



HAL
open science

**Vehicle to infrastructure communication based systems:
their contribution to road traffic management. Case of
AIDA: the on-board traffic information system for
motorways**

Fahim Belarbi

► **To cite this version:**

Fahim Belarbi. Vehicle to infrastructure communication based systems: their contribution to road traffic management. Case of AIDA: the on-board traffic information system for motorways. Engineering Sciences [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2004. English. NNT: . pastel-00000955

HAL Id: pastel-00000955

<https://pastel.hal.science/pastel-00000955>

Submitted on 20 Dec 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THESE

Pour l'obtention du diplôme de Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

Discipline : Transport

Présentée et soutenue publiquement par

Fahim BELARBI

le 29 septembre 2004

**LES SYSTEMES DE COMMUNICATION ENTRE LES VEHICULES
ET L'INFRASTRUCTURE: LEUR CONTRIBUTION AUX
PRATIQUES D'EXPLOITATION DE LA ROUTE.
LE CAS D'UNE APPLICATION POUR L'INFORMATION DES AUTOROUTES (AIDA)**

Sous la direction du Professeur Simon COHEN

COMPOSITION DU JURY

Jean Pierre ORFEUIL: Professeur à l'Université de Paris XII, (Président)

Jean LATERRASSE : Professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (Examineur)

Claude LAURGEAU : Professeur à l'Ecole Nationale des Mines de Paris, (Rapporteur)

Saïd MAMMAR : Professeur à l'Université d'Evry Val-d'Essonne, (Rapporteur)

Simon COHEN : Directeur de Recherche à L'INRETS, Professeur, (Directeur de thèse)

Remerciements

Ma reconnaissance s'adresse tout d'abord à messieurs Guy Frémont, Yves Veschambre et Gérard Charpentier qui m'ont accueilli à COFIROUTE. Ils sont à l'origine de ce sujet et ont consacré une partie précieuse de leur temps à me faire bénéficier de leur compétence et de leur expérience dans le domaine de l'exploitation routière.

Je remercie vivement monsieur Simon Cohen, Professeur à l'ENPC et Directeur de Recherche à l'INRETS, d'avoir accepté de diriger cette thèse et je tiens à lui exprimer particulièrement ma gratitude pour son encadrement et ses précieux conseils. Sans son suivi attentif, cette thèse n'aurait pas pu être menée à terme.

Ma reconnaissance va également à messieurs Claude Laurgeau, Professeur à l'ENSMP et Saïd Mammam, Professeur à l'Université d'Evry, qui ont bien voulu assumer le rôle de rapporteur et donner leur avis d'experts sur ce travail.

Merci à messieurs Jean Pierre Orfeuil, Professeur à l'Université de Paris XII, Jean Laterrasse, Professeur à l'ENPC et Jérôme Geoffray, Directeur des Systèmes Opérationnels chez Cofiroute d'avoir accepté de faire partie du jury de soutenance.

Mes remerciements vont également à messieurs, Bertrand De Changy, Chef du Département des Systèmes d'Exploitation et Jean Delons, responsable de la Cellule Economie Trafic chez Cofiroute, pour leurs remarques pertinentes et leur intérêt pour ces travaux de recherche.

Je suis reconnaissant à toutes les personnes de Cofiroute pour leur sympathie et leurs encouragements et particulièrement à Muriel Desbrières pour son assistance logistique.

Je remercie tous les membres du consortium AIDA pour les échanges fructueux que nous avons eus sur le sujet.

Mention spéciale à Mme Claudine Heloir pour sa lecture détaillée de cette thèse et ses précieux conseils.

Enfin, merci à tous les membres de ma famille pour leur patience et leurs sacrifices qui m'ont permis de concilier mon activité professionnelle et ces travaux de recherche.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	7
PARTIE I : LES PRATIQUES CLASSIQUES D'EXPLOITATION DE LA ROUTE	12
INTRODUCTION	13
CHAPITRE I : EXPLOITATION DE LA ROUTE	14
<i>I.1. Définition</i>	15
<i>I.2. Variables de base</i>	15
I.2.1. Débit	15
I.2.2. Vitesse	15
I.2.3. Concentration.....	16
I.2.4. Capacité	16
I.2.5. Temps de parcours	18
<i>I.3. Niveau de service</i>	18
<i>I.4. Niveaux d'exploitation</i>	20
<i>I.5. Domaines d'exploitation du SDER</i>	21
I.5.1. Maintien de la viabilité	21
I.5.2. Gestion du trafic	21
I.5.3. Aide au déplacement.....	24
I.5.4. Equipement.....	24
<i>I.6. Les structures dans le domaine de l'exploitation routière</i>	24
I.6.1. Centre d'information et de gestion du trafic.....	24
I.6.2. La veille qualifiée	25
I.6.3. La Salle Opérationnelle	25
I.6.4. Les Centres d'Entretien et d'Intervention (CEI).....	25
I.6.5. Les patrouilles.....	25
I.6.6. Le CNIR et les CRICR	26
<i>I.7. Recueil de données</i>	26
<i>I.8. Traitement des données</i>	27
I.8.1. Données de trafic	27
I.8.2. Données météo.....	27
<i>I.9. Diffusion des informations</i>	28
I.9.1. Définitions de base	28
I.9.2. Services.....	28
<i>I.10. Exigences d'exploitation pour un réseau concédé en milieu interurbain</i>	29
CHAPITRE II : L'EVALUATION, METHODOLOGIES ET DIFFICULTES	34
<i>II.1. Généralités</i>	35
<i>II.2. Catégories d'évaluation</i>	36
II.2.1. Evaluation technique :	36
II.2.2. Evaluation de l'acceptation par l'utilisateur	36
II.2.3. Evaluation des impacts	37
II.2.4. Evaluation socio-économique :	37
II.2.5. Evaluation financière.....	41
<i>II.3. Exemples d'évaluation aux Etats Unis</i>	42
<i>II.4. Cadre d'évaluation en Europe</i>	45
II.4.1. Guide EVA.....	45
II.4.2. Guide CONVERGE.....	47
II.4.3. Méthode des 12 étapes.....	48
<i>II.5. Cadre d'évaluation en France</i>	48
II.5.1. Généralités.....	48
II.5.2. Travaux de l'administration et de l'ASFA	49
II.5.3. Les méthodes.....	53
II.5.4. Présentation des résultats.....	55
<i>II.6. Améliorations de la méthode d'évaluation des actions d'exploitation</i> :	56
CONCLUSION	57

PARTIE II : LES SYSTEMES DE COMMUNICATION ENTRE L'INFRASTRUCTURE ET LES VEHICULES	58
INTRODUCTION	59
CHAPITRE III : FONCTIONNALITES DES SYSTEMES DE COMMUNICATION ENTRE L'INFRASTRUCTURE ET LES VEHICULES	60
<i>III.1. Introduction</i>	61
<i>III.2. Généralités</i>	61
III.2.1. Tâches de conduite.....	61
III.2.2. Aspects généraux liés à la conception.....	62
III.2.3. Classification des systèmes.....	64
<i>III.3. Description fonctionnelle des systèmes d'information embarqués</i>	67
<i>III.4. Enjeux et recommandations</i>	67
III.4.1. Acteurs.....	67
III.4.2. Tendances.....	68
<i>III.5. Exemples d'exploitation basés sur des véhicules traceurs</i>	68
III.5.1. Concept du véhicule traceur.....	68
III.5.2. MIGRAZUR.....	70
III.5.3. Le Travel Tag Program.....	70
III.5.4. Autres applications potentielles.....	72
<i>III.6. Incidents et fonctions d'alerte</i>	73
III.6.1. Détection et alerte.....	73
III.6.2. Enjeux de la gestion des incidents.....	74
III.6.3. Enjeux sur la sécurité.....	75
III.6.4. Description de la chaîne de gestion des incidents.....	75
III.6.5. La détection des incidents par les véhicules traceurs.....	76
III.6.6. Algorithmes de DAI basés sur des systèmes de communication route - véhicule.....	79
<i>III.7. Fonction de recueil de données</i>	83
III.7.1. Utilisation des données de temps de parcours.....	84
CHAPITRE IV : TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION ENTRE LES VEHICULES ET L'INFRASTRUCTURE	85
<i>IV.1. Technologies de communication infrastructure – véhicule :</i>	86
IV.1.1. La communication à courte portée par DSRC.....	87
IV.1.2. La communication par téléphonie cellulaire GSM.....	90
IV.1.3. La communication par RDS.....	93
IV.1.4. La diffusion par DAB.....	95
IV.1.5. La communication par WIFI.....	97
<i>IV.2. Techniques de localisation par satellites</i>	98
IV.2.1. La technologie GPS.....	98
CHAPITRE V : EVALUATION DES SYSTEMES DE COMMUNICATION INFRASTRUCTURE / VEHICULE	101
<i>V.1. Introduction</i>	102
<i>V.2. Des expérimentations à travers le monde</i>	102
V.2.1. Royaume Uni :.....	103
V.2.2. France.....	104
V.2.3. Allemagne.....	106
V.2.4. Etats-Unis.....	108
V.2.5. Japon.....	109
CONCLUSION	111

PARTIE III : LE SYSTEME AIDA	112
INTRODUCTION	113
CHAPITRE VI : DESCRIPTION DU SYSTEME AIDA	114
<i>VI.1. Historique</i>	115
<i>VI.2. Description du système AIDA</i>	115
VI.2.1. Architecture du système.....	115
VI.2.2. Les services.....	118
CHAPITRE VII : CONTRIBUTION AU RECUEIL DES DONNEES DYNAMIQUES	122
<i>VII.1. Introduction</i>	123
<i>VII.2. Analyse par simulation</i>	123
VII.2.1. Description de l'outil ARCHISIM.....	123
VII.2.2. Fichiers de sortie.....	124
VII.2.3. Scénarii	125
VII.2.4. Principe de la méthode	125
VII.2.5. Résultats	127
VII.2.6. Observations.....	128
VII.2.7. Validation de l'algorithme.....	128
<i>VII.3. Analyse de données réelles</i>	129
VII.3.1. Architecture du système	129
VII.3.2. Description du réseau équipé.....	129
VII.3.3. Recueil des temps de parcours.....	130
VII.3.4. Traitement des données	133
VII.3.5. Observations.....	133
VII.3.6. Comparaison des données AIDA avec d'autres sources.....	137
VII.3.7. Conclusions	144
<i>VII.4. Définition d'un algorithme pour la prévision des temps de parcours</i>	145
VII.4.1. Principe de l'algorithme	145
VII.4.2. Résultats des tests de l'algorithme de prévision des temps de parcours	146
VII.4.3. Validation de l'algorithme.....	146
<i>VII.5. Dimensionnement des échantillons de véhicules traceurs</i>	147
VII.5.1. Taille des échantillons	148
VII.5.2. Recueil de données	148
VII.5.3. Classification par niveau de service.....	148
VII.5.4. Application à l'itinéraire saint Arnoult – Orléans.....	149
VII.5.5. Taille des échantillons par rapport au débit total	151
VII.5.6. Eléments de réponse	151
<i>VII.6. Conclusions</i>	151
CHAPITRE VIII : CONTRIBUTION AUX FONCTIONS D'ALERTE	152
<i>VIII.1. Introduction</i>	153
<i>VIII.2. Analyse par simulation</i>	153
VIII.2.1. Objectifs.....	153
VIII.2.2. Hypothèses	153
VIII.2.3. Indicateurs de Mesure des modifications de comportement.....	154
VIII.2.4. Scénarii de simulation	155
VIII.2.5. Résultats	156
VIII.2.6. Observations.....	158
VIII.2.7. Evaluation de la performance d'algorithmes de DAI par simulation	158
VIII.2.8. Eléments de conclusion	161
<i>VIII.3. Analyse de données réelles</i>	161
VIII.3.1. Définition du type de comparaison.....	161
VIII.3.2. Définition des impacts et des objectifs attendus.....	162
VIII.3.3. Choix du site de test et description.....	162
VIII.3.4. Recueil de données et hypothèses	162
VIII.3.5. Calcul des temps perdus en situation d'accidents.....	163
VIII.3.6. Délai d'alerte	179

