

SYSTÈMES DE TRANSPORTS INTELLIGENTS (STI)

De l'acquisition des données à l'aide
à la décision en passant par la cybersécurité

Jalel Chebil
Ali Mansour
Taoufik Elmissauoui
Christophe Osswald

SYSTÈMES DE TRANSPORTS INTELLIGENTS (STI)

De l'acquisition des données
à l'aide à la décision en passant
par la cybersécurité

Jalel Chebil
Ali Mansour
Taoufik Elmissauoui
Christophe Osswald



Collection Formations & Techniques

dirigée par Paul de Laboulaye

paul.delaboulaye@editions-ellipses.fr

Retrouvez tous les titres de la collection et des extraits sur www.editions-ellipses.fr



ISBN 9782340-121126

Dépôt légal : octobre 2026

©Ellipses Édition Marketing S.A.

8/10 rue la Quintinie 75015 Paris



Le Code de la propriété intellectuelle et artistique n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, 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 » (alinéa 1^{er} de l'article 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.

www.editions-ellipses.fr

Avant-propos

Ce livre constitue une ressource complète et accessible, écrite pour répondre aux besoins des étudiants souhaitant comprendre, concevoir ou perfectionner les Systèmes de Transport Intelligents (STI). Il se lit d'autant mieux que la lectrice ou le lecteur participe à un cursus qui lui apporte des bases en électronique, analogique comme numérique, en traitement du signal, télécommunications et informatique. Il s'adresse aussi aux chercheurs et professionnels qui recherchent un panorama des technologies, algorithmes et enjeux liés à ces systèmes, pour contribuer à leur développement ou interagir avec eux.

Il propose une analyse approfondie de ces systèmes innovants en explorant leurs fondements, les technologies sous-jacentes, les méthodes de traitement des données, ainsi que les défis en matière de sécurité. À travers une approche globale et progressive, l'ouvrage met en évidence le rôle crucial des STI dans la gestion intelligente, efficace et durable des réseaux de transport contemporains.

Le chapitre 1 pose les bases en définissant les STI, leurs principes de fonctionnement et leurs principaux domaines d'application. Il offre également un aperçu de la structure du livre afin de guider le lecteur à travers les thématiques abordées.

Le chapitre 2 se penche sur les paramètres fondamentaux du trafic routier — débit, densité, vitesse moyenne, etc. — et présente les différentes technologies de capteurs utilisées pour la collecte des données. Il distingue les capteurs intrusifs (boucles inductives, magnétomètres...), les capteurs non-intrusifs (vidéo, radar, LiDAR...), ainsi que les capteurs embarqués, en détaillant pour

chacun leurs principes de fonctionnement, avantages, limites et cas d'usage.

Le chapitre 3 aborde le traitement des données collectées. Il décrit les différentes étapes : préparation, fusion, analyse et stockage, tout en illustrant des cas d'application tels que la détection d'accidents ou la prévision de congestion. Des techniques avancées comme le traitement d'images, les SVM (machines à vecteurs de support) ou les algorithmes génétiques y sont également explorées.

Dans le chapitre 4, les fondamentaux des systèmes de communication sont exposés : composants (émetteurs, récepteurs, canaux), types de réseaux (cellulaires, satellitaires, ad hoc), ainsi que les technologies spécifiques telles que MANET, VANET, V2X, NFC et AIS. Ce chapitre met en lumière la diversité et la complexité des échanges de données dans les STI.

Le chapitre 5 est consacré aux technologies de localisation. Il détaille les principes de triangulation et trilatération, les systèmes de positionnement mondiaux comme le GPS (y compris le GPS différentiel), ainsi que les technologies de localisation à courte portée. L'accent est mis sur la précision et la fiabilité requises dans les contextes intelligents de mobilité.

Le chapitre 6 présente des applications concrètes des STI, notamment la détection d'incidents basée sur des approches statistiques et d'apprentissage automatique, ainsi que la résolution du problème de routage de véhicules capacitaires hétérogènes avec fenêtres temporelles (HCVRP-TW). Des études de cas, l'utilisation d'outils tels qu'OR-Tools, et des méthodes fondées sur le Deep Learning et les réseaux neuronaux sont proposées pour illustrer les concepts.

Enfin, le chapitre 7 traite des enjeux de sécurité dans les STI. Il couvre la sécurité des réseaux sans fil, les menaces (attaques, piratage de données), la confidentialité et les protocoles de sécurité, notamment dans les communications V2V. Des solutions de protection, ainsi que des exercices pratiques, viennent enrichir ce chapitre essentiel.

Table des matières

1	Introduction aux systèmes de transport intelligents	13
1.1	Définition d'un système de transport intelligent	13
1.2	Principe de fonctionnement des STI	14
1.2.1	Système de transport	18
1.2.2	Acquisition de données	19
1.2.3	Systèmes de communications	19
1.2.4	Traitement de données	20
1.2.5	Diffusion de l'information	20
1.2.6	Utilisation des informations	21
1.2.7	Usagers des STI	21
1.2.8	Facteurs externes	22
1.3	Applications des STI	22
1.3.1	Systèmes avancés de gestion du trafic	22
1.3.2	Systèmes d'information aux voyageurs	23
1.3.3	Systèmes avancés de transports publics	23
1.3.4	Applications pour les véhicules commerciaux	24
1.3.5	Applications de sécurité des véhicules	25
1.3.6	Systèmes de péage électronique	25
1.3.7	Systèmes de gestion des incidents et des urgences	25
1.4	Conclusion	26
2	Acquisition de données pour les systèmes de transport routier	27
2.1	Les paramètres fondamentaux du flux de trafic routier	28
2.1.1	Débit du trafic	28

2.1.2	Vitesse moyenne	29
2.1.3	Densité du trafic	30
2.1.4	Taux d'occupation	30
2.1.5	Distance et temps inter-véhiculaire	31
2.2	Technologies des capteurs pour les systèmes de transport routier	34
2.3	Technologies des capteurs intrusifs	35
2.3.1	Les capteurs à boucle inductive	35
2.3.1.1	Principe de fonctionnement des capteurs à boucle inductive	36
2.3.1.2	Traitement des données générées par les capteurs à boucle inductive	38
2.3.1.3	Avantages et inconvénients des capteurs à boucle inductive	44
2.3.1.4	Domaine d'applications des capteurs à boucle inductive	45
2.3.2	Les capteurs magnétomètres	45
2.3.2.1	Principe de fonctionnement des capteurs magnétomètres	46
2.3.2.2	Traitement du signaux générés par les capteurs magnétomètre	50
2.3.2.3	Avantages et inconvénients des magnétomètres sans fil	51
2.3.2.4	Domaine d'applications des magnétomètres	52
2.3.3	Les capteurs à tubes pneumatiques	52
2.3.3.1	Principe de fonctionnement des capteurs à tubes pneumatiques	53
2.3.3.2	Traitement des données générées par les capteurs à tubes pneumatiques	53
2.3.3.3	Avantages et inconvénients des capteurs à tubes pneumatiques	58
2.3.3.4	Domaine d'applications des capteurs à tubes pneumatiques	59
2.3.4	Les capteurs piézoélectriques	59
2.3.4.1	Principe de fonctionnement des capteurs piézoélectriques	60
2.3.4.2	Traitement des données générées par les capteurs piézoélectriques	60
2.3.4.3	Avantages et inconvénients des capteurs piézoélectriques	62

