA ? . . . . .	187
6.5.1.3. Le projet et l'expérimentation LAVIA . . . . .	187
6.5.1.4. Principe de fonctionnement du LAVIA . . . . .	188
6.5.1.5. Architecture du LAVIA . . . . .	189
6.5.1.6. Autres solutions possibles pour le LAVIA : le projet <i>Speed Alert</i> . . . . .	191
6.5.2. L'alerte . . . . .	193
6.5.3. L'alerte dans le programme de recherche ARCOS 2004 . . . . .	194
6.5.3.1. Priorité des messages . . . . .	194
6.5.3.2. Pertinence . . . . .	195
6.5.3.3. Gestion des alertes . . . . .	196
6.5.3.4. Technologie de communication . . . . .	197
6.5.3.5. Le frontal IMMACS . . . . .	198
6.6. L'évolution nécessaire de l'infrastructure . . . . .	199
6.6.1. Technologies passives et semi-passives . . . . .	199
6.6.2. Communications généralisées . . . . .	200
6.6.3. Les programmes de recherche en Europe . . . . .	201

6.7. Conclusion et perspectives . . . . .	202
6.8. Bibliographie . . . . .	204
<b>Chapitre 7. L'information aux usagers via des outils de prévisions . . . . .</b>	<b>207</b>
Mehdi DANECH-PAJOUH	
7.1. Introduction . . . . .	207
7.2. Les prévisions du dispositif Bison futé . . . . .	208
7.2.1. Historique de Bison futé . . . . .	208
7.2.2. Structures de Bison futé . . . . .	209
7.2.3. Evolution de l'outil Bison futé . . . . .	210
7.2.4. Le modèle de prévision utilisé avant 1998 . . . . .	211
7.2.4.1. Prévisions de débits journaliers et horaires d'un point de mesures . . . . .	211
7.2.4.2. Intentions de départ d'une région . . . . .	211
7.2.4.3. Conseils de départ . . . . .	211
7.2.4.4. Remarques sur ce premier modèle de prévision . . . . .	211
7.2.5. Le nouveau modèle mis en œuvre en 1998 . . . . .	212
7.2.5.1. Evaluation du nouveau modèle . . . . .	213
7.3. Prévision du trafic à l'horizon de quelques jours . . . . .	215
7.3.1. Mise en œuvre de l'expérience . . . . .	216
7.3.1.1. Etape 1 : mesurer l'interaction entre l'offre et la demande . . . . .	216
7.3.1.2. Etape 2 : prévoir l'état du trafic dans les conditions récurrentes . . . . .	216
7.3.1.3. Etape 3 : prendre en considération les événements exogènes . . . . .	218
7.3.2. Les acquis de l'expérience . . . . .	220
7.4. Nouvelle approche de l'information routière . . . . .	221
7.4.1. Prévision de l'état du trafic à l'horizon d'une demi-heure . . . . .	221
7.4.2. Calcul de temps de parcours de référence par itinéraire . . . . .	222
7.5. Bibliographie . . . . .	223
<b>TROISIÈME PARTIE. LE CONTRÔLE DES RÉSEAUX . . . . .</b>	<b>225</b>
<b>Chapitre 8. Le contrôle des rampes d'accès . . . . .</b>	<b>227</b>
Habib HAJ-SALEM, Saïd MAMMAR, Salim MAMMAR	
8.1. Introduction . . . . .	227
8.2. Le principe du contrôle d'accès . . . . .	228
8.3. Les stratégies de contrôle d'accès isolé . . . . .	229
8.3.1. Régulation statique . . . . .	229
8.3.2. Stratégie feux fixes . . . . .	229
8.3.3. Stratégies adaptatives . . . . .	229
8.3.3.1. Stratégie demande/capacité . . . . .	230
8.3.3.2. Stratégie taux d'occupation . . . . .	231