CHAPITRE IX : ELEMENTS D'EVALUATION ERGONOMIQUE DU SYSTEME AIDA.....	190
<i>IX.1. Introduction.....</i>	<i>191</i>
IX.1.1. Analyse de l'existant.....	191
IX.1.2. Description de l'évaluation ergonomique du système AIDA.....	191
IX.1.3. Résultats.....	192
IX.1.4. Prolongements.....	192
CHAPITRE X : ELEMENTS D'EVALUATION SOCIO-ECONOMIQUE.....	193
<i>X.1. Introduction.....</i>	<i>194</i>
<i>X.2. Horizon temporel.....</i>	<i>194</i>
<i>X.3. Critères d'évaluation.....</i>	<i>194</i>
X.3.1. Temps perdu.....	194
X.3.2. Sécurité.....	194
X.3.3. Confort des conducteurs.....	194
<i>X.4. Calcul des coûts.....</i>	<i>195</i>
X.4.1. Coûts du système AIDA.....	195
X.4.2. Coûts des retards annuels en situation d'accidents.....	196
X.4.3. Coût total des accidents.....	196
<i>X.5. Estimation des avantages.....</i>	<i>197</i>
X.5.1. Gains de temps annuels apportés par le système AIDA.....	197
X.5.2. Gains annuels de sécurité.....	200
X.5.3. Estimation totale des gains.....	206
<i>X.6. Evaluation économique :.....</i>	<i>206</i>
X.6.1. Hypothèses.....	207
X.6.2. Résultats.....	207
<i>X.7. Evaluation financière :.....</i>	<i>212</i>
X.7.1. Hypothèses.....	212
X.7.2. Résultats.....	212
X.7.3. Observations.....	215
<i>X.8. Limites de l'exercice.....</i>	<i>215</i>
X.8.1. Types de trafic.....	215
X.8.2. Incidence sur les temps de parcours.....	215
X.8.3. Impact sur la sécurité.....	215
<i>X.9. Perspectives de développement de services basés sur la technologie DSRC.....</i>	<i>216</i>
X.9.1. Enjeux fonctionnels.....	216
X.9.2. Enjeux technologiques.....	216
X.9.3. Enjeux organisationnels.....	216
X.9.4. Enjeux économiques.....	216
<i>X.10. Recommandations.....</i>	<i>217</i>
CONCLUSION GENERALE.....	218
BIBLIOGRAPHIE.....	221
GLOSSAIRE.....	226
ANNEXES.....	230
<i>Annexe I : Procédure automatique de traitement des fichiers AIDA.....</i>	<i>231</i>
<i>Annexe I : Format des fichiers de données AIDA brutes et traitées.....</i>	<i>237</i>
<i>Annexe III : Description des contrôleurs boucles et balises AIDA dans le modèle ARCHISIM.....</i>	<i>238</i>

INTRODUCTION GENERALE

« L'exploitation de la route est définie généralement comme l'ensemble des actions visant à rendre la circulation automobile aussi sûre, fluide et confortable que possible. Ce domaine aujourd'hui en pleine mutation, est confronté à des défis multiples : l'exigence générale d'une plus grande sécurité, l'augmentation permanente des encombrements, le besoin croissant de confort et d'information des usagers, la prise en compte des nouvelles technologies » (Vivet, 1989).

Les exploitants d'infrastructures font face à des difficultés telles que des saturations dues à des grands flux (grandes migrations de week-ends et de vacances), d'autre part à des incidents (accidents, véhicules en panne, travaux, événements météorologiques...). Ces congestions récurrentes et non récurrentes peuvent être traitées de différentes manières ; soit en augmentant l'offre des infrastructures, soit en exploitant d'une façon optimale le réseau routier existant. Compte tenu de la densité et du maillage du réseau routier français, les coûts de réalisation de nouvelles infrastructures deviennent prohibitifs et les procédures en amont des projets sont de plus en plus lourdes (déclaration d'utilité publique, expropriations, contraintes environnementales,...). L'exploitation routière est donc la solution privilégiée à court terme.

Dans le cadre du Schéma Directeur de l'Exploitation de la Route (SDER), une hiérarchisation du réseau routier français a été effectuée. Quatre niveaux ont été définis : un pour l'urbain et trois autres pour l'interurbain. Le premier niveau couvre les voiries des plus grandes agglomérations françaises. Le niveau 2 correspond aux corridors autoroutiers stratégiques (ex : Paris-Lille, Paris-Lyon-Marseille, Paris-Orléans,...) tandis que le niveau 3 regroupe les autoroutes concédées et non concédées qui ne sont pas classées dans le niveau 2.

Notre champ d'intervention concerne les sections autoroutières concédées qui sont couvertes par le niveau 2 de la classification du SDER.

L'exploitation de la route poursuit trois objectifs principaux : le maintien de la viabilité, la gestion du trafic et l'aide au déplacement des usagers.

Le maintien de la viabilité englobe toutes les interventions sur le terrain destinées, en cas de perturbation, à maintenir ou à rétablir des conditions d'utilisation de la voie les plus proches de la situation normale. Les principales missions de ce domaine sont la surveillance générale du réseau, les interventions d'urgence, la viabilité hivernale, l'organisation des interventions prévues (chantiers,..) et la maintenance des équipements. Traditionnellement, la surveillance du réseau s'effectue grâce à des stations fixes de mesure de trafic, des postes d'appel d'urgence, des caméras de télésurveillance, des patrouilles avec leurs moyens radio, des stations météorologiques et des équipements fixes de détection automatique d'incidents (DAI) qui peuvent déclencher des alertes. Le délai d'alerte revêt une importance primordiale dans la coordination des maillons d'une chaîne de gestion d'incidents. La sécurité étant une préoccupation essentielle, l'optimisation des mesures d'intervention en cas d'accidents matériels ou corporels est une tâche fondamentale.

La gestion du trafic regroupe la définition des moyens répondant à des perturbations nécessitant une action coordonnée de différents acteurs impliqués dans l'exploitation de la route. Elle s'appuie largement sur l'information routière dans le cadre d'actions préventives visant à modifier le comportement des usagers en termes de choix d'horaires de départ et d'itinéraires et aussi dans le cadre d'actions en temps réel à travers la diffusion d'informations au moyen de panneaux à

messages variables (PMV) et de radio et la mise en œuvre de stratégies d'exploitation adoptées suite à l'occurrence d'un événement ponctuel ou linéaire (bouchons, ralentissements, travaux, manifestations, accidents, incidents,..). Les mesures déclenchées peuvent se traduire par une déviation, un délestage, une sortie conseillée, un contrôle d'accès ou une régulation de vitesse. Ces stratégies revêtent une importance particulière dans un système d'exploitation de la route.

L'aide au déplacement des usagers représente l'ensemble des dispositions en vue de diffuser, par tout moyen existant, de l'information prévisionnelle ou actuelle sur les conditions de trafic. Dans le cadre de l'aide au déplacement, la qualité de service est traduite par les différentes prestations fournies aux usagers avant le déplacement (prévisions de trafic, alertes météorologiques,...) ou pendant le trajet (informations sur les conditions de circulation, indications sur les services d'assistance et de dépannage, aires de repos, stations carburants,..). Ces informations contribuent également à remplir la mission de gestion de trafic précédemment citée.

Dès la fin des années 60, le Centre National d'Information Routière a été créé afin d'assurer une mission d'information des usagers à propos de l'état de circulation prévalant sur les différents axes routiers et autoroutiers. Cette démarche s'est poursuivie par la mise en place de sept Centres Régionaux d'Information et de Coordination Routière (CRICR). Les années 70 ont été caractérisées par le déploiement de systèmes dynamiques de régulation de feux et de gestion de trafic. La disponibilité de l'information routière sur des supports tels que la radio, les PMV ou le minitel, est apparue au début des années 80. Depuis, des systèmes d'aide à l'exploitation routière (SAE) se sont développés en milieu urbain, périurbain et interurbain. Les systèmes SIRIUS en région parisienne, CORALY autour de Lyon et les outils intégrés d'exploitation des sociétés concessionnaires d'autoroutes en sont les meilleurs exemples.

Les progrès notables des NTIC (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication) ont favorisé l'émergence d'applications encore incertaines jusqu'à une date récente. Cette révolution technologique est en train de modifier les pratiques dans le monde des transports et particulièrement dans celui de l'exploitation routière. Le développement d'outils télématiques appelés aussi systèmes intelligents des transports (SIT) est perçu comme une réponse potentielle aux attentes permanentes d'amélioration de la sécurité et du confort des conducteurs, de mobilité durable et de maîtrise des contraintes environnementales.

Les services liés aux SIT sont foisonnants : systèmes de guidage et de navigation embarqués, services d'information interactifs, dispositifs anti-collision et de détection d'obstacles, systèmes de télépéage,...Ce déploiement génère actuellement de nouvelles formes de partenariat et de coopération entre acteurs privés et publics : des organismes de recherche, des industriels équipementiers, des constructeurs d'automobiles, des gestionnaires d'infrastructures routières, des opérateurs de services et des associations d'automobilistes.

Une innovation majeure issue de la télématique routière réside indéniablement dans l'avènement des systèmes embarqués à bord des véhicules. Le développement des technologies de communication entre la route et le véhicule laisse entrevoir une mise en œuvre de nouvelles pratiques d'exploitation différentes des modes actuels. L'utilisation des badges de télépéage, l'emploi des téléphones cellulaires ou encore la localisation des véhicules par satellites, peuvent s'imposer comme les éléments de base d'un nouveau système d'exploitation routière. Ces systèmes embarqués de communication route / véhicule sont généralement bidirectionnels et permettent d'établir un lien permanent en temps réel entre les gestionnaires d'infrastructures et les automobilistes équipés de tels dispositifs.