2.3.4.4	Domaine d'applications des capteurs piézoélectriques	63
2.4	Technologies des capteurs non-intrusifs	65
2.4.1	Les capteurs infrarouges	66
2.4.1.1	Principe de fonctionnement des capteurs IR et traitement de données générées	66
2.4.1.2	Montage des capteurs à IR actifs	69
2.4.1.3	Traitement des données générées par les capteurs à IR	70
2.4.1.4	Avantages et inconvénients des capteurs à IR	71
2.4.1.5	Domaine d'applications des capteurs à IR	72
2.4.2	Les capteurs à ultrasons	73
2.4.2.1	Principe de fonctionnement des capteurs à ultrasons	74
2.4.2.2	Traitement de données des capteurs à ultrasons	75
2.4.2.3	Avantages et inconvénients des capteurs à ultrasons	78
2.4.2.4	Domaine d'applications des capteurs à ultrasons	78
2.4.3	Les capteurs acoustiques	80
2.4.3.1	Principe de fonctionnement des capteurs acoustiques	81
2.4.3.2	Traitement de données des capteurs acoustiques	82
2.4.3.3	Avantages et inconvénients des capteurs acoustiques	83
2.4.3.4	Domaine d'applications des capteurs acoustiques	84
2.4.4	Les capteurs vidéo	85
2.4.4.1	Principe de fonctionnement des capteurs vidéo	85
2.4.4.2	Traitement de données des capteurs vidéo	87
2.4.4.3	Avantages et inconvénients des capteurs vidéo	89
2.4.4.4	Domaine d'applications des capteurs vidéo	90
2.4.5	Les capteurs radars	90
2.4.5.1	Principe de fonctionnement des radars	90
2.4.5.2	Traitement de données des radars	91
2.4.5.3	Avantages et inconvénients des radars	93
2.4.5.4	Domaine d'applications des radars	93
2.4.6	Les capteurs LiDAR	94
2.4.6.1	Principe de fonctionnement des capteurs LiDAR	94
2.4.6.2	Traitement de données des capteurs LiDAR	95
2.4.6.3	Avantages et inconvénients des capteurs LiDAR	95

2.4.6.4	Domaine d'applications des capteurs LiDAR	96
2.5	Technologies des capteurs embarqués	96
2.5.1	Exemples de capteurs embarqués selon leur classification	96
2.5.2	Quelques applications des capteurs embarqués	98
2.6	Conclusion	99
	Exercices	100
3	Traitement de données acquises	109
3.1	Définition du traitement de données	110
3.2	Acquisition de données	112
3.3	Préparation de données	113
3.3.1	Filtrage conventionnel classique	113
3.3.1.1	Filtres simples idéaux	113
3.3.1.2	Filtre idéal et filtre réel	115
3.3.1.3	Ordre d'un filtre	116
3.3.1.4	Filtres passifs et actifs	117
3.3.1.5	Filtre passe-bas	120
3.3.1.6	Filtre passe-haut	121
3.3.1.7	Filtre passe-bande	122
3.3.1.8	Filtre coupe-bande	124
3.3.1.9	Amplificateur opérationnel	125
3.3.1.10	Filtre actif du premier ordre	129
3.3.1.11	Filtre actif du second ordre	130
3.3.2	Filtrage avancé	133
3.3.2.1	Filtre de Wiener	133
3.3.2.2	Filtrage de Kalman	136
3.3.2.3	Filtre de Kalman étendu	137
3.3.2.4	Filtrage particulière	138
3.3.2.5	Filtrage adapté	141
3.4	Collection et fusion de données	142
3.4.1	Fusion de données	143
3.4.1.1	Inférence bayésienne	143
3.4.1.2	Théorie de Dempster-Shafer	143
3.4.1.3	Réseaux de neurones artificiels	149
3.4.1.4	Logique floue	154
3.4.2	Modèles physiques	158
3.4.2.1	Filtre de Kalman	158
3.4.2.2	Filtre de Kalman étendu (<i>extended Kalman filter</i> (EKF))	159

3.4.2.3	Filtre de Kalman « sans parfum » ou <i>unscented</i> (<i>unscented Kalman filter</i> (UKF))	159
3.4.2.4	Techniques de Monte Carlo	160
3.4.2.5	Filtre particulaire	160
3.4.2.6	Méthodes synthétiques	160
3.5	Analyses de données	160
3.5.1	Analyse descriptive	161
3.5.1.1	Définitions de la statistique descriptive	161
3.5.1.2	Collecte des données	162
3.5.1.3	Présentation de données	162
3.5.1.4	Résumé des données	163
3.5.2	Analyses diagnostiques	166
3.5.3	Analyse prédictive	166
3.5.4	Analyses prescriptives	167
3.5.5	Le traitement analytique en ligne (<i>online analytical processing</i> , OLAP)	168
3.5.6	L'exploration des données (<i>data mining</i>)	168
3.5.7	Analyses en SQL	169
3.5.8	Analyses commerciales	169
3.5.9	Visualisation des données (<i>visual analytics</i>)	170
3.5.10	Analyse de grandes bases de données (<i>big data analytics</i>)	171
3.5.11	Analyse cognitive (<i>cognitive analytics</i>)	171
3.6	Stockage	172
3.7	Traitement de données de trafic routier	173
3.7.1	Capteurs de trafic	174
3.7.2	Détection des accidents	175
3.7.3	Détection et prédiction des congestions	177
3.7.4	Prédiction des états du réseau routier	178
3.8	Analyse de données par traitement d'images ou vidéos	180
3.9	Analyses avancées de données	182
3.9.1	Analyse avancée dans une application STI	183
3.9.2	Machine à vecteurs de support	184
3.9.3	Algorithmes génétiques	186
3.10	Conclusion	188
4	Communications et échanges de données dans les STI	191
4.1	Les composants essentiels d'un système de communication	192
4.1.1	Émetteurs	192
4.1.2	Modulation et démodulation	192

4.1.2.1	Modulation	192
4.1.2.2	Démodulation	193
4.1.2.3	Mise en équation et exemples	194
4.1.3	Canaux de transmission	198
4.1.3.1	Canaux câblés	198
4.1.3.2	Canaux non-câblés	200
4.1.3.3	Caractéristiques du canal de transmission . . .	200
4.1.3.4	Étude de quelques supports de transmission . .	201
4.1.4	Récepteurs	203
4.2	Les différents types de systèmes de communications	203
4.2.1	Le réseau téléphonique câblé	204
4.2.2	Les réseaux cellulaires	205
4.2.3	Choix de la forme cellulaire	207
4.2.4	La réutilisation des fréquences	208
4.2.5	Handover	209
4.2.6	Planification d'un réseau cellulaire	210
4.2.7	Les lois d'Erlang	211
4.2.7.1	Loi d'approximation B avec racine carrée . . .	212
4.2.7.2	Loi d'approximation de Halfin-Whitt	212
4.2.8	Approche méthodologique pour le calcul de l'Erlang à divers niveaux du réseau	213
4.3	Les réseaux satellitaires	215
4.3.1	Éléments d'un réseau satellitaire	216
4.3.2	Protocoles de communications d'un réseau satellitaire .	216
4.4	Réseaux ad hoc	217
4.4.1	Principales caractéristiques	218
4.4.2	Types de routage dans les réseaux ad hoc	218
4.4.3	MANET et VANET	218
4.4.4	V2X	219
4.4.4.1	V2V (<i>Vehicle-to-Vehicle</i>)	220
4.4.4.2	V2I (<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>)	220
4.4.4.3	V2P (<i>Vehicle-to-Pedestrian</i>)	220
4.4.4.4	V2N (<i>Vehicle-to-Network</i>)	221
4.5	Exemples de systèmes de télécommunications	221
4.5.1	La technologie NFC	221
4.5.2	Système d'identification automatique des navires	222
4.6	Conclusion	223
	Exercices	224

5	Technologies de localisation	229
5.1	Principes de localisation	229
5.2	Systèmes mondiaux de positionnement	233
5.3	Le GPS	234
5.3.1	Segments GPS	235
5.3.1.1	Segment spatial	235
5.3.1.2	Segment de contrôle	236
5.3.1.3	Segment utilisateur	237
5.3.2	Principe de calcul des coordonnées GPS	237
5.3.3	Signaux GPS	238
5.3.4	GPS différentiel	239
5.3.5	Impact du GPS sur les STI	240
5.4	Technologies de localisation à courte portée : vers une précision et une fiabilité accrues	242
5.5	Conclusion	245
	Exercices	246
6	Applications des STI	249
6.1	Détection et identification des incidents de trafic	250
6.1.1	Score Z	251
6.1.2	Systèmes basés sur des règles (<i>Rule-Based Systems</i>)	254
6.1.3	Apprentissage automatique	257
6.1.4	Régression linéaire	258
6.1.5	L'algorithme K-means	264
6.1.5.1	Formulation mathématique simplifiée de K-means	265
6.1.5.2	Implementation de l'algorithme K-means	266
6.2	Routing de véhicules capacitaires hétérogènes avec fenêtres tem- porelles	268
6.2.1	Formulation mathématique	268
6.2.2	Objectifs d'optimisation	269
6.2.2.1	Minimisation de la distance totale parcourue	269
6.2.2.2	Minimisation du temps total de trajet	270
6.2.2.3	Minimisation de la consommation d'énergie	270
6.2.2.4	Respect des fenêtres temporelles des clients	270
6.2.2.5	Respect des capacités des véhicules	270
6.2.2.6	Service de tous les clients	270
6.2.2.7	Synthèse	271
6.2.3	Résolution de problème HCVRP-TW	271
6.2.3.1	Méthodes heuristiques	271