8.3.4. La stratégie ALINEA . . . . .	232
8.3.5. Les stratégies goutte à goutte . . . . .	234
8.4. Stratégies de contrôle d'accès coordonné . . . . .	235
8.4.1. METALINE . . . . .	235
8.4.2. La stratégie OASIS . . . . .	237
8.5. La régulation d'accès par mode glissant . . . . .	239
8.5.1. Formulation du problème de contrôle . . . . .	239
8.5.2. Synthèse du contrôleur par mode glissant . . . . .	240
8.5.3. Etude en simulation . . . . .	243
8.5.3.1. Contrôle d'accès par MGPO . . . . .	244
8.5.3.2. Contrôle d'accès par MGSO . . . . .	245
8.6. Synthèse des résultats expérimentaux en France . . . . .	248
8.6.1. Cas du boulevard périphérique parisien . . . . .	248
8.6.2. Cas des autoroutes de l'Ile-de-France . . . . .	252
8.7. Synthèse des résultats expérimentaux à l'étranger . . . . .	254
8.8. Conclusion . . . . .	258
8.9. Bibliographie . . . . .	258
<b>Chapitre 9. Le contrôle des carrefours à feux . . . . .</b>	<b>261</b>
Florence BOILLOT	
9.1. Introduction . . . . .	261
9.2. Les concepts liés à la régulation des carrefours . . . . .	262
9.3. Les objectifs de la régulation . . . . .	264
9.4. La base de la régulation « traditionnelle » : les plans de feux . . . . .	265
9.5. La régulation en temps réel . . . . .	266
9.5.1. Les systèmes cycliques . . . . .	268
9.5.2. Les systèmes acycliques . . . . .	272
9.5.2.1. Les systèmes avec le formalisme par phase . . . . .	272
9.5.2.2. Les systèmes avec le formalisme par groupe de feux . . . . .	276
9.6. Evolution actuelle de la régulation du trafic . . . . .	277
9.7. Conclusion . . . . .	278
9.8. Bibliographie . . . . .	278
<b>Chapitre 10. Vers le contrôle intégré des réseaux routiers . . . . .</b>	<b>281</b>
Yibing WANG, Christina DIAKAKI, Apostolos KOTSIALOS, Markos PAPAGEORGIOU	
10.1. Introduction . . . . .	281
10.2. Les actions de contrôle du trafic et besoins d'intégration . . . . .	282
10.3. Les problèmes du contrôle intégré . . . . .	285
10.3.1. Les aspects d'intégration . . . . .	285
10.3.1.1. La modélisation intégrée du processus de trafic . . . . .	285
10.3.1.2. Conception intégrée des stratégies de commande . . . . .	285
10.3.1.3. Intégration des composants logiciels . . . . .	286

10.3.1.4. Intégration des équipements de communication et du matériel . . . . .	286
10.3.1.5. Intégration et interconnexion des centres de contrôle . . . . .	286
10.3.1.6. Aspects administratifs de l'intégration . . . . .	286
10.3.2. Niveaux d'intégration . . . . .	287
10.3.2.1. Niveau 0 . . . . .	287
10.3.2.2. Niveau 1 . . . . .	287
10.3.2.3. Niveau 2 . . . . .	288
10.3.2.4. Niveau 3 . . . . .	289
10.3.2.5. Niveau 4 . . . . .	289
10.4. Revue des approches proposées pour la commande intégrée du trafic urbain/autoroutier . . . . .	291
10.4.1. Historique . . . . .	291
10.4.2. La stratégie IN-TUC . . . . .	295
10.4.2.1. Le contrôle en urbain . . . . .	296
10.4.2.2. Le contrôle d'accès . . . . .	296
10.4.2.3. La recommandation d'itinéraires . . . . .	296
10.5. Etude en situation de la stratégie IN-TUC . . . . .	297
10.6. Revue des stratégies de contrôle intégré du trafic sur autoroute . . . . .	301
10.7. Un exemple avancé . . . . .	305
10.7.1. L'outil AMOC . . . . .	305
10.7.2. Application à un réseau de test . . . . .	306
10.8. Bibliographie . . . . .	310

**Chapitre 11. Automatisation de la conduite, impact sur la capacité et la sécurité . . . . . 315**

Saïd MAMMAR, Benjamin MOURLLION, Jean-Marc BLOSSEVILLE

11.1. Introduction . . . . .	315
11.2. Amélioration de la sécurité par les communications . . . . .	317
11.2.1. Introduction . . . . .	317
11.2.2. Notations . . . . .	317
11.2.3. Critères d'évaluation . . . . .	318
11.2.3.1. Distance de sécurité . . . . .	319
11.2.3.2. Capacité . . . . .	320
11.2.3.3. Sécurité . . . . .	320
11.2.4. Scénarios d'évaluation . . . . .	323
11.2.4.1. Hypothèses de travail . . . . .	323
11.2.5. Résultats : approche fondée sur le nombre de collisions . . . . .	324
11.2.5.1. Sans communication . . . . .	324
11.2.5.2. Avec communication . . . . .	325
11.2.5.3. Applications numériques . . . . .	326
11.2.6. Approche fondée sur la violence moyenne d'une collision . . . . .	329
11.2.6.1. Etude de la gigue . . . . .	329

11.2.6.2. Etude d'une communication partielle . . . . .	333
11.2.7. Synthèse des résultats . . . . .	335
11.3. Scénarios de route automatisée poids lourds . . . . .	337
11.3.1. Introduction . . . . .	337
11.3.2. Capacité en régime stationnaire . . . . .	338
11.3.3. Route actuelle et évolutions . . . . .	338
11.3.3.1. Evolution des poids lourds . . . . .	338
11.3.3.2. Influence de l'évolution des longueurs sur la capacité . . .	340
11.3.3.3. Influence de l'évolution des longueurs sur la consommation . . . . .	341
11.3.4. Poids lourds automatisés en trafic mixte . . . . .	342
11.3.5. Voie dédiée, scénario de référence . . . . .	343
11.3.6. Voie dédiée, trois scénarios d'automatisation des PL . . . . .	344
11.3.6.1. Scénario de convoi statique . . . . .	345
11.3.6.2. Scénario de convoi dynamique . . . . .	348
11.3.6.3. Scénario des PL automatisés autonomes . . . . .	348
11.3.7. Conclusion . . . . .	351
11.4. Bibliographie . . . . .	351
<b>Index</b> . . . . .	355