Actuellement, les systèmes d'aide à l'exploitation routière se fondent essentiellement sur l'utilisation d'équipements fixes pour le recueil de données et la surveillance des réseaux. L'emploi des véhicules équipés comme capteurs ou traceurs peut-il constituer une seconde source d'information complémentaire pour les exploitants, voire, d'une manière exclusive, une alternative potentielle aux outils existants de recueil de données ?

La question qui se pose alors est : ces nouveaux dispositifs sont-ils aptes à remplir les fonctions d'exploitation assurées par des systèmes classiques ?

Compte tenu de la diversité des problèmes à traiter dans ce cadre, une recherche pluridisciplinaire est nécessaire en termes d'ingénierie du trafic, d'analyse économique et d'ergonomie.

C'est à une telle recherche que contribuent nos travaux dans cette thèse. Celle-ci a pour objet principal l'exploration des potentialités des systèmes embarqués à remplir des missions d'exploitation. Ceci permet de tirer des enseignements sur :

- La comparaison avec des outils classiques de recueil de données afin de permettre aux décideurs d'arbitrer sur l'allocation de certains nouveaux investissements relatifs aux équipements de la route ;
- La justification économique du déploiement de nouveaux dispositifs embarqués dans le cadre de la conception de systèmes d'aide à l'exploitation de la route ;
- L'optimisation des politiques d'équipement et de densification des réseaux autoroutiers ;
- La prise en compte, dans le cadre des méthodes d'évaluation des systèmes de communication route / véhicule, des critères ergonomiques des dispositifs étudiés et des aspects comportementaux associés.

Les interrogations sont multiples sur les coûts de ces systèmes, leurs effets sur la sécurité, leur incidence sur le confort des conducteurs et leur perception par les utilisateurs. Les travaux de cette thèse tentent d'apporter des réponses à ces questions et alimentent l'expertise dans les domaines du SDER.

Le contexte de notre étude (le réseau autoroutier de COFIROUTE) en détermine la spécificité : il s'agit d'une étude exploratoire des potentialités d'un système embarqué de communication visant à valider son intégration dans une politique d'exploitation routière en milieu interurbain.

Nous nous appuyerons sur l'exemple du dispositif AIDA (Application pour l'Information Des Autoroutes) basé sur une communication sol / véhicule à courte portée similaire à celle du télépéage.

Notre hypothèse est que des bénéfices sensibles pour les usagers comme pour les exploitants devraient résulter de son déploiement.

Les travaux de cette thèse s'articulent autour de trois parties :

- **La description des pratiques classiques d'exploitation de la route** : dans cette partie sont abordées en premier les caractéristiques de l'exploitation de la route en termes de variables macroscopiques de trafic, de niveaux et de domaines d'exploitation du SDER. Les structures opérationnelles prenant part à l'exploitation de la route sont décrites. Des tâches comme le recueil, le traitement de données et la diffusion d'informations, sont détaillées. Ensuite, le contexte de l'étude nous conduit à énumérer les exigences d'exploitation d'un réseau routier concédé en milieu interurbain (chapitre I). D'autre part, nous recensons les différentes catégories d'évaluation des actions d'exploitation routière : les aspects techniques, l'acceptation par l'utilisateur, l'évaluation des impacts, l'approche socio-économique et financière. Ces catégories d'évaluation sont illustrées à travers des exemples de méthodes définies de manière standard, à l'échelle européenne avec les guides EVA, CONVERGE et la méthode des 12 étapes et en France avec les travaux de l'association des sociétés françaises d'autoroutes (chapitre II).
- **Les systèmes de communication entre l'infrastructure et les véhicules** : les fonctionnalités des systèmes embarqués à bord des véhicules sont décrites dans cette seconde partie. Ceci a permis de les classer par types : dispositifs autonomes, systèmes de diffusion par zone, émetteurs / récepteurs de messages provenant de l'infrastructure, aides au guidage et à la navigation. D'autre part, le concept du véhicule traceur est présenté. Nous citons également des exemples d'exploitation, basés sur ce mode, opérationnels ou en cours de développement : le programme Travel Tag aux Etats-Unis par exemple. Ensuite, les principales fonctions d'exploitation (au sens du SDER) que peuvent remplir les systèmes de communication véhicule / infrastructure, sont répertoriées. Elles vont de la détection et l'alerte jusqu'au recueil de données dynamiques (chapitre III).
 Un inventaire des technologies de communication qu'utilisent ces systèmes, est fourni dans le chapitre IV, par exemple la localisation par satellite, l'identification automatique des véhicules par communication à courte portée, la localisation basée sur la téléphonie cellulaire et la diffusion numérique d'informations par voie hertzienne.
 Le dernier chapitre (chapitre V) de cette partie est consacré à la présentation d'expérimentations de systèmes coopératifs entre la route et les véhicules menées en Europe particulièrement en France, en Allemagne et au Royaume Uni ; aux Etats-Unis et au Japon. Des éléments d'évaluation d'impacts de ces dispositifs sont également référencés.
- **L'étude du cas du système AIDA (Application à l'Information Des Autoroutes)** : cette partie met l'accent sur les potentialités d'un système basé sur une communication à courte portée, à remplir des missions d'exploitation dans des conditions réelles de fonctionnement. C'est l'application AIDA déployée sur une section autoroutière exploitée par la société COFIROUTE. En premier, l'architecture fonctionnelle et les services fournis par ce dispositif sont décrits (chapitre VI). Dans le chapitre suivant (chapitre VII), une tâche importante pour les gestionnaires d'infrastructures est abordée. Il s'agit du recueil de données dynamiques. Cette fonctionnalité est examinée à travers des scénarii de simulation et aussi par une analyse de données de temps de parcours en conditions réelles de circulation. À la suite de cet exercice, nous proposons un algorithme de prévision de temps de parcours recueillis par des véhicules traceurs équipés de badges de télépéage. Cette approche est ponctuée par un calcul d'échantillons nécessaires à l'obtention d'une estimation fiable des temps de parcours. Pour cela, une méthode générale de dimensionnement statistique de flottes de véhicules traceurs est présentée. Elle est déclinée, par la suite, selon les niveaux de services prévalant sur la section autoroutière étudiée. Le fonctionnement dans des conditions de trafic dégradées est décrit au chapitre VIII à travers

la contribution des véhicules traceurs aux fonctions de détection automatique d'incidents et d'alerte. De même que pour le chapitre précédent, des analyses par simulation et de durées réelles d'incidents permettent d'estimer les temps perdus annuels en mode dégradé. Cette étude détaillée nous amènera, au chapitre IX, à nous prononcer sur l'acceptabilité de ce système en termes de qualités ergonomiques et de convivialité d'utilisation. Nous y donnons également des éléments de coûts de l'ensemble des éléments constituant le système AIDA. Une valorisation monétaire des bénéfices obtenus par la diminution des durées d'accidents, grâce aux potentialités de ce dispositif, est décrite. À la fin de cette troisième partie, des recommandations et des perspectives de développement de services complémentaires au système de télépéage existant actuellement en France sont mentionnées.

Nous espérons pouvoir conclure à juste titre en faveur de l'aptitude du système étudié à assurer des fonctions fondamentales de l'exploitation routière en milieu interurbain.

PARTIE I

**LES PRATIQUES CLASSIQUES D'EXPLOITATION DE
LA ROUTE**

INTRODUCTION

Dans cette première partie, nous faisons l'exposé des pratiques classiques existantes au niveau de l'exploitation de la route. Quelques généralités et définitions seront données pour faciliter la lecture (I, 1 à 9). Nous précisons ensuite le contexte dans lequel se déroulera notre recherche (I, 10). Le deuxième chapitre concerne l'évaluation, sa méthodologie, ses difficultés (II, 1 et 2). Une brève description des méthodes d'évaluation utilisées aux Etats-Unis (II, 3) et en Europe (II, 4) nous permettra de préciser la spécificité des problèmes tels qu'ils se posent en France (II, 5), de proposer quelques améliorations de l'évaluation (II, 6).

CHAPITRE I
EXPLOITATION DE LA ROUTE

I.1. Définition

L'exploitation de la route est définie comme fédérant toutes les actions destinées à améliorer ou faciliter l'utilisation d'un réseau routier existant.

Généralement, on distingue l'exploitation routière de l'aménagement ou de l'entretien des infrastructures.

I.2. Variables de base

Les principales variables de base permettant de modéliser le trafic routier et de valoriser les régimes de circulation sont divisées en deux catégories :

- des grandeurs macroscopiques qui prennent en compte un flot de véhicules sur une section de route ;
- des variables microscopiques, dans le cas où les véhicules seraient pris individuellement.

Ces éléments sont décrits ci dessous :

I.2.1. Débit

Le débit représente le nombre de véhicules ayant franchi un point entre deux instants donnés. Il peut être déterminé, soit par de simples comptages manuels, soit à l'aide de stations automatiques. Il existe plusieurs types de débit : le débit journalier moyen annuel, le débit moyen horaire et le débit moyen de l'heure de pointe

Pour certaines études, on peut avoir recours à des échelles temporelles plus faibles que l'heure comme le débit '6 minutes' utilisé dans l'étude des fluctuations d'une journée ou dans l'heure.

I.2.2. Vitesse

La vitesse caractérise le mouvement des véhicules qui composent le trafic. Elle s'exprime généralement en kilomètres à l'heure.

A l'inverse du débit, qui est une notion relativement abstraite pour le conducteur, la vitesse est une grandeur lui permettant de percevoir directement les conditions de circulation sur son trajet. En effet, sur la base d'une vitesse moyenne et de la longueur de l'itinéraire, l'utilisateur peut estimer son temps moyen de parcours.

Il existe plusieurs types de vitesses :

- la vitesse instantanée qui est mesurée individuellement sur un véhicule en un point donné et sur une faible durée. Cette notion est souvent utilisée dans les études relatives à la consommation d'énergie et à l'environnement ;

- la vitesse moyenne temporelle qui est la moyenne arithmétique des vitesses instantanées des véhicules ; pendant une période de temps donnée.
- la vitesse moyenne spatiale qui est la moyenne arithmétique à un instant donné, des vitesses instantanées des véhicules présents sur une section de route ;
- la vitesse moyenne d'écoulement libre qui est la vitesse maximale pratiquée par un seul ou un ensemble de véhicules sur une section de route. Cette grandeur, appelée aussi vitesse à vide est souvent une variable d'entrée dans les modèles de simulation de trafic.
- la vitesse moyenne praticable est la vitesse de parcours réalisable pour un intervalle de temps donné. Elle est mesurée sur le terrain en utilisant la technique du 'véhicule flottant'¹ ou comme variable de sortie dans les simulations.

I.2.3. Concentration

Ce paramètre exprime la répartition des véhicules dans l'espace. Il représente le nombre de véhicules présents, à un instant donné, sur une longueur unité d'une voie ou de l'ensemble des voies d'une route affectées à la circulation automobile. Cette grandeur est exprimée en véhicules au kilomètre.