6.2.3.2	Méthodes métaheuristiques	271
6.2.3.3	Méthodes de Machine Learning	272
6.2.4	Résolution du HCVRP-TW avec OR-Tools	273
6.2.4.1	Modélisation du problème avec OR-Tools	273
6.2.4.2	Exécution et interprétation des résultats	273
6.2.5	Cas pratiques	274
6.2.5.1	Cas 1 : Données aléatoires	274
6.2.5.2	Cas 2 : Instances de Solomon	275
6.2.6	Résolution du HCVRP-TW par combinaison de GNN et Deep Learning	276
6.2.6.1	Modélisation du problème avec les GNN	277
6.2.6.2	Intégration des contraintes temporelles avec le <i>deep learning</i>	278
6.2.6.3	Optimisation des routes	279
6.2.6.4	Techniques d'apprentissage	279
6.2.6.5	Métriques d'évaluation	279
6.2.6.6	Techniques de test	280
6.2.6.7	Avantages de l'approche	280
6.3	Conclusion	280
	Exercices	281
7	Sécurité des STI	289
7.1	Les réseaux sans-fil exploitables par un STI	291
7.2	Sécurité des réseaux mobiles	293
7.3	Sécurité de la couche physique	294
7.4	Types des attaques	297
7.4.1	Déni de service, DoS (<i>Denial of service</i>)	297
7.4.2	Attaque par inondation (<i>Flooding Attack</i>)	297
7.4.3	Interception ou altération des données	298
7.4.4	Faux serveurs	298
7.4.5	Attaque de brouillage (<i>Jamming Attack</i>)	298
7.4.6	Brouillage sophistiqué	299
7.4.7	Attaque par trou noir/homme du milieu (<i>Blackhole Attack/Man in the Middle</i>)	300
7.4.8	Attaque par jeu dans un réseau VANET	300
7.5	Confidentialité et sécurité (<i>Privacy</i>)	301
7.6	Approches de protection	301
7.6.1	Cryptographie	302
7.6.2	Techniques anti-brouillage classiques	302
7.6.3	Identification d'un brouilleur	303

7.6.4	Étalement de spectre (<i>Direct-Sequence Spread Spectrum</i> (DSSS))	304
7.6.5	Saut de fréquence (<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> (FHSS)).	304
7.6.6	Modification des paquets	305
7.6.7	Techniques plus avancées	305
7.7	Algorithmes de sécurité	306
7.7.1	Algorithme général d'un serveur des infrastructures routières (RSU, <i>Road Side Units</i>)	306
7.7.2	Algorithme du véhicule	307
7.7.3	Algorithme du serveur RSU	308
7.7.4	Algorithme de l'attaquant (attaque de rejeu)	308
7.8	Sécurité des communications V2V : protocoles, vulnérabilités et mécanismes de protection	308
7.8.1	Mécanismes de sécurité	309
7.8.2	Algorithmes d'attaque	309
7.8.3	Algorithmes de sécurité	310
7.9	Exercices pratiques	310
7.10	Conclusion	311
7.11	Correction des exercices pratiques	311
7.11.1	Premier exercice	311
7.11.2	Deuxième exercice	313
	Bibliographie	315
	Index	321

Introduction aux systèmes de transport intelligents

DEPUIS plusieurs décennies, la plupart des grandes villes dans le monde ont de nombreux problèmes liés aux transports tels que les embouteillages et les accidents de la circulation. Cela entraîne des pertes humaines et économiques, pertes de temps et d'énergie, ainsi que la détérioration de l'environnement par la pollution de l'air. Les systèmes de transport intelligents (STI, i.e. *Intelligent Transport Systems : ITS*) offrent un ensemble d'outils qui contribuent à résoudre totalement ou partiellement ces problèmes. Ils désignent toutes les applications associant les télécommunications et l'informatique dans le domaine du transport pour améliorer l'exploitation en accroissant la productivité, sauvant des vies, gagnant du temps, réduisant les coûts et économisant de l'énergie.

Les STI peuvent être appliqués à n'importe quel moyen de transport que ce soit routier, ferroviaire, maritime ou aérien, et ils prennent en compte tous les agents impliqués : véhicule, infrastructure et utilisateur (conducteur ou passager). Le développement des STI est toujours en évolution et s'améliore avec l'avancement dans la recherche et la technologie. Les niveaux d'acceptation, d'adoption, et d'applicabilité locale des STI varient d'un pays à l'autre. Ce chapitre présente la définition des STI et donne un aperçu général sur ces systèmes et ces applications.

1.1 Définition d'un système de transport intelligent

Il existe de nombreuses définitions pour les STI qui ont été établies par des organismes américains et européens ainsi que d'autres pays. Étant donné

que ces définitions font référence à la même chose en utilisant des formulations différentes, on trouve que la définition officielle française est assez bonne. La définition des systèmes de transport intelligents (STI) a été introduite en France par l'ordonnance n° 2012-809 du 13 juin 2012 relative aux systèmes de transport intelligents qui indique que « *les STI sont des dispositifs utilisant des technologies de l'informatique et des communications électroniques et mis en œuvre dans le secteur du transport routier et ses interfaces avec d'autres modes de transport pour améliorer la gestion de la circulation, renforcer la sécurité du transport routier, accroître son efficacité en termes d'économie d'énergie et réduire ses effets sur l'environnement et permettre des utilisations plus sûres, mieux coordonnées et plus rationnelles des réseaux de transport* ».

Puisque le concept des STI est applicable à tous les types de transports que ce soit routier, ferroviaire, maritime ou aérien ; on peut définir plus généralement les STI comme étant une expression générique utilisée pour décrire l'application intégrée des diverses technologies qui reposent sur l'informatique ainsi que sur les télécommunications et qui sont utilisées au profit d'une politique durable des transports aux fins suivantes :

- Optimisation de l'utilisation des capacités de trafic existantes et de l'efficacité du déroulement du trafic.
- Amélioration de la sécurité routière.
- Encouragement du comportement intermodal et multimodal des usagers.
- Atténuation des atteintes environnementales et augmentation du confort.

1.2 Principe de fonctionnement des STI

Pour mieux comprendre le fonctionnement des STI, nous allons d'abord discuter un exemple simple d'un système de gestion de carrefours à feux et montrer comment le rendre intelligent. Un carrefour à feux est une intersection dont le trafic est réglé par des feux de signalisation lumineux pilotés par un contrôleur comme indiqué dans la figure 1.1. Il y a 16 mouvements possibles sur un carrefour à 4 branches. Dans ce cas, comment peut-on régler les cycles de feux pour assurer la sécurité des automobilistes et des piétons tout en permettant un débit maximal ? Pour remédier à ce problème, on peut utiliser trois méthodes :

- i. Les feux s'allument d'une façon régulière indépendamment du volume de trafic.
- ii. Les feux sont allumés selon un rythme variable basé sur une étude statistique précédente sur la circulation du trafic.