La concentration est évaluée quantitativement à travers une autre variable aisément mesurable appelée : taux d'occupation. Celle ci, calculée à l'aide de boucles magnétiques enfouies dans la chaussée, est sans dimension et décrit la proportion de temps durant laquelle le capteur est occupé par le véhicule.

L'expression qui lie la concentration k et le taux d'occupation τ est :

$$k = \tau / (L + l)$$

où L et l désignent respectivement la longueur moyenne des véhicules et celle du capteur.

I.2.4. Capacité

La capacité est le nombre maximal de véhicules ayant une chance raisonnable d'être écoulés pendant une période déterminée, sur une section de route avec ses caractéristiques d'infrastructure et de circulation existantes. Elle s'exprime généralement en véhicules par heure.

Les caractéristiques d'infrastructure englobent les facteurs géométriques, les procédés d'aménagement ainsi que la visibilité et la météorologie.

Les caractéristiques de circulation intègrent la composition du trafic par catégories de véhicules et le motif du déplacement.

Il est difficile d'appréhender l'effet de chacun de ces facteurs sur la capacité. Ainsi, on utilise souvent la notion de *capacité pratique* qui correspond plutôt à un débit horaire moyen de saturation

¹ Technique de mesure du temps de parcours moyen entre deux points par un véhicule témoin, consistant à circuler normalement sur le réseau en s'insérant dans le flux de circulation des véhicules et en dépassant sur l'ensemble du parcours autant de fois qu'il a été lui même dépassé (SETRA, 1996).

et non au débit maximal observé exceptionnellement au cours d'une période de saturation (Service d'Etudes Techniques Routières et Autoroutières - SETRA, 1992).

La capacité d'une section homogène peut être estimée à l'aide de plusieurs approches :

- l'analyse des débits maxima basée sur l'observation des maxima de trafic, enregistrés sur une section donnée. La valeur moyenne de ces maxima fournit une estimation du débit de capacité.
- l'ajustement des courbes taux d'occupation - débit - vitesse caractérisé par la notion de "diagramme fondamental" : représentation de la relation liant le débit au taux d'occupation.
- à partir de l'intervalle de temps inter-véhiculaire où l'on suppose que le trafic est composé d'un mélange de véhicules libres et de véhicules gênés. Les véhicules libres peuvent atteindre leur vitesse désirée tandis que les autres voient leur vitesse imposée par celle du véhicule de tête. Cette répartition de l'écoulement du trafic, appliquée à la distribution des intervalles de temps entre les véhicules, conduit à une estimation de la capacité. L'inverse de l'écart de temps moyen entre véhicules gênés constitue en effet une estimation du débit maximum (Cohen, 1993).

Le tableau ci dessous décrit les valeurs de capacité pratique selon les différents types de route en France :

Type de route	Caractéristiques géométriques	Capacité pratique (véh/h)	Conditions
Routes bidirectionnelles	5 m	1300	- rase campagne
	6m	1600	- terrain plat
	7m	2000	- pas de carrefour important
	9m	2500	- répartition du trafic entre les deux sens : 60% - 40%
	10.5m	2700	
Routes à deux chaussées	Autoroutes à 2 × 2 voies et routes à 2 × 2 voies assimilées ²	3000	Rase campagne ³
	Autoroutes à 2 × 3 voies et routes à 2 × 3 voies assimilées	4500	

Tableau n° I.1 - La capacité pratique selon les différents types de route (Source : SETRA, 1992)

² La capacité des autres routes à 2 × 2 voies, comportant des carrefours plans, et accès riverains éventuellement est un peu plus faible (en section courante) mais elle est surtout fortement limitée, en pratique, par la capacité des feux.

³ A l'approche des grandes agglomérations, comme les autoroutes périurbaines, ces seuils sont plus élevés du fait de la proportion très importante du trafic d'habitues.

I.2.5. Temps de parcours

On distingue, généralement, trois types de temps de parcours :

Temps de parcours instantané (TPI) : c'est la somme sur un trajet donné, à un instant donné, des temps (fictifs) que mettraient à parcourir chaque section du trajet, des véhicules partant à cet instant avec une vitesse constante égale à la vitesse moyenne actuelle sur la section.

Temps de parcours réalisé (TPR) : c'est le temps réalisé par un véhicule sortant du réseau à l'instant considéré. Il peut être calculé en temps réel comme le TPI. Il est pertinent pour les statistiques relatant l'évolution du trafic.

Temps de parcours reconstitué ou prévu (TPP) : Il s'agit du temps que va mettre un véhicule entrant à un instant donné pour parcourir la section considérée. C'est l'indicateur le plus intéressant pour l'exploitation routière.

I.3. Niveau de service

Les aspects liés à la théorie du trafic et ses applications ont un rôle de plus en plus déterminant dans les domaines de l'investissement et de l'exploitation routière.

Dans ce contexte, les éditions du 'Highway Capacity Manual' (HCM) de 1965, 1985 et 1994 ont montré le besoin d'améliorer l'analyse du service rendu par la route au travers notamment d'un concept nouveau appelé 'niveau de service'.

Le niveau de service, au sens large du terme, exprime une infinité de combinaisons des facteurs qui caractérisent l'environnement routier des usagers sur un itinéraire ou une section de route donnée : conditions de circulation, qualité du revêtement, de la signalisation, présence de structures d'accueil, diffusion d'information routière...

Dans le *Highway Capacity Manual* (HCM), le niveau de service est défini comme une quantification des conditions d'écoulement du trafic et leur perception par les usagers de la route en fonction des caractéristiques physiques de l'infrastructure et du contexte d'exploitation. Cette notion met en valeur et suit l'évolution de l'ensemble des services et efforts fournis en permanence par l'exploitant qui sont, au retour, constatés par les usagers comme résultats plus ou moins satisfaisants.

Le niveau de service peut être mesuré quantitativement à travers plusieurs facteurs tels que la vitesse, le temps de parcours moyen, la variabilité des temps de parcours, le débit, les perturbations de trafic, la liberté de manœuvre ou le confort de conduite, la sécurité,...

Dans ce contexte, les niveaux de service sont généralement classés en fonction de valeurs limites de certains facteurs (débit, vitesse).

Du point de vue de l'utilisateur, de faibles débits rencontrés sur son parcours lui procurent des niveaux de service plus élevés que des débits plus forts sur le même itinéraire.

Dans les différentes versions du HCM, six niveaux de service sont définis en fonction de la variation de la vitesse et du débit. Ce classement est effectué par des lettres allant de A jusqu'à F et signifiant des meilleures conditions de circulation aux plus mauvaises.

Pour les infrastructures à écoulement continu telles que les autoroutes, il existe six niveaux de service :

- **Le niveau de service A** correspond à un écoulement libre avec des débits faibles et des vitesses élevées. La densité de la circulation est faible. Les vitesses ne sont soumises qu'à la volonté des conducteurs, aux limitations de vitesse et aux caractéristiques physiques de la route.
- **Le niveau de service B** décrit une zone d'écoulement stable, avec des vitesses praticables auxquelles les caractéristiques de la circulation commencent à imposer de légères diminutions.
- **Le niveau de service C** se situe aussi dans une zone d'écoulement stable mais les vitesses et la liberté des manoeuvres sont plus étroitement sous la dépendance des débits élevés. Une grande partie des automobilistes subit des atteintes à leur liberté de choix de vitesse, de changement de voie ou de dépassement.
- **Le niveau de service D** se rapproche de l'écoulement instable. Il maintient des vitesses praticables admissibles mais sérieusement affectées par les modifications qui interviennent dans les conditions de circulation. Les conducteurs ont une liberté de manoeuvre très réduite.
- **Le niveau de service E** ne peut être décrit en se référant à la vitesse seule. Il décrit un fonctionnement à des vitesses plus basses que celles relatives au niveau D et des débits proches de la capacité de la route. La liberté de manoeuvre est très faible. De surcroît, le régime d'écoulement est instable.
- **Le niveau de service F** correspond à un fonctionnement en écoulement forcé à faibles vitesses. Les débits étant inférieurs à la capacité, la section de route considérée joue le rôle d'une zone d'accumulation pendant une grande partie de la période de pointe. La vitesse et le débit peuvent être tous les deux égaux à zéro.

A partir d'une combinaison de la vitesse moyenne, du débit rapporté à la capacité de l'infrastructure et de la concentration des véhicules, les niveaux de service qui sont en vigueur aux Etats-Unis sont décrits dans le tableau suivant :

Niveau de service	Vitesse moyenne	Concentration	Débit / Capacité
-------------------	-----------------	---------------	------------------

	(Km/h)		(Veh/voie/km)	Capacité \cong 2000 veh/voie/h
Niveau A	> 113	100%	< 6	< 0.30
Niveau B	> 113	100%	< 10	< 0.49
Niveau C	> 110	97%	< 15	< 0.71
Niveau D	> 101	89%	< 20	< 0.88
Niveau E	> 93	82%	< 25	< 1.00
Niveau F	< 93	82%	\geq 25	

Tableau n° I.2 - Caractéristiques des niveaux de service pour une autoroute interurbaine
(Source : HCM, 1994)

En France, il n'existe pas de classification équivalente à celle du HCM. Cependant, pour qualifier les conditions de circulation moyennes, caractérisant la gêne des automobilistes, on se réfère aux seuils d'encombrement. Ceux-ci sont exprimés en terme de débit et dépendent de la distance de visibilité (SETRA, 1992).

I.4. Niveaux d'exploitation

Quatre niveaux ont été définis pour hiérarchiser les voies du réseau routier français : un niveau pour l'urbain et trois niveaux pour l'interurbain. Ils sont décrits comme suit :

- le niveau 1 correspond aux voiries des plus grandes agglomérations françaises. Il est subdivisé en deux parties : le niveau 1A concerne les quatre grandes villes : Paris, Marseille, Lyon et Lille. Le niveau 1B représente les voies rapides d'agglomérations de taille moindre ;
- le niveau 2 intègre les corridors autoroutiers stratégiques et les liaisons frontalières avec l'Italie et l'Espagne ;
- le niveau 3 également subdivisé en deux sous-niveaux : le niveau 3A concerne les autoroutes concédées non classées en niveau 2. Le niveau 3B regroupe les sections de route caractérisées par des perturbations temporaires ou saisonnières.

On associe aux niveaux 1, 2 et 3 des plans de gestion de trafic.

- le niveau 4 regroupe tous les réseaux où le maintien de la viabilité reste l'objectif principal.

Dans le cadre de la présente recherche, on ne s'intéressera qu'aux infrastructures de niveaux 2 et 3A.

Cette hiérarchisation effectuée par le SDER se base sur l'analyse des paramètres ci dessous :

- capacité des voies
- niveau de trafic : Trafic Moyen Journalier Annuel (TMJA), périodes de pointe....
- nature, fréquence et ampleur des perturbations
- conséquence géographique des perturbations
- nombre de partenaires concernés.

La démarche proposée par le SDER suit la logique suivante :

- Les missions propres à chaque domaine de l'exploitation de la route sont décrites au travers d'un certain nombre d'indicateurs caractéristiques des prestations fournies par le Service d'exploitation de la route (ex : délai d'intervention, annonce préalable des chantiers, gestion du trafic dans certaines plages horaires,..) ;
- Chaque niveau d'exploitation est décrit dans le détail par ces indicateurs, ce qui permet de savoir quelle est la prestation qui doit être fournie. Ceci permet ensuite de déterminer les organisations et les moyens appropriés.

I.5. Domaines d'exploitation du SDER

Le Schéma Directeur d'Exploitation de la Route (SDER) a identifié trois domaines d'exploitation routière qui sont décrits ci dessous :

I.5.1. Maintien de la viabilité

Le maintien de la viabilité regroupe l'ensemble des tâches 'in situ' consistant, en cas de perturbation, à maintenir ou à rétablir des conditions d'utilisation de la voie les plus proches de la situation nominale. De surcroît, ce domaine comprend aussi l'information d'alerte des usagers sur les difficultés immédiates (alerte de proximité).

Les principales missions dans le domaine de la viabilité sont :

- La surveillance générale du réseau qui est caractérisée par un délai d'alerte (intervalle de temps entre l'occurrence de l'événement et sa prise de connaissance par le gestionnaire du réseau). Ceci permet de constater les perturbations et de définir les besoins d'intervention adéquats ;
- Les interventions d'urgence caractérisées par un délai d'intervention (intervalle de temps entre l'instant où la perturbation est connue par l'exploitant et le début effectif de l'intervention). Ces actions recouvrent des opérations de dépannage, de déblaiement et de secours ;
- Le service hivernal qui revêt une importance particulière et bénéficie depuis longtemps d'une organisation adaptée à la surveillance des réseaux ;
- L'organisation des interventions prévisibles (travaux et manifestations,..) ;
- La maintenance des équipements.

I.5.2. Gestion du trafic

La gestion de trafic regroupe l'ensemble des actions visant, dans le cadre d'objectifs prédéfinis, à répartir et contrôler les flux de trafic dans le temps et dans l'espace, afin d'éviter l'apparition des perturbations ou d'en atténuer les effets.

Dans ce domaine, les principales missions sont :

- La préparation de la gestion des flux de trafic en vue de définir des stratégies d'action ;

- Les mesures préventives avant le déplacement parmi lesquelles l'information routière avant le voyage occupe une part importante et vise à modifier le comportement des usagers (choix des itinéraires , des horaires,..) ;
- Le traitement en temps réel des flux de trafic : la réduction des effets des perturbations à travers le contrôle d'accès et/ou de vitesse, la gestion des barrières de péage, l'affectation des voies, les itinéraires de délestage et l'information des usagers pouvant aller jusqu'à la prescription., le stockage des Poids Lourds ;

Les missions de ce domaine sont décrites ci-dessous :

Définition des plans de gestion de trafic (PGT)

Ce sont les tâches d'une action coordonnée de différents services intervenant dans l'exploitation de la route, qui sont mis en œuvre suite à des perturbations.

Actions préventives

Elles se basent essentiellement sur l'information routière en vue de modifier le comportement des usagers (choix des itinéraires, des horaires..) et ceci en fonction des prévisions de trafic.

Actions en temps réel

Elles sont l'une des actions les plus importantes d'un système d'exploitation. En effet, il existe deux sortes de mesures d'exploitation en fonction de la nature de l'événement :

Evénements non ponctuels

Ce sont essentiellement les perturbations météorologiques. Dans ce cas, les actions envisagées sont la diffusion de l'information à travers les radios locales et les PMV (Panneaux à Messages Variables). La densité des messages sur ces derniers devra être conforme aux principes d'élaboration des messages d'information routière dynamique préconisés par le guide PMV [SETRA, 1994].

Ceci nécessite la mise en place de PMV en section courante et aussi des modalités contractuelles avec les radios locales.

Les informations sont fournies par les stations météo, les rapports de patrouilles ou de la vidéosurveillance.

Evénements ponctuels ou linéaires

Ce sont les bouchons, ralentissements, travaux, manifestations, accidents, incidents et obstacles. Dans ce cas, les mesures de gestion de trafic adoptées sont :

- la déviation mise en place en cas de coupure totale d'un sens de la circulation. Elle peut être une sortie obligatoire dans un cas d'urgence ou une sortie programmée associée à un guidage permettant de revenir sur l'itinéraire ;
- le délestage dont l'objectif est de prévenir ou de retarder l'apparition de congestions et aussi d'équilibrer la charge du réseau. Cette mesure est applicable au trafic de transit et d'échange. Son principe consiste à conseiller aux usagers arrivant sur une section du réseau d'emprunter une autre partie différente de l'itinéraire habituel ;

Ceci implique la connaissance en temps réel de l'évolution du trafic sur les différents itinéraires et aussi des réserves de capacité résultantes après un événement (nombre de voies bloquées,...) ;

- les itinéraires de substitution qui sont des parcours relativement courts et destinés plutôt aux habitués. Ils sont souvent associés à des mesures de délestage et leur utilisation nécessite des outils de recueil de données pour suivre leur réserve de capacité ;
- la "sortie conseillée" qui est préconisée en cas de saturation prévue et de courte durée. Elle est destinée en priorité aux usagers connaissant le réseau associé proche. Ceci constitue une mesure de renfort de la signalisation d'information ;
- la limitation de circulation ou l'affectation de voie par pictogrammes (ex : flèches vertes, jaunes et croix rouges) montés sur portiques. Ce dispositif est employé en cas d'incident sur une voie avant de procéder aux opérations de balisage ;
- le basculement de chaussée rarement pris en compte dans les politiques d'exploitation mais qui peut être effectué sous le contrôle strict des forces de police ;
- la régulation de vitesse fortement recommandée en cas de congestion récurrente en vue d'homogénéiser le trafic ;
- la régulation d'accès par panneaux d'information ou par feux tricolores et parfois la fermeture par barrière ;
- l'information des usagers en temps réel qui doit être diffusée sur le réseau de niveau 1 en amont des points de choix entre deux itinéraires autoroutiers ou deux modes de transport concurrents. Dans d'autres cas, elle est affichée à l'entrée du réseau où le choix est possible entre le réseau rapide et le réseau urbain. Cette information est affichée sur des panneaux à messages variables alphanumériques. Cependant, d'autres moyens prometteurs d'information sur les conditions de circulation sont le panneau d'information graphique, l'information radio et les systèmes embarqués que nous étudierons dans notre deuxième partie.

I.5.3. Aide au déplacement

L'aide au déplacement représente l'ensemble des dispositions visant à diffuser, par tout moyen existant, de l'information prévisionnelle ou actuelle sur les conditions de trafic.

- l'information prévisionnelle sur les conditions de circulation telle que : les chantiers , les manifestations, les mauvaises conditions météorologiques ;
- l'information en temps réel sur l'état de la circulation et sur les perturbations qui surviennent.

I.5.4. Equipement

Dans le cadre de l'exploitation routière, nous recensons les équipements associés à chacun des secteurs suivants :

- Recueil de données et surveillance du réseau : stations de comptage, stations météo, caméras de vidéo surveillance, RAU (Réseau d'Appel d'Urgence) ;
- Réseaux de télécommunications et d'énergie ;
- Traitements et supervision : commande, DAI (Détection Automatique d'Incidents), synoptique, superviseur / PC et son architecture, autres aides ;
- Dispositifs de gestion du trafic, de sécurité et d'information des conducteurs : radios, PMV, fermeture automatique de voie en accès, biseaux de rabattement, flèches lumineuses, contrôle d'accès, signalisation variable dédiée, bornes d'information sur aire, outils télématiques, systèmes embarqués (Radio Data System – Traffic Message Channel ou RDS-TMC,..) ;
- Patrouilleurs.

I.6. Les structures dans le domaine de l'exploitation routière

I.6.1. Centre d'information et de gestion du trafic

Le CIGT est une structure opérationnelle chargée d'élaborer la stratégie d'exploitation, de coordonner les interventions sur le terrain et d'organiser l'information routière sur une zone géographique ou un axe.

Les missions des CIGT se résument en deux aspects :

- Planification et études : analyse statistique du fonctionnement du réseau ; élaboration de la politique d'exploitation ; programmation des équipements nécessaires à l'exploitation ; planification et organisation des chantiers et des convois ; évaluation des opérations d'exploitation ; coordination de la maintenance des équipements dynamiques.
- Activités en temps réel : recueil et traitement des données concernant l'état du réseau ; activation des mesures d'exploitation ; diffusion de l'information ; contrôle et suivi en temps réel du bon fonctionnement des équipements de gestion de trafic.

Chaque CIGT est compétent pour mettre en œuvre des mesures courantes pré-établies de gestion du trafic sur une portion de réseau bien définie. Il s'appuie pour cela sur les centres d'entretien et d'intervention (CEI) décrits ci-dessous.

I.6.2. La veille qualifiée

La fonction "veille" vise à offrir un point d'entrée unique et permanent dans l'organisation des gestionnaires d'infrastructures (DDE ou Directions Départementales de l'Équipement, Villes et SCA ou Sociétés Concessionnaires d'Autoroutes), en cas d'accident ou d'incident sur le réseau. De surcroît, elle a pour rôle de :

- mobiliser des équipes de maintien de la viabilité à la demande des services d'intervention (CRS, Gendarmerie, Pompiers, SAMU – Service d'Aide Médicalisée d'Urgence...);
- orienter vers les interlocuteurs compétents, dans le cas où le service n'est pas concerné ;
- faire fonctionner les matériels du CIGT.

La veille est assurée par certaines catégories d'agents et professionnels de la route qui sont censés recevoir une formation spécifique.

I.6.3. La Salle Opérationnelle

Une situation de crise s'établit quand il y a occurrence d'un événement grave qui perturbe durablement la circulation. Dans ce cas, la Salle Opérationnelle est considérée comme un support logistique qui centralise l'information en temps réel et permet aux responsables de piloter la mise en œuvre opérationnelle des plans de gestion de trafic. Elle constitue un lieu de décision des mesures d'exploitation qui dépassent les prérogatives du CIGT.

I.6.4. Les Centres d'Entretien et d'Intervention (CEI)

Les CEI assurent des tâches opérationnelles de "maintien de la viabilité" et participent à la mission "gestion du trafic" en coordination avec le CIGT.

Les autres actions des CEI sont :

- l'exploitation sous chantier ;
- la surveillance des équipements des ouvrages (GTC ou Gestion Technique Centralisée des tunnels et viaducs) ;
- la maintenance des équipements.

I.6.5. Les patrouilles

Les tâches dévolues aux patrouilles sont de :

- surveiller le réseau routier ;
- intervenir en cas d'accidents ou d'incidents ;
- fournir une aide aux usagers de la route (alerte, protection arrière, appel pour dépannage,...).