- iii. Méthode intelligente qui règle les cycles de feux en temps réel selon la circulation du trafic

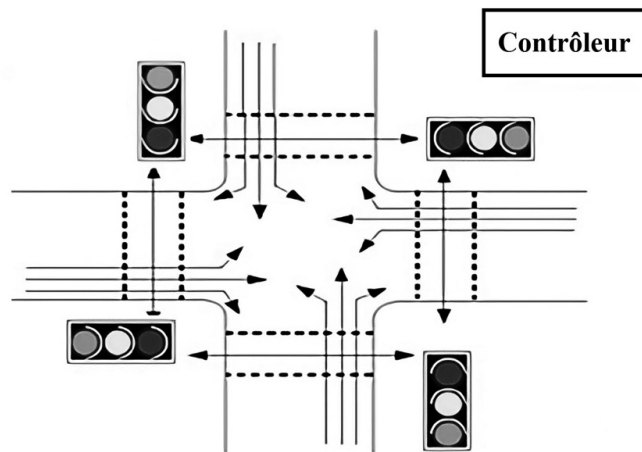


FIGURE 1.1 – Une intersection avec 4 feux de signalisation

La première méthode est inefficace puisqu'elle peut causer des congestions pendant les heures de pointe et le débit du trafic sera faible la plupart du temps. Donc, le temps de passage sera très long pour les conducteurs. La deuxième méthode fonctionne très bien si le trafic est normal. Mais, s'il y a des incidents qui rendent le trafic anormal, la gestion du trafic sera alors inefficace. La méthode intelligente sera plus performante dans tous les cas. Elle nécessite les étapes illustrées dans la figure 1.2 et qui sont :

- Étape 1. Collection de données du trafic en temps réel sur les routes liées au carrefour. Cela nécessite l'installation de capteurs pour l'acquisition de données comme des capteurs à boucle inductive, capteurs à infrarouge, capteurs vidéo, capteurs magnétiques, etc.
- Étape 2. Transmission de ces données au contrôleur à travers un système de communication qui peut être filaire ou sans-fil.
- Étape 3. Traitement de ces données pour l'extraction des informations utiles qui permettent d'analyser le trafic routier et de prendre des décisions concernant le réglage de cycles de feux. Normalement cette étape est faite automatiquement en utilisant des logiciels spécialisés.
- Étape 4. Diffusion de l'information obtenue aux feux de signalisation.

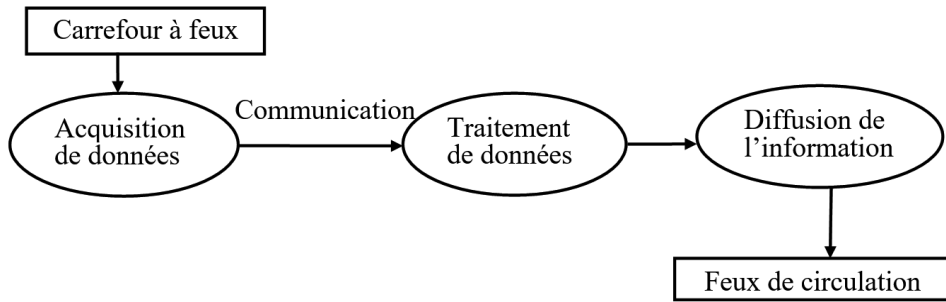


FIGURE 1.2 – Un schéma fonctionnel simple montrant quelques tâches essentielles pour la gestion des feux de signalisation d’une manière plus intelligente

Le système peut être amélioré pour fournir d’autres informations utiles aux utilisateurs des STI ou à d’autres parties. Par exemple, l’analyse des données du trafic peut permettre de déduire s’il y a une congestion, un accident, ou d’autres activités. Ces informations peuvent être communiquées aux usagers à travers des stations radios et des sites internet dédiés à la circulation routière. Les informations pertinentes peuvent aussi être diffusées sur des panneaux à messages variables. Figure 1.3 montre ces éléments.

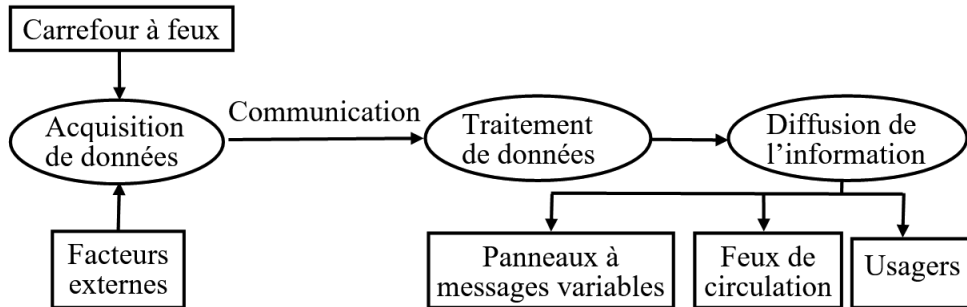


FIGURE 1.3 – Un schéma fonctionnel amélioré montrant plus de tâches effectuées par un système de transport intelligent pour la gestion des feux de signalisation dans le cas d’une intersection

On peut aussi savoir s’il y a des travaux ou des incidents sur les routes à travers des informations communiquées par le ministère de l’équipement, la municipalité ou d’autres centres externes au secteur de transport, qu’ils soient gouvernementaux ou privés. Ces informations vont être dirigées au contrôleur via l’unité responsable de l’acquisition de données. Dans la figure 1.3, les facteurs externes peuvent représenter les interactions des organismes publics ou

privés qui ne font pas de transport.

Il faut noter aussi que certains facteurs externes comme les prévisions météorologiques peuvent faire partie de la chaîne d'information.

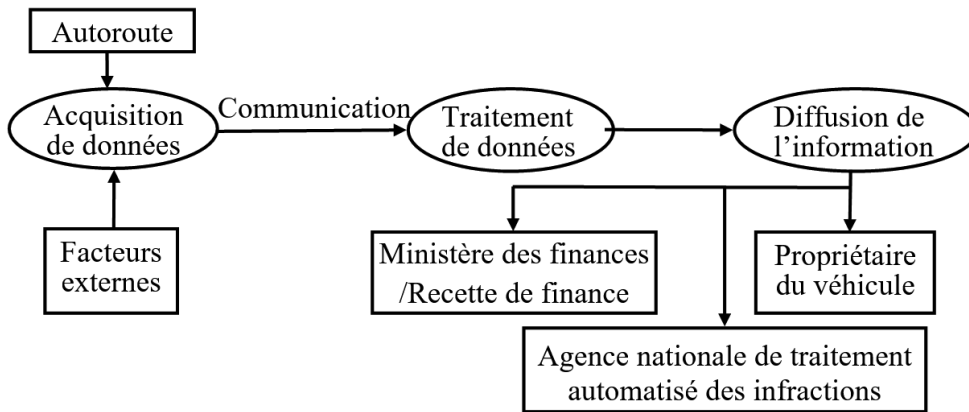


FIGURE 1.4 – Un schéma fonctionnel montrant les principales tâches effectuées par un système de transport intelligent pour le respect des limitations de vitesse dans une autoroute

Un autre exemple concerne l'application d'un système intelligent pour le respect des limitations de vitesse dans une autoroute. Pour un meilleur respect des limitations de vitesse, ce système nécessite des données sur la vitesse des véhicules passants en temps réel. Si un véhicule dépasse la vitesse limite, il faut alors obtenir des informations sur le conducteur et le propriétaire du véhicule afin d'envoyer les amendes. Un système fonctionne intelligemment s'il suit les étapes suivantes, voir la figure 1.4.

Étape 1. L'acquisition de données peut être obtenue en utilisant deux capteurs : un radar et une caméra de vidéo-surveillance. Le caméra est normalement intégrée au radar et on l'appelle radar automatique. Le radar mesure les vitesses des véhicules passants et le caméra capte les images de chaque véhicule incriminé pour extraire son immatriculation avec laquelle on obtient le nom et les coordonnées du propriétaire du véhicule.

Étape 2. Transmission de données au centre de contrôle qui peut être le centre de gestion de trafic. La transmission peut s'effectuer via Internet.

Étape 3. Traitement de données pour obtenir des informations utiles : par exemple, on traite l'image du véhicule pour obtenir son immatriculation à l'aide d'un logiciel spécialisé en traitement d'image. Avec l'immatriculation du véhicule et un accès à la base de données du Ministère de

Transport, on peut obtenir le nom et les coordonnées de son propriétaire. De plus, l'amende sera calculée en fonction du dépassement de vitesse enregistré.

Étape 4. Diffusion de l'information obtenue pour avertir le propriétaire du véhicule de l'amende. Certaines informations seront aussi diffusées à d'autres utilisateurs de STI comme l'agence nationale de traitement automatisé des infractions et la Recette de Finance/Ministère des finances pour le suivi de l'amende.

Ces deux exemples montrent quelques composants de base des STI. On peut souligner que l'acquisition de données, le traitement des données, les usagers des STI, la diffusion et l'utilisation de l'information sont établis comme les piliers des systèmes STI. Cela accentue également l'importance des différentes formes d'information qui jouent un rôle essentiel dans les STI en circulant d'un élément à un autre. Pour cette raison, tous les systèmes STI peuvent être considérés comme une chaîne d'information avec huit principaux éléments décrits par la figure 1.5 et qui sont :

- Système de transport
- Acquisition de données
- Systèmes de communications
- Traitement de données
- Diffusion de l'information
- Utilisation des informations
- Utilisateur des STI
- Facteurs externes

Chaque élément est expliqué brièvement dans les sections suivantes.

1.2.1 Système de transport

Le premier élément représente le système de transport où le système intelligent est appliqué, et il spécifie les réseaux routiers et les services fournis à tous les usagers. Par exemple, le système de transport peut être limité aux réseaux routiers d'une ville particulière, d'une province ou d'un pays avec tous les types de véhicules et d'usagers utilisant les routes. Dans d'autres applications, le système de transport peut être limité aux transports publics dans une ville ou dans un pays.

1.2.2 Acquisition de données

L'acquisition de données est l'un des éléments essentiels du STI qui collecte en temps réel des données exactes et crédibles sur la circulation routière, les véhicules et le réseau de transport. Par exemple, le débit, la densité et la vitesse moyenne du trafic sont des données liées à la circulation routière. Mais les données peuvent être liées aux véhicules, à titre d'exemple : le type et le poids de chaque véhicule passant, les plaques d'immatriculation, etc. Le temps de parcours moyen est un exemple de donnée reliée au réseau de transport.

Les capteurs utilisés pour l'acquisition de données peuvent être reliés à l'infrastructure comme les capteurs à boucle inductive, les capteurs à tubes pneumatiques, les capteurs à effet piézoélectrique, les capteurs à infrarouge, les capteurs à ultrasons, les capteurs vidéo, les radars, etc. Ils peuvent aussi être reliés aux véhicules connectés ou autonomes qui ont la capacité de collecter des données sur le trafic et de les envoyer au centre d'acquisition de données grâce à la communication entre véhicule et infrastructure ou vice-versa (V2I ou I2V). Les récepteurs GPS et les appareils Bluetooth sont des exemples de tels capteurs.

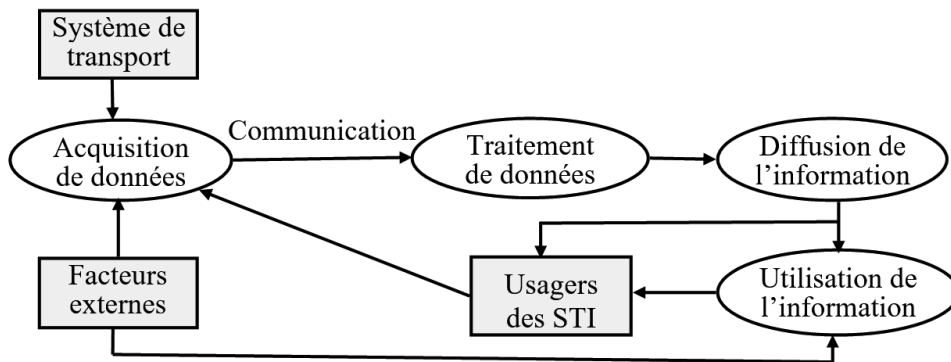


FIGURE 1.5 – Un schéma fonctionnel général montrant les principales tâches effectuées par un système de transport intelligent

1.2.3 Systèmes de communications

Un autre élément important des STI est le système de communication qui est responsable de l'échange des données et d'informations entre les différents centres et utilisateurs dans les systèmes STI. Pour communiquer avec des capteurs installés au sein de l'infrastructure de transport, les systèmes de communication peuvent utiliser des moyens de transmission filaire ou sans fil.

Pour le premier cas, les câbles électriques souples ou rigides, armés ou non

et à conducteurs cuivre ; ou les fibres optiques peuvent être déployés. Alors que les réseaux de téléphonie mobile ou les réseaux de communication dédiés aux STI sont des moyens bien répandus pour la transmission sans fil.

1.2.4 Traitement de données

Les données brutes transmises par les capteurs seront traitées par l'unité de traitement des données qui peut être reliée au centre de contrôle du système STI. Le traitement de données est une série de processus permettant d'extraire des informations exploitables et de produire du savoir à partir de données brutes. Les informations ainsi obtenues peuvent être analysées plus facilement. Ces processus sont décrits sous forme d'algorithmes ; une fois programmés, ils sont souvent automatisés à l'aide d'ordinateurs. Les tâches importantes de traitement de données consistent notamment à :

- filtrer les données brutes pour réparer et supprimer les données incorrectes, corrompues, incomplètes ou dupliquées.
- extraire des informations en temps réel sur les conditions de circulation tels que les volumes et la densité du trafic, la vitesse moyenne spatiale et temporelle, les taux d'occupation, etc.
- fournir aux utilisateurs des renseignements courants sur la circulation et/ou des données sur les temps de parcours prévus,
- envoyer des informations sur le trafic au contrôleur des feux de circulation,
- détecter automatiquement les incidents liés à l'infrastructure,
- localiser les véhicules et aider à la navigation, etc.

1.2.5 Diffusion de l'information

Un des objectifs des STI est de pouvoir diffuser l'information aux différents types d'utilisateurs qui soit un grand public comme les usagers, les voyageurs et les internautes, etc. ou les utilisateurs professionnels comme les conducteurs, les agents d'exploitation, etc. Par exemple, l'information relative à la circulation et d'autres renseignements pertinents (comme l'état de la route, les places de stationnement disponibles, les parcs relais, etc.) peuvent être diffusés au grand public afin d'améliorer la qualité de l'environnement, l'efficacité, et la sûreté des transports. Ces informations peuvent être envoyées aussi aux fournisseurs de services du secteur privé qui perçoivent des recettes issues de la publicité et/ou de frais imposés aux utilisateurs finaux.

La diffusion de l'information se fait à travers des équipements fixes et des terminaux mobiles. Les équipements fixes qui sont utilisés en relation avec l'infrastructure comprennent les téléphones conventionnels, les récepteurs radios classiques, les télévisions, les ordinateurs de bureau, les télécopieurs, les postes internet, les kiosques d'information ou les bornes interactives, les panneaux à messages dynamiques ou variables (PMD ou PMV), les afficheurs en station, etc.

D'autre part, les terminaux mobiles incluent les radios de véhicules, les postes de radio portatifs, les téléphones cellulaires, les smartphones, navigateurs, afficheurs embarqués et d'autres dispositifs multimédias « nomades ».

1.2.6 Utilisation des informations

L'utilisation de l'information dans le cadre des STI vise à apporter le soutien aux utilisateurs en matière de décision et de contrôle. Il y a un certain nombre de fonctions de base que les STI vont remplir.

La première consiste à informer l'utilisateur afin qu'il puisse prendre des décisions éclairées et coordonnées. La deuxième appuie la régulation du trafic du côté de l'infrastructure, par exemple l'information transmise va aider à la décision et à la régulation du trafic. La troisième est d'aider le conducteur à une meilleure maîtrise du véhicule par l'utilisation de capteurs embarqués. La dernière fonction consiste à assurer le fonctionnement coopératif entre l'infrastructure et les véhicules.

1.2.7 Usagers des STI

Les STI ont été conçus pour satisfaire les besoins des utilisateurs ou usagers. Les usagers de STI reçoivent l'information et les services nécessaires à travers les différents types de terminaux fixes ou mobiles. Par exemple, l'information relative à la circulation peut être disséminée aux usagers à travers des panneaux à messages variables ou des applications mobiles sur smartphones.

Non seulement les usagers peuvent recevoir des informations, mais ils peuvent également aider à fournir aux STI des données utiles sur le trafic en utilisant leurs téléphones portables pendant la conduite ou le déplacement.

L'emplacement et le mouvement du téléphone portable sont déterminés à l'aide de l'une des plusieurs technologies de localisation disponibles par le réseau mobile. De la même manière, l'appareil Bluetooth dans le téléphone portable peut aussi être exploité pour envoyer des données au système.

1.2.8 Facteurs externes

Des facteurs externes peuvent intervenir dans la chaîne d'information des STI. Par exemple, l'information sur les conditions météorologiques pourrait inciter les usagers à modifier leurs plans de déplacement. Cette information sera transmise par le centre de météorologie qui est normalement un centre externe aux STI. D'autre part, l'information sur les dates prévues pour la maintenance des routes spécifiées peut être obtenue par la municipalité ou le ministère concerné. La dissémination de cette information peut être utile aux usagers utilisant ces routes.