Le véhicule du patrouilleur est généralement un fourgon dont l'arrière est équipé d'un PMV mobile. Son matériel est du balisage de première urgence, des outils d'intervention (extincteurs...), de l'outillage de réparation des équipements de la route.

I.6.6. Le CNIR et les CRICR

Ces organismes ont pour fonction essentielle l'organisation de la diffusion des informations sur les conditions de circulation. Il existe sept Centres Régionaux au niveau inter-régional : CRICR (Centre Régional d'Information et de Coordination Routière) de Bordeaux, Créteil, Lille, Lyon; Marseille, Metz, Rennes ; et un CNIR (Centre National d'Information Routière) au niveau national. Ces centres sont co-gérés par trois ministères : Transport, Défense, Intérieur. Ils sont opérationnels 24H / 24 et 7 jours sur 7.

Ces centres d'information assurent plusieurs fonctions allant du recueil de l'information jusqu'à sa diffusion vers l'utilisateur final :

- au niveau du recueil des données, ils doivent optimiser les échanges avec les sources d'information (police, gendarmerie, gestionnaires de voirie, météorologie) ;
- en termes de traitement de données, ils mettent en forme l'information reçue et développent les moyens d'analyse en veillant à la pertinence et la cohérence des informations à diffuser ;
- au stade de la diffusion, ils doivent fournir des informations adaptées aux besoins d'opérateurs grâce aux nouvelles technologies (audiotex, vidéotex, systèmes embarqués, Internet,...) et à différents niveaux de diffusion (local, régional, national et international).

Ces organismes d'information routière ont de surcroît une mission de gestion du trafic en milieu interurbain en matière de coordination des actions d'exploitation exceptionnelles : déviation, délestage, migrations saisonnières.

D'autre part, la fonction de prévision est caractérisée à l'échelle nationale par BISON FUTE. Dans ce cadre, le développement des modèles prévisionnels de trafic devrait favoriser l'application de cette fonction aux niveaux locaux.

La mise en place dans les centres d'information routière du système TIGRE a pour objectifs de mettre à disposition des outils adaptés aux échanges d'information et de faciliter l'analyse et le traitement des données de trafic.

I.7. Recueil de données

Il existe plusieurs types de données :

- le recueil d'informations sur des accidents ou des incidents, nécessitant une intervention d'urgence, est essentiellement assuré par les PAU (Poste d'Appel d'Urgence) et les patrouilles ;

- les variables de trafic mesurées par les stations de comptage : débit, vitesse, taux d'occupation, pourcentage de poids lourds, matrices origine - destination, temps de parcours, concentration spatiale ...;
- les données concernant la route et son environnement ; on distingue :
 - les prévisions météorologiques ;
 - les données issues des capteurs météorologiques (distance de visibilité, températures et humidité relative de l'air, précipitations, vent...);
 - les données issues de capteurs routiers (ex : température et salinité de la chaussée, température de congélation..)
 - des données diverses recueillies par exemple par des détecteurs d'avalanches ou des détecteurs de crues, données issues d'observations- terrain...)

I.8. Traitement des données

Les traitements liés aux données de trafic d'une part et aux données météo d'autre part sont résumés ci dessous :

I.8.1. Données de trafic

La visualisation des comptages (débits, vitesses, taux d'occupation) constitue la plus grosse part en matière de traitement. Les premières générations de ce type d'applications ne faisaient que de l'affichage numérique des valeurs mesurées que l'opérateur devait alors interpréter. Des développements plus récents prennent en charge une partie de ces interprétations et permettent même dans certains cas de visualiser l'évolution temporelle des comptages, en présentant les valeurs mesurées sous forme de courbes ou d'histogrammes.

D'autre part, des systèmes de Détection Automatique d'Incidents (DAI) et de Bouchons (DAB) sont développés. Dans ce cadre, des algorithmes observent les discontinuités dans l'écoulement du trafic provoquées par la réduction de capacité due à un incident. Ils déclenchent alors une alarme. Leur implantation nécessite souvent un équipement dense du réseau, selon la technologie choisie, en stations de comptages ou en caméras de traitement d'images. Par conséquent, ils sont réservés à des points particuliers du réseau.

I.8.2. Données météo

Les pratiques de traitement de données pour la météorologie routière sont diverses :

- l'interprétation directe soit par l'exploitant soit par le prévisionniste, après constat des valeurs affichées par les capteurs atmosphériques (température de l'air, vent...) ou des informations données par les patrouilles (état des routes). Ces constatations sont ensuite confrontées avec d'autres sources de données ;

- les traitements spécifiques des données par les services de la météorologie en vue d'établir les prévisions à court et moyen terme

Cette chaîne de traitement permet de fournir des données à l'utilisateur, dans des échéances de quelques heures (ex : images de satellites toutes les heures selon le format, bulletins de prévision établis plusieurs fois par jour).

I.9. Diffusion des informations

Les moyens de diffusion sont choisis en fonction des objectifs de l'exploitation et de leur utilisation en temps réel ou en temps différé (pendant ou avant le déplacement). Cette tâche de diffusion appelle quelques définitions de base décrites ci dessous.

I.9.1. Définitions de base

- **L'information routière** est l'ensemble des éléments sur les conditions de trafic actuelles ou prévisibles, l'état des routes et l'impact des conditions météorologiques, les phénomènes perturbateurs du trafic et aussi les recommandations aux usagers de la route.
- **L'information sur le trafic d'actualité** concerne la situation temporaire de la circulation à un point précis du réseau routier. A ce titre, les informations urgentes de trafic en cours sont les premières informations d'actualité qui doivent être diffusées immédiatement.
- **L'information prévisionnelle sur le trafic** fait référence aux perturbations prévisibles de trafic sur la base d'événements connus tels que les travaux, les manifestations, les pointes récurrentes.
- **Le bulletin de trafic** est une synthèse pour une zone routière importante, établie sur la base des dernières informations de trafic recueillies.
- **La prévision de trafic** est un pronostic sur le déroulement et les contraintes de trafic à prévoir.
- **L'information sur l'état des routes** conditionne la praticabilité ou la fermeture d'un tronçon routier. Les informations urgentes sur l'état des routes sont les premières informations d'actualité qui doivent être diffusées immédiatement.
- **Le bulletin sur l'état des routes** est une synthèse pour une zone routière importante établie sur la base des dernières informations sur l'état des routes.
- **La prévision sur l'état des routes** est un pronostic sur l'état prévisible des routes.
- **L'alerte météo** est une information sur les conditions météo à venir dans un délai proche ou par surprise, conditions pouvant déboucher sur de graves perturbations de la circulation: fortes chutes de neige, verglas,..

I.9.2. Services

L'offre de services s'articule autour de trois types d'informations :

- informations liées au réseau et à la circulation qui couvrent essentiellement les bouchons, chantiers, temps de parcours prévisibles, itinéraires de délestage, prévisions de trafic, sécurité, accidents, limitation de vitesse, conditions météorologiques ;

- guidage des véhicules selon un trajet optimal qui est un service personnalisé englobant les horaires de départ ou d'arrivée, temps minimal, distance minimale, attrait touristique de l'itinéraire ;
- informations génériques et connexes au voyage intégrant les parcs de stationnement, les correspondances avec les transports publics, stations services, garages, restaurants, hôtels et informations touristiques.

Certains moyens de communication sont totalement maîtrisés par l'exploitant (ex : radio d'information routière, PMV...) alors que d'autres font intervenir des tiers, de sorte que l'exploitant ne peut intervenir ni sur la formulation du message, ni sur les délais de diffusion (ex : cas des radios génériques et non dédiées à l'information routière).

1.10. Exigences d'exploitation pour un réseau concédé en milieu interurbain

Dans cette recherche, nous nous intéressons particulièrement aux autoroutes concédées de niveau 2 et 3A d'exploitation où une chaîne cohérente de moyens de recueil de données est préconisée sur l'ensemble du corridor (autoroute et réseau associé). Les moyens de recueil de données pour ce type d'infrastructures sont décrits dans le tableau ci après :

niveaux d'exploitation / Outils de recueil de données		2	3A
Espacement entre PAU		2 km ou moins sur les lieux de contrainte	2 km
Patrouilles		Systematiques et fréquentes 24H/24	Systematiques plusieurs fois par jour
Recueil données trafic	Stations de comptage	Plan d'implantation sur tout le corridor afin de connaître l'état du trafic en temps réel	Plan d'implantation sur l'itinéraire avec en moyenne 1 station tous les 20 km, à moduler selon les sections de trafic homogène, les lieux de contrainte...
	Caméras	Sur les lieux de contraintes fortes lorsque il y a nécessité de compléter la connaissance de l'état du trafic	
	Observations aériennes	En complément aux autres moyens dans le cadre d'une surveillance régionale	
Recueil données météo		Bulletins météorologiques, équipements spécialisés sur les zones à risque, à moduler selon les besoins de connaissance de l'incidence de la météo sur les conditions de trafic	
Autres : détecteurs d'avalanches, de crues, de chutes de pierres...		Equipements spécialisés sur les zones à risque	

Tableau n° I.3 – Moyens de recueil de données (source : rapport CERTU – 1996)

Nous abordons dans ce qui suit les exigences, définies par le SDER, inhérentes à l'exploitation d'un réseau concédé en milieu interurbain. Ce type d'infrastructures correspond à la fois aux niveaux d'exploitation 2 et 3A décrits précédemment. Les tableaux suivants donnent une description détaillée de chacun de ces deux niveaux d'exploitation selon les valeurs des indicateurs relatifs aux trois domaines d'exploitation : maintien de la viabilité, gestion de trafic et aide au déplacement.