Un autre exemple, le ministère de l'intérieur peut transmettre aux STI des informations sur les manifestations ou les festivals prévus dans certaines zones et routes. En résumé, il existe de nombreux centres externes qui peuvent fournir aux STI des informations utiles.

1.3 Applications des STI

Les STI peuvent être appliqués aux différents types de transport, que ce soit pour des applications simples ou complexes. Ils jouent un rôle important dans la manière de gérer les réseaux routiers pour améliorer l'efficacité et la fiabilité des opérations de transport et réduire les impacts négatifs sur l'environnement et la consommation d'énergie. Cette section présente en bref quelques exemples des STI reliés à l'exploitation du réseau routier et qui sont les plus répandus sur le marché ou les plus fréquemment déployés, tels que :

- Les systèmes avancés de gestion du trafic
- Les systèmes d'information aux voyageurs
- Les systèmes de transports publics
- Les applications pour les véhicules commerciaux
- les applications de sécurité des véhicules
- Les systèmes de péage électronique
- Les systèmes de gestion des incidents et des urgences

Ces applications vont être traitées en détail dans le chapitre 6.

1.3.1 Systèmes avancés de gestion du trafic

Le système avancé de gestion du trafic (ATMS : *Advanced Traffic Management System*) intègre la gestion du mouvement des véhicules, des voyageurs et des piétons sur l'ensemble du réseau de transport routier. Il joue un rôle très important dans la réduction de la pollution, la protection de l'environnement,

l'utilisation plus sûre et mieux coordonnée des réseaux de transport, la diminution des accidents et l'économie d'énergie. Par exemple, ce système peut détecter les accidents, prédire les embouteillages et fournir des instructions d'itinéraire alternatif aux véhicules dans les zones régionales afin d'améliorer l'efficacité du réseau routier et de maintenir les priorités pour les véhicules à occupation élevée. Le système ATMS comporte quatre fonctions de base :

- Le recueil automatisé de données sur le trafic via des capteurs routiers, des systèmes caméras en circuit fermé (CCTV : *Closed-circuit television*), un système de reconnaissance automatique des plaques d'immatriculation (ANPR : *Automatic number-plate recognition*), et de données issues de véhicules flottants (FCD : *Floating car data*), etc.
- Le traitement de données grâce à des systèmes informatiques de plus en plus performants et qui sont capables de gérer de plus en plus de données.
- Une diffusion de données par les services d'information par les panneaux à messages variables, la radio, l'internet et les diffuseurs locaux.
- Signalement automatique d'incidents aux organismes compétents comme la police et les autorités compétentes.

La gestion de l'information routière est normalement effectuée par des centres de gestion ou de régulation du trafic modernes et informatisés à l'échelle urbaine, régionale et nationale. Par exemple, en France, la gestion de l'information routière est effectuée par le Centre National d'Information Routière (CNIR).

1.3.2 Systèmes d'information aux voyageurs

Les systèmes d'information aux voyageurs peuvent fournir des données dans les véhicules, aux domiciles ou sur les lieux de travail. Les informations comprennent : l'emplacement des incidents, les problèmes météorologiques, les conditions routières, les itinéraires optimaux, les restrictions de voie et la signalisation dans le véhicule. Des informations peuvent être fournies à la fois aux conducteurs et aux usagers des transports en commun et même aux personnes avant un voyage pour les aider à mieux organiser leurs voyages.

1.3.3 Systèmes avancés de transports publics

Le système avancé de transports publics est une application des STI qui est utilisé dans les transports publics pour optimiser l'exploitation du réseau et pour améliorer le confort des usagers et leur sécurité. Le système peut utiliser les technologies modernes pour améliorer grandement l'accessibilité de l'information aux usagers du transport en commun ainsi que pour améliorer

la programmation des véhicules de transport en commun et l'utilisation des flottes d'autobus. Quelques exemples de tâches réalisées par ce système sont présentés comme suit :

- La détermination des technologies de la billettique. Le support peut ainsi se présenter sous la forme d'une carte à puce ou une carte magnétique, ou un pass sans contact qui permet un stockage sécurisé et centralisé des titres et des droits de transport d'un voyageur. Donc cette méthode permette l'automatisation des ventes et l'instauration d'une plus grande flexibilité des tarifs utiles pour une meilleure gestion des taux de remplissage des bus. L'utilisateur peut alors avoir accès à divers moyens de transport et à divers services gérés par le système.
- L'utilisation des systèmes de pilotage automatique partiel ou complet du métro ou des bus.
- La fourniture de l'information aux voyageurs en temps réel sur les routes, les trains, les tramways, les bus ou bien les vélos. Donc le système peut renseigner un voyageur au point d'arrêt en lui indiquant : le numéro et la destination de la ligne de bus ou du tramway, le temps d'attente estimé avant les deux prochains bus, les événements ou perturbations sur le réseau. L'information peut être diffusée en ligne ou à l'aide des afficheurs distribuées dans les stations. L'utilisateur peut alors mieux planifier ses déplacements et peut être encouragés à utiliser plus souvent les transports en commun.
- Le développement de nouveaux services comme le transport à la demande, l'auto-partage ou le vélo-partage.

1.3.4 Applications pour les véhicules commerciaux

Les technologies des STI ont été appliquées dans l'opération des véhicules commerciaux pour améliorer la productivité et la sécurité des flottes et l'efficacité de leurs opérations. Il existe deux grands domaines d'application. Le premier domaine vise à améliorer la gestion de la flotte du secteur privé comme les opérateurs privés de camions, camionnettes, taxis, etc. Le deuxième domaine est conçu pour rationaliser les fonctions gouvernementales et réglementaires.

Le premier domaine comprend la localisation automatique des véhicules, la distribution du fret et la livraison de marchandises aux clients dans les délais prévus, le suivi des véhicules et des cargaisons, la surveillance à distance de l'état de la cargaison et la prise en compte de la multimodalité et de l'intermodalité, etc. Le deuxième domaine englobe la délivrance de permis et de licences d'exploitation, le contrôle des limites de poids et le pré-dédouanement électronique, etc.

1.3.5 Applications de sécurité des véhicules

L'application d'un système intelligent pour les services de sécurité des véhicules s'appuie sur le lancement d'avertissements afin d'éviter des accidents de la route. Par exemple, dans le cas d'une intersection, lorsque les véhicules sont masqués par des immeubles, un conducteur ne peut pas savoir si d'autres véhicules s'approchent de l'intersection en provenance d'une autre direction. Si chaque véhicule communique sa position et son état à intervalles réguliers, d'autres véhicules peuvent déterminer le mouvement des véhicules cachés et peuvent prendre les mesures nécessaires pour éviter une collision.

Ces applications sont souvent conçues sur la base des communications de véhicule à véhicule (V2V) et des communications de véhicule à infrastructure (V2I). Les deux types de communications utilisent des communications dédiées à courte portée (DSRC : Dedicated Short-Range Communication) dans la bande de fréquence autour de 5,9 GHz. Les communications V2I peuvent prendre en charge des applications de sécurité routière en envoyant des informations précises sur la géométrie des intersections, sur la phase et la synchronisation des feux de circulation, et sur des situations inattendues concernant un véhicule donné.

1.3.6 Systèmes de péage électronique

Le système de péage électronique ou télépéage est une combinaison de techniques et de technologies qui permet d'acquitter les frais d'utilisation d'une route sans nécessiter aucune intervention du conducteur et sans s'arrêter à des postes de péage. Les systèmes de base remplacent les paiements en espèces par une solution automatisée : un badge électronique d'identification (transpondeur) installé à bord du véhicule est lu à un poste de péage au moyen de la technologie de communication dédiée à courte portée (DSRC), infrarouge ou hyperfréquences. Donc, les paiements peuvent être faits grâce à un badge ou une carte intelligente qui est insérée dans un dispositif embarqué. Ces systèmes sont maintenant une chose courante dans divers pays.

L'implémentation généralisée du système électronique de péage fournit d'importants avantages au niveau de l'efficacité, du confort et de la sécurité, non seulement pour les paiements mais aussi pour les voyageurs.

1.3.7 Systèmes de gestion des incidents et des urgences

Le système de gestion des incidents et des urgences doit être déclenché en cas d'événements comme des accidents, ou des conditions routières inhabituelles, ou un désastre naturel, ou encore des conditions météorologiques

particulièrement mauvaises, etc. Il faut que le système réagisse rapidement et efficacement aux urgences et aux incidents avec une réponse cohérente à tous les niveaux de l'organisation et en assurant la sécurité du personnel et des passagers. En plus, le système garde des plans et des horaires alternatifs pour une activation à l'heure prévue ou en réponse à des événements déclencheurs. Par exemple, dans le cas d'un accident, le système utilise au maximum des systèmes automatisés de recueil de l'information et des transmissions performantes. Les principaux enjeux sont la rapidité d'intervention, l'évitement d'accidents en chaîne et le rétablissement de la circulation.

Les technologies spécifiques liées aux STI comprennent des boutons d'alarme ouverts et cachés qui sont généralement installés dans la cabine du conducteur pour lui permettre de communiquer la situation au centre de répartition. En plus, les consoles du conducteur ont souvent des boutons pré-réglés pour des types d'urgence/d'incident spécifiques. Les données utilisées pour la gestion des urgences/incidents contiennent des données sur la localisation du véhicule, l'état de l'alarme et la configuration des feux de circulation alternatifs et des priorités à proximité des zones perturbées. Le système utilise aussi des technologies de communication qui permettent un échange de données entre les agences concernées comme les agences de transport, de sécurité et de santé.

1.4 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser les bases des systèmes de transport intelligents (STI), en présentant leur définition, leur fonctionnement et leurs applications variées. Nous avons vu que les STI reposent sur une intégration complexe de technologies permettant l'acquisition, le traitement et la diffusion d'informations, qui améliorent la fluidité et la sécurité des transports. Les différentes sections ont mis en lumière les divers composants des STI, allant des systèmes avancés de gestion du trafic aux applications de sécurité des véhicules, illustrant ainsi leur impact potentiel sur nos modes de transport quotidiens.

À travers cette exploration, il devient évident que les STI ne se contentent pas de moderniser les infrastructures existantes ; ils offrent également des solutions innovantes pour relever les défis contemporains du transport urbain et interurbain. En se tournant vers les chapitres suivants, nous approfondirons chacun de ces aspects, en analysant les tendances actuelles et les développements futurs qui façonneront le paysage des transports dans les années à venir.

Acquisition de données pour les systèmes de transport routier

UN des éléments indispensables à plusieurs services des STI est l'acquisition en temps réel de données exactes et fiables relatives au trafic. Ces données jouent un rôle essentiel dans un système de transport intelligent car elles fournissent des informations nécessaires pour mieux comprendre, gérer et optimiser le réseau de transport. Elles permettent par exemple une gestion efficace du trafic, la détection et la gestion des incidents, la diffusion d'informations aux voyageurs, l'optimisation des itinéraires et la prise de décisions éclairées pour améliorer les performances globales du système. Ces données peuvent aussi aider à la planification des infrastructures.

Il existe trois différents types de données : les données routières, les données sur les véhicules et les données sur le réseau de transport. Les données routières sont relatives à la circulation et l'état des routes telles que le débit, la densité, le taux d'occupation de la chaussée, la vitesse moyenne du trafic, etc. Le deuxième type de données se focalise sur les véhicules comme localisations, poids, plaques d'immatriculation, etc. Le troisième type représente des données détaillées et fiables sur les liens, les nœuds et d'autres caractéristiques des réseaux de transport, par exemple le temps d'un parcours moyen. Ces différents types de données de trafic sont collectés à l'aide de capteurs placés sur les routes, tels que les capteurs à boucle inductive, les capteurs à ultrasons, les capteurs à infrarouges ou les radars.

Ce chapitre analyse les capteurs couramment utilisés pour l'acquisition des données du trafic routier dans les STI. Il discute aussi des méthodes usuelles d'extraction des informations à l'analyse de données brutes générées par les capteurs.

Ce chapitre commence par définir les paramètres fondamentaux du flux de trafic routier dans la section 2.1. Ces paramètres seront utiles pour l'analyse des données du trafic. Ensuite la section 2.2 présente les technologies des capteurs utilisées dans les systèmes de transport routier tels que les capteurs intrusifs, les capteurs non-intrusifs et les capteurs embarqués. La section 2.3 présente le principe de fonctionnement et l'application des capteurs intrusifs les plus couramment utilisés comme les capteurs à boucle inductives, les capteurs magnétomètres, les capteurs à tubes pneumatiques et les capteurs à effet piézo-électrique. De même, la section 2.4 discute des exemples des capteurs non-intrusifs tels que les capteurs à ultrasons, les capteurs acoustiques, les capteurs à infrarouge, les radars, les LiDAR et les capteurs vidéos. Tous ces derniers capteurs sont des capteurs non-intrusifs. Pour les capteurs embarqués, la section 2.5 explique le fonctionnement et l'application des capteurs de positionnement (GPS), capteurs de pluie et radars de détections d'obstacle. Finalement, la section 2.6 propose une conclusion à ce chapitre, et des exercices illustrent la mise en œuvre des ces capteurs.

2.1 Les paramètres fondamentaux du flux de trafic routier

Les paramètres fondamentaux du flux de trafic routier sont des mesures utilisées pour caractériser et analyser le mouvement des véhicules sur les routes. Ces paramètres fournissent des informations essentielles pour comprendre la dynamique du trafic et prendre des décisions en matière de gestion du trafic. Les principaux paramètres fondamentaux du flux de trafic routier sont les suivants : débit, vitesse moyenne, densité, taux d'occupation, temps et distance inter-véhiculaire. Chaque paramètre sera défini dans les sections suivantes.

2.1.1 Débit du trafic

Le débit est défini comme étant le rapport entre le nombre de véhicules, n , qui passent par un point donné sur une route et la durée d'observation, T . Il est exprimé ainsi comme

$$q = \frac{n}{T} \quad (2.1)$$

Il est généralement mesuré en véhicules par heure (veh/h) ou en véhicules par minute (veh/min). Le débit est utilisé pour évaluer la capacité d'une route et pour déterminer le niveau de congestion.

2.1.2 Vitesse moyenne

C'est la mesure de la vitesse moyenne des véhicules en mouvement sur une route et elle est généralement exprimée en kilomètres par heure (km/h). La vitesse moyenne est un paramètre important pour évaluer l'efficacité du trafic, la sécurité routière et l'impact environnemental. On peut distinguer deux types de vitesse : la vitesse moyenne temporelle et la vitesse moyenne spatiale. La vitesse moyenne temporelle, v_t , est la vitesse moyenne des véhicules sur une période de temps spécifique :

$$v_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i(t_i) \quad (2.2)$$

avec n est le nombre de véhicules passant par un point d'observation durant la période de mesure, et $v_i(t_i)$ est la vitesse du véhicule observé, i , passant par le point d'observation à l'instant t_i .

La vitesse moyenne temporelle est une mesure importante pour évaluer l'efficacité du trafic sur une période donnée. Elle permet de comprendre comment la vitesse des véhicules varie au fil du temps et peut être utilisée pour identifier les périodes de pointe, les heures de congestion ou les moments où la circulation est plus fluide.

D'autre part, la vitesse moyenne spatiale, v_s , est une mesure qui indique la vitesse moyenne des véhicules sur une section spécifique d'une route à un moment donné, t . Elle est souvent utilisée pour mesurer l'efficacité d'un tronçon de route ou d'une autoroute particulière. Par exemple, la vitesse moyenne d'un flot des véhicules peut être représentée par v_s . La vitesse moyenne spatiale peut être trouvée par deux méthodes. Si on peut déterminer les vitesses des véhicules présents sur une section de la route à un moment donné, t_0 , à travers un capteur vidéo par exemple, l'expression de v_s sera

$$v_s = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} v_i(t_0) \quad (2.3)$$

où N_s est le nombre de véhicules observé sur la section de la route au moment t_0 et $v_i(t_0)$ est la vitesse de véhicule observé, i , à l'instant t_0 .