VIABILITE	GESTION DU TRAFIC	AIDE AU DEPLACEMENT
<p><u>Surveillance générale du réseau</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Surveillance systématique et permanente • Délai d'alerte sur accidents ou incidents réduisant la capacité de la voie défini avec les partenaires <20mn <p><u>Interventions d'urgence :</u> (y compris l'information d'alerte de proximité)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Organisées 24H/24 avec délai d'intervention < 20 mn <p><u>Chantiers</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Planification et organisation en fonction du trafic avec prise en compte de la gêne à l'utilisateur <p><u>Maintenance des équipements</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Préventive et corrective sous délai <p><u>Convois et manifestations</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pris en compte avec organisation et contraintes fortes lorsque possible 	<p><u>Préparation de la gestion des flux de trafic</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Elaboration de plans de gestion du trafic <p><u>Actions préventives (avant le déplacement)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Gérées en fonction de l'évolution des prévisions de trafic <p><u>Traitement en temps réel des flux de trafic</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Traitement 24H/24 	<p><u>Information prévisionnelle sur les conditions de circulation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Trafic : annonce préalable de la perturbation de trafic puis mise à jour en fonction de l'évolution des événements • Chantier : annonce préalable du chantier puis mise à jour en fonction des conditions d'exploitation sous chantier • Manifestation : annonce préalable de la manifestation puis mise à jour en fonction de l'évolution de l'événement • Route et météo : annonce préalable par zones puis mise à jour en fonction de l'évolution des prévisions <p><u>Information temps réel sur les conditions de circulation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Délai (à partir de l'alerte) < 20 mn ; 24H/24

Tableau n° I.4 – Exploitation de niveau 2 (source SDER - SETRA)

VIABILITE	GESTION DU TRAFIC	AIDE AU DEPLACEMENT
<p><u>Surveillance générale du réseau</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Surveillance systématique organisée avec astreinte en dehors des heures de service • Délai d'alerte sur accidents ou incidents réduisant la capacité de la voie défini avec les partenaires < 30mn <p><u>Interventions d'urgence :</u> (y compris l'information d'alerte de proximité)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Organisées 24H/24 avec délai d'intervention de jour < 30 mn ; de nuit < 45 mn <p><u>Chantiers</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Planification et organisation en fonction du trafic <p><u>Maintenance des équipements</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Préventive et corrective sous délai <p><u>Convois et manifestations</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pris en compte 	<p><u>Préparation de la gestion des flux de trafic</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Elaboration de plans de gestion du trafic <p><u>Actions préventives (avant le déplacement)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Mises en œuvre selon calendrier <p><u>Traitement en temps réel des flux de trafic</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pendant les heures de service et possibilité d'élargissement de la plage d'intervention en cas de perturbation prévisible ou d'ampleur exceptionnelle 	<p><u>Information prévisionnelle sur les conditions de circulation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Trafic : annonce préalable de la perturbation de trafic puis mise à jour en fonction de l'évolution des événements • Chantier : annonce préalable du chantier puis mise à jour en fonction des conditions d'exploitation sous chantier • Manifestation : annonce préalable de la manifestation puis mise à jour en fonction de l'évolution de l'événement • Route et météo : annonce préalable par zones puis mise à jour en fonction de l'évolution des prévisions <p><u>Information temps réel sur les conditions de circulation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Organisée et avec délai (à partir de l'alerte) < 40 mn 24H/24 sur les perturbations aléatoires

Tableau n° I.5 – Exploitation de niveau 3A (Source SDER - SETRA)

Les moyens d'information routière en temps réel, définis pour les niveaux 2 et 3A du SDER, et leurs caractéristiques sont respectivement décrits ci-après :

	2	3A
PMV sur véhicule	Indispensable	
PMV	Plan d'implantation et choix des équipements à moduler en fonction des objectifs du système d'information des usagers	
Points d'information	Oui sur axes concernés par les grandes migrations saisonnières selon le calendrier	
Bornes télématiques d'information	Plan d'implantation en fonction du système d'information des usagers	
Tracts	Distribution en fonction du système d'information des usagers	
Radios	Spécialisée avec maîtrise du libellé des messages et de leur diffusion en temps réel ou possibilité de messages d'information routière à intervalles réguliers sans maîtrise absolue	
Minitel	3615 ROUTE et autres	
Réponses téléphoniques	Au CRICR et dans des services spécialisés auprès des exploitants	
Répondeurs	En complément des réponses téléphoniques	

Tableau n°I.6 - Moyens d'information en temps réel pour les infrastructures routières de niveaux 2 et 3A du SDER

		Caractéristiques de l'information	Maîtrise de l'info par les gestionnaires du réseau ou les CRICR	Délai de diffusion	Action volontaire de l'utilisateur pour recevoir l'info	Difficulté d'obtention par l'utilisateur
Avant le déplacement	Courrier	Personnalisée	Oui	Long	Oui	Facile
	Presse écrite, Télévision	Générale	Non	Moyen	Oui	Difficile de connaître les jours et heures de diffusion
	Panneaux d'annonces, documentation, cartes	Générale	Non	Long	Oui	Facile
	Téléphone, audiotel	Personnalisée	Oui	Immédiat	Oui	Facile
	Minitel	Générale et personnalisée	Oui	Immédiat	Oui	Nécessité d'être équipé d'un terminal
	Radio	Générale	Non	Moyen	Oui / non	Difficile de connaître le moment de diffusion
	Internet	Générale	Oui	Immédiat	Oui	Facile
Pendant le trajet	Radio dédiée à l'information trafic (FM 107.7)	Ensemble d'informations générales et ciblées	Oui	Moyen	Oui / non	bulletins d'info trafic toutes les 15 mn donc connaissance facile du moment de diffusion
	PMV	Courte et ciblée	Oui	Immédiat	Non	Facile
	Panneaux fixes ou installés sur des mobiles	Courte, précise et ciblée	Oui	Long ou moyen	Non	Facile
	Tracts, bornes, points d'information	Ensemble d'informations générales et ciblées	Oui	Moyen	Oui	Facile mais nécessite un arrêt
	Equipements embarqués	Personnalisée	Oui	Immédiat	Oui / non	Equipement nécessaire

Tableau n° I.7 - Caractéristiques des moyens d'information en temps réel

CHAPITRE II

L'EVALUATION, METHODOLOGIES ET DIFFICULTES

II.1. Généralités

Le mot 'évaluation' correspond à l'action d'évaluer. Ce qui signifie déterminer la valeur, le prix ou l'importance d'une chose.

Quand on essaye de mesurer les impacts d'une action d'exploitation routière, on se trouve souvent confronté à des difficultés liées à la méthode ou à la méthodologie d'évaluation.

L'évaluation est un domaine vaste. Il convient de distinguer selon le facteur temporel deux familles d'évaluation : l'évaluation *a priori* ou *ex-ante* qui vise à évaluer un projet avant sa mise en œuvre. Ceci consiste à identifier et estimer les impacts potentiels d'une ou de plusieurs variantes d'un projet ; l'évaluation *a posteriori* ou *post-ante* dont l'objectif est d'estimer les avantages d'un projet après son déploiement afin de vérifier l'adéquation entre les objectifs initialement fixés au projet et ses effets après la mise en place. Ceci consiste à confronter les résultats obtenus (effets observés,...) à des attentes initiales afin de juger de la bonne conduite du projet et l'adéquation aux espérances.

L'évaluation est effectuée en comparant toujours une situation de référence (existante) à une situation projetée ou prévisionnelle.

L'évaluation socio-économique des actions d'exploitation de la route est considérée comme une approche relativement récente. Elle est largement inspirée de la démarche d'évaluation dans le domaine des investissements routiers résumée ci dessous. Toutefois, dans le domaine de l'exploitation de la route, on est confronté à des difficultés de déclinaison pratique de la méthode d'évaluation socio-économique et notamment en termes de valorisation monétaire des critères comme la fluidité, la sécurité ou le confort.

La méthodologie d'évaluation socio-économique des projets routiers en rase campagne (construction, aménagement) est régie par une circulaire qui a évolué en fonction de la conjoncture économique et sociale du pays.

Chronologiquement, il existe quatre circulaires relatives à l'évaluation des investissements routiers et qui ont été éditées respectivement en 1974, 1980, 1986 et 1998.

La première, celle de 1974, est une analyse coût- avantages classique. En 1980, on introduit deux critères quantifiés supplémentaires : un bilan énergétique global intégrant l'investissement, l'exploitation et la circulation, et un indicateur de réduction des nuisances.

La circulaire de 1986 préconise une approche multicritères. Enfin, la plus récente (1998) recommande un calcul coût-avantages qui prend en compte pour la première fois les nuisances liées à la pollution de l'air et à l'effet de serre.

Le rapport Boiteux II établi en 2001, retient par exemple pour la valeur du temps, une variation linéaire de celle-ci en fonction de la distance. Le tableau suivant donne ces valeurs pour le milieu interurbain :

Distance	d < 50 Km	50 Km < d < 400 Km	d > 400 Km
Valeur du temps	8,4 €	$(d/10+50).1/6,56$	13,7 €

Tableau n° II.1 - Valeurs du temps par voyageur pour la route en milieu interurbain (en euros par heure)
(Source : Rapport Boiteux n°2 - 2001)

II.2. Catégories d'évaluation

Les évaluations s'effectuent par des méthodes différentes selon les pays et se basent soit sur des mesures sur site, soit sur des études par modélisation ou enfin sur des estimations par des experts.

Les catégories d'évaluation sont choisies en accord avec le commanditaire de l'étude qui peut être une administration publique, un gestionnaire d'infrastructures, une association d'automobilistes.

Il existe plusieurs types d'évaluation : technique, d'acceptation par l'utilisateur, d'impacts, socio-économique et financière. Chacun d'eux est décrit ci-dessous.

II.2.1. Evaluation technique :

C'est le niveau le plus élémentaire qui évalue la performance du système d'exploitation en termes de temps de retard, de réponse et de taux de panne. L'évaluation technique intéresse essentiellement l'exploitant du système. Elle est entreprise au cours des tests de validation des différents composants du système et aussi après sa mise en service. Cette approche permet de conditionner le coût du système et de le comparer avec d'autres dispositifs concurrents.

Les principaux critères d'évaluation sont le temps moyen 'MTBF' entre les pannes (Mean Time Between Failure) et le temps moyen MTTR pour réparer (Mean Time To Repair). La collecte des données s'effectue en laboratoire et à travers des tests en vraie grandeur.

Les résultats d'une évaluation technique peuvent amener à décider de soumettre le système étudié à une évaluation complémentaire qui examinerait ses impacts.

II.2.2. Evaluation de l'acceptation par l'utilisateur

Cette évaluation a pour objectif de cerner le comportement des utilisateurs exploitants ou conducteurs et leur perception du système examiné. Elle est généralement basée sur des questionnaires et des interviews. Les résultats sont, pour les conducteurs, exprimés sous forme de bénéfices perçus en termes d'amélioration de la sécurité, du confort, de réduction des coûts de fonctionnement des véhicules, des gains de temps et d'ergonomie du système. En revanche, l'acceptation par les exploitants d'un système est fortement conditionnée par les résultats d'une

évaluation technique ou d'impact du système considéré. De plus, l'ergonomie du système à exploiter peut aussi jouer un rôle prépondérant dans la perception finale.

II.2.3. Evaluation des impacts

Elle consiste à mesurer ou à estimer les effets d'un système sur par exemple : la sécurité, l'efficacité du transport ou l'environnement. Ceci est effectué pour chaque agent économique appelé aussi 'groupe- cible' susceptible d'être affecté : les conducteurs, les opérateurs du système et la collectivité.

Les impacts à évaluer et les groupes- cibles à étudier sont choisis en fonction du contexte décisionnel.

L'évaluation des impacts repose sur des essais sur le terrain ou sur des calculs de simulation. Généralement, les résultats servent comme données d'entrée pour l'évaluation socio-économique ou interviennent dans le processus décisionnel.

II.2.4. Evaluation socio-économique :

Elle a pour but de comparer les coûts engendrés par un système aux bénéfices qui découlent de son déploiement. Plusieurs études font état de deux approches principales relatives à l'évaluation socio-économique : l'analyse multicritères et l'analyse coût - avantages (Cf. Figure n°II.1).

Le choix de l'une des deux dépend du degré de quantification ou de valorisation des critères caractérisant les objectifs assignés au système examiné. Néanmoins, la volonté d'agréger l'ensemble des critères quantifiés n'est pas toujours possible.