Dans plusieurs cas, les capteurs utilisés ne peuvent mesurer la vitesse des véhicules qu'à un point d'observation comme les boucles inductives. Dans ce cas, v_s est déterminée par l'expression suivante :

$$v_s = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i(t_i)}} \quad (2.4)$$

où n et $v_i(t_i)$ sont définis précédemment. Donc la vitesse moyenne spatiale peut être définie aussi comme la moyenne harmonique des vitesses des véhicules passant à un point de l'autoroute pendant un intervalle de temps. Pour simplifier les notations, on utilise le symbole v_i pour désigner $v_i(t_i)$ dans la suite du texte.

La vitesse moyenne spatiale est utilisée par les planificateurs de transports ou les ingénieurs de la circulation pour évaluer les performances du réseau routier, identifier les zones de congestion ou prendre des décisions concernant les améliorations de l'infrastructure. Cette information est aussi exploitée par certains logiciels comme Google map. Les conducteurs peuvent également utiliser cette information pour estimer le temps d'un trajet et déterminer l'itinéraire le plus rapide. Cependant, il est important de noter que la vitesse moyenne spatiale peut varier en fonction de la circulation, des conditions météorologiques et d'autres facteurs

Finalement, il faut noter que la vitesse moyenne temporelle est toujours supérieure à la vitesse moyenne spatiale, selon l'inégalité de Wardrop

$$v_s \leq v_t \quad (2.5)$$

2.1.3 Densité du trafic

La densité du trafic, parfois appelée concentration, représente le nombre de véhicules présents sur une section de route à un instant donné. Si N_s est le nombre de véhicules observés sur une distance L , la densité du trafic, k , est donnée par

$$k = \frac{N_s}{L} \quad (2.6)$$

La densité est généralement mesurée en véhicules par kilomètre (veh/km) et utilisée pour évaluer le niveau de congestion et la capacité d'une route. La densité du trafic dépend du débit du trafic et de la vitesse moyenne spatiale par la relation générale suivante :

$$k = \frac{q}{v_s} \quad (2.7)$$

2.1.4 Taux d'occupation

Le taux d'occupation, τ , est le pourcentage de temps pendant lequel une section de route est occupée par des véhicules, et il est défini par

$$\tau = \frac{100}{T} \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (2.8)$$

où n est le nombre de véhicules passant par la section de la route pendant une période donnée, T . θ_i désigne le temps d'occupation de cette section par véhicule i , et τ est généralement exprimé en pourcentage. Le taux d'occupation est utilisé pour évaluer l'utilisation de la capacité d'une route et pour détecter les problèmes de congestion.

2.1.5 Distance et temps inter-véhiculaire

La distance inter-véhiculaire, DIV, est définie généralement comme étant la distance séparant deux points identiques de deux véhicules sur la même voie. Elle peut aussi être définie tout simplement comme la distance entre l'avant d'un véhicule, i , et l'avant du véhicule suivant, $i + 1$. Elle est exprimée en mètres et désignée par $s_{i,i+1}$. Par exemple, la distance inter-véhiculaire entre le premier et le deuxième véhicule est dénotée par $s_{1,2}$ comme indiqué dans la figure 2.1.

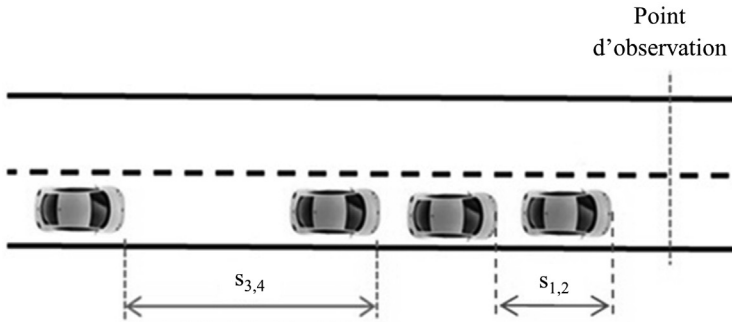


FIGURE 2.1 – Illustration de la distance inter-véhiculaire

D'autre part, le temps inter-véhiculaire, TIV, est généralement défini comme le temps entre le passage de deux points identiques de deux véhicules consécutifs sur la même voie. Plus spécifiquement, c'est la différence entre le moment où l'avant d'un véhicule, i , arrive à un point d'observation sur la route et le moment où l'avant du véhicule suivant, $i + 1$ arrive au même point. Le temps inter-véhiculaire est exprimé en secondes et noté par $h_{i,i+1}$. Par exemple, le temps inter-véhiculaire entre le deuxième et le troisième véhicule est désigné par $h_{2,3}$. La distance et le temps inter-véhiculaire sont utilisés pour évaluer la densité du trafic, la capacité de la route et le niveau de congestion.

D'autres relations utiles existantes entre les variables de flux de trafic sont données ici.

$$v_s = q\bar{s} \quad (2.9)$$

où $\bar{s}$ est la distance inter-véhiculaire moyenne définie par

$$\bar{s} = \frac{1}{k} \quad (2.10)$$

On peut également évaluer $\bar{s}$ par la relation suivante

$$\bar{s} = v_s \bar{h} \quad (2.11)$$

où $\bar{h}$ est le temps inter-véhiculaire moyen spécifié par

$$\bar{h} = \frac{1}{q} \quad (2.12)$$

Exemple 2.1

Si les vitesses des véhicules passant par un point d'observation, X , sont 50, 40, 60, 54 et 45 km/h, trouver la vitesse moyenne temporelle et la vitesse moyenne spatiale.

SOLUTION

Le nombre des véhicules observés à X est $n = 5$, alors la vitesse moyenne temporelle devient

$$v_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i = 49,8 \text{ km/h}$$

La vitesse moyenne spatiale est

$$v_s = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i(t_i)}} = 48,8 \text{ km/h}$$

Exemple 2.2

Trois véhicules, A , B et C circulent sur une piste circulaire de périmètre 2 km avec les vitesses respectives $V_A = 100$ km/h, $V_B = 120$ km/h et $V_C = 140$ km/h. Déterminer

- la densité,
- le débit horaire,
- la vitesse moyenne temporelle,
- la vitesse moyenne spatiale,
- vérifier l'inégalité de Wardrop.

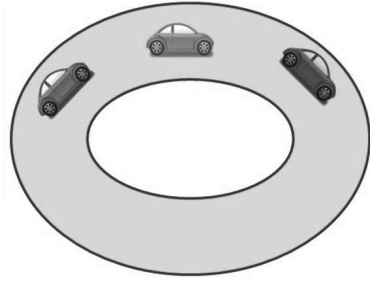


FIGURE 2.2 – Trois véhicules de l'exemple 2.2 sur une piste circulaire

SOLUTION

- a) Sur une distance $L = 2$ km, on a 3 véhicules, voir la figure 2.2. Donc $N_s = 3$ et

$$k = \frac{N_s}{L} = 1,5 \text{ veh/km}$$

- b) Selon l'équation 2.1, le débit horaire est $q = n/T$ avec n le nombre des véhicules passant devant un point d'observation quelconque sur cette piste pendant une durée de temps $T = 1$ h. Il faut noter que pendant une heure chaque véhicule doit passer plusieurs fois devant ce point d'observation avec la même vitesse. Il suffit de calculer la distance parcourue par chaque véhicule pendant une heure divisée par la longueur de la piste L . Donc on peut déterminer n

$$n = \frac{V_A T}{L} + \frac{V_B T}{L} + \frac{V_C T}{L} = \frac{(100 + 120 + 140) \times 1}{2} = 180$$

Alors $q = n/T = 180 \text{ veh/h}$

- c) Puisque les véhicules A, B et C vont passer 50, 60 et 70 fois respectivement par le point d'observation, alors

$$v_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i(t_i) = \frac{50V_A + 60V_B + 70V_C}{180} = 122 \text{ km/h}$$

- d) v_s peut être évaluée selon trois méthodes :

$$i) \quad v_s = q/k = 180/1,5 = 120 \text{ km/h}$$

$$ii) \quad v_s = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} v_i(t_0) = \frac{V_A + V_B + V_C}{3} = 120 \text{ km/h}$$

$$iii) \quad v_s = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i(t_i)}} = \frac{180}{50/V_A + 60/V_B + 70/V_C} = 120 \text{ km/h}$$

- e) L'inégalité de Wardrop est satisfaite puisque $v_s \leq v_t$