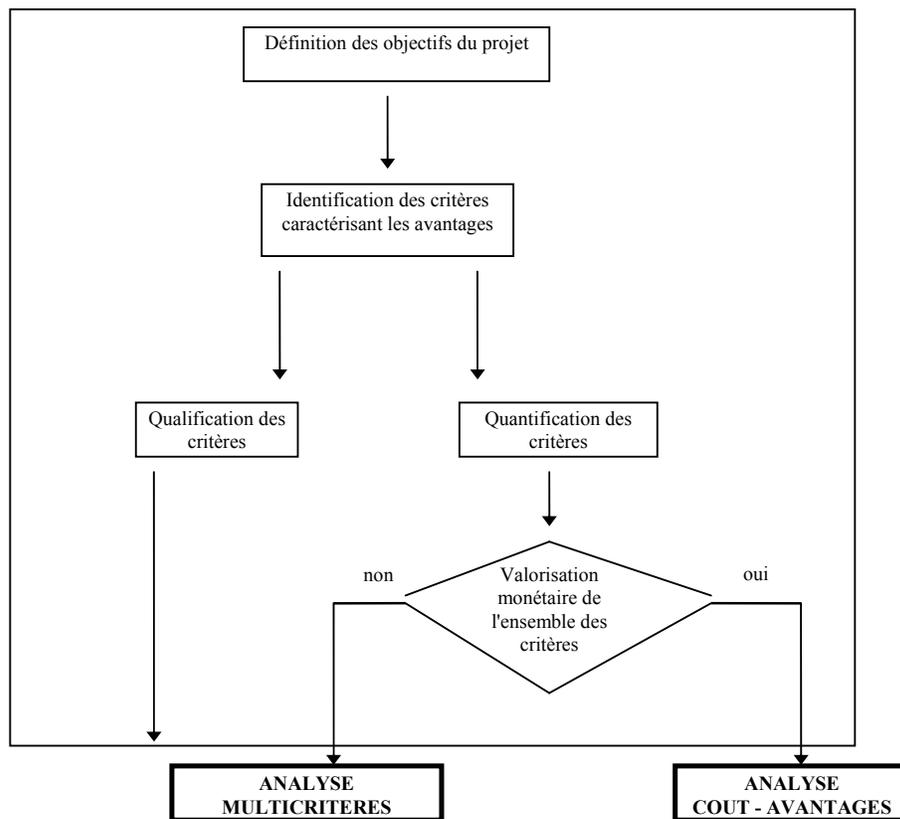


Figure n° II.1 - Méthodologie d'évaluation socio-économique

II.2.4.1. Analyse multicritères

L'analyse multicritères consiste à évaluer un index d'efficacité ou d'utilité à partir de l'agrégation de plusieurs critères affectés de coefficients pondéraux. Ces critères peuvent être combinés en vue de déterminer une seule valeur de décision ou plusieurs valeurs traitées séparément sans agrégation.

La valorisation des critères revêt deux formes, d'exigence croissante :

- la forme ordinale quand on se contente d'attester que les effets de telle action sont préférables à ceux de telle autre au regard d'un certain critère ;
- la forme cardinale quand on peut leur associer un indicateur quantitatif qui reflète l'intensité des préférences du décideur sur le critère considéré.

L'analyse multicritères quantitative est souvent une approche coût - efficacité.

L'efficacité est exprimée par une somme pondérée des effets du projet, soit $\sum E_j P_j$, où les poids P_j traduisent l'importance attachée aux critères si ceux-ci sont comparables ou de 'normaliser' leurs unités respectives s'ils ne sont pas comparables.

Ainsi, les rapports de poids ont un rôle de taux de substitution entre critères. Ceci permet d'avoir un étalon unique de valeur, qui peut être implicitement l'unité quelconque de l'un des critères retenus.

Les coûts sont estimés, dans le cadre d'une analyse coût - efficacité, dans leur unité naturelle en termes monétaires tandis que les impacts sont mesurés d'abord dans des unités variées, puis transformés dans une seule échelle cardinale (ERTICO – European Road Telematics Implementation Coordination Organisation, 1996).

On appréhende l'efficacité totale E d'un système comme suit :

$$E = \sum E_j P_j = \sum F_j (I_j) P_j$$

où : E_j : efficacité partielle

P_j : coefficient de pondération de l'efficacité partielle E_j

I_j : indicateur relatif à l'efficacité partielle E_j

F_j : fonction d'évaluation (ou de valorisation) transformant l'indicateur I_j en efficacité partielle.

L'efficacité totale et le coût total d'un ou plusieurs systèmes conditionnent le choix du dispositif à implanter. On peut être confronté à l'un des scénarii suivants :

- Si tous les systèmes concurrents ont le même coût, on choisira celui qui a la plus grande efficacité totale ;

- Inversement, si l'efficacité totale des systèmes est similaire, on choisira celui dont le coût est le plus faible ;
- Dans tous les autres cas de figure, on s'exerce à comparer et à choisir à l'intérieur d'un domaine d'acceptabilité délimité par une efficacité minimale et un coût maximal (cf. fig. II.2)

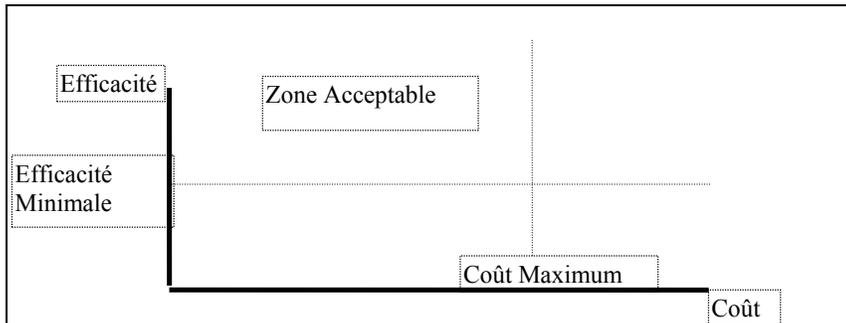


Figure n° II.2 - Principaux critères d'investissements pour une analyse coût – efficacité

Une analyse d'utilité se distingue d'une approche coût - efficacité dans la mesure où dans la première, le coût est considéré comme une efficacité négative et donc pour chaque solution alternative, une seule valeur d'utilité est déterminée. Ainsi, cette dernière sert comme critère de base pour comparer et choisir la solution la plus adéquate.

II.2.4.2. Analyse coût - avantages

L'analyse coût-avantages apprécie une décision en fonction de la somme de ses effets 'monétisés'. Ainsi, elle généralise le critère classique du profit financier en considérant aussi bien les effets marchands que non marchands du projet (Walliser, 1990). Elle consiste à quantifier au préalable les avantages attendus de chaque nature, puis à traduire ou à convertir ces quantités d'avantages en une seule valeur unitaire telle que l'euro.

L'analyse coût - avantages est basée sur le calcul du bilan socio-économique du projet qui est exprimé comme suit, soit par un ratio, soit par une différence :

$$R = \frac{\sum_{t=0}^{T-1} At(1+i)^{-t}}{\sum_{t=0}^{T-1} Ct(1+i)^{-t}} \quad (1+i)^{-t}$$

et

$$D = \sum_{t=0}^{T-1} \frac{(At - Ct)}{(1+i)^t} \quad (1+i)^t$$

où :

R : ratio entre les avantages et les coûts

D : différence entre les avantages et les coûts

T : durée de vie du projet prédéfinie (horizon temporel de l'évaluation)

A_t : représente les avantages monétaires estimés pour l'année t

C_t : représente les coûts estimés pour l'année t

i : taux d'actualisation, fixé par le Commissariat Général du Plan.

Le rapport 'Boiteux' n°1 (Boiteux, 1994) recommande, dans l'évaluation des projets de transport, de se baser sur quatre principaux critères quantitatifs de décision dans les analyses coût – avantages :

- *Le bénéfice net actualisé (ou valeur actuelle nette)* : somme effectuée au taux d'actualisation du Plan (8% aujourd'hui) des avantages monétisés du projet, diminuée de toutes les dépenses d'investissement et de fonctionnement actualisées à la même date.
- *La date optimale de mise en service* : c'est la date pour laquelle le bénéfice actualisé est maximal. Sous certaines hypothèses, on montre qu'à cette date, le rapport de l'avantage net de l'année de mise en service au coût d'investissement est égal au taux d'actualisation. On appelle ce rapport, le taux de rentabilité immédiate.
- *Le taux de rentabilité interne* est le taux d'actualisation qui annule le bénéfice net actualisé (ou valeur actuelle nette). On retient les projets dont le taux de rentabilité interne est supérieur ou égal au taux d'actualisation du Plan.
- *Le bénéfice actualisé par franc investi* est le rapport entre le bénéfice actualisé et le coût d'investissement.

II.2.5. Evaluation financière

Les logiques des évaluations socio –économique et financière sont différentes : la première évalue l'intérêt du projet pour la collectivité, alors que la seconde est une démarche en termes de sondages d'excédents bruts d'exploitation et de flux de trésorerie afin de connaître le retour sur investissement d'un projet ou d'une application. A l'inverse de l'approche coût -avantages, on ne prend en compte que les impacts internes à l'application qui seront par la suite convertis en valeurs monétaires.

Cette catégorie d'évaluation est, pour l'opérateur du système et les investisseurs, parfois plus pertinente que l'analyse coût -avantages.

Enfin, une étude de sensibilité est recommandée pour tester les effets de la variation d'un ou plusieurs des paramètres pris en compte. A ce stade, on pourra dégager une plate forme de recommandations aux décideurs de l'implantation du système.

Enfin, il existe d'autres méthodes spécifiques se basant sur des analyses d'utilité, d'aspects légaux et institutionnels, et des études marketing.

II.3. Exemples d'évaluation aux Etats Unis

La FHWA (Federal Highway Administration) a effectué une étude globale sur les impacts des systèmes intelligents appliqués aux transports qui sont mis en œuvre aux Etats Unis. Ceci consistait à élaborer une synthèse des résultats d'évaluation élaborés par les différents acteurs du transport intelligent : constructeurs automobiles, gestionnaires d'infrastructures, universités.

Ainsi, le guide de la Direction des Routes américaine (FHWA, 1996) met l'accent sur les principaux effets attendus des Systèmes de Transport Intelligent (STI). Ceux-ci sont relatifs aux actions d'exploitation suivantes : le contrôle des feux de carrefours, gestion des incidents, la régulation d'autoroutes, gestion du trafic de transit, l'information des usagers et le Télépéage.

Dans la plupart des évaluations, le critère prépondérant est le gain de temps. Ainsi, les bénéfices en terme de temps de parcours sont considérables particulièrement pour les opérations de régulation d'autoroutes et de gestion d'incidents.

Le tableau ci-dessous dresse une vision globale des impacts des systèmes évalués en fonction d'un certain nombre de critères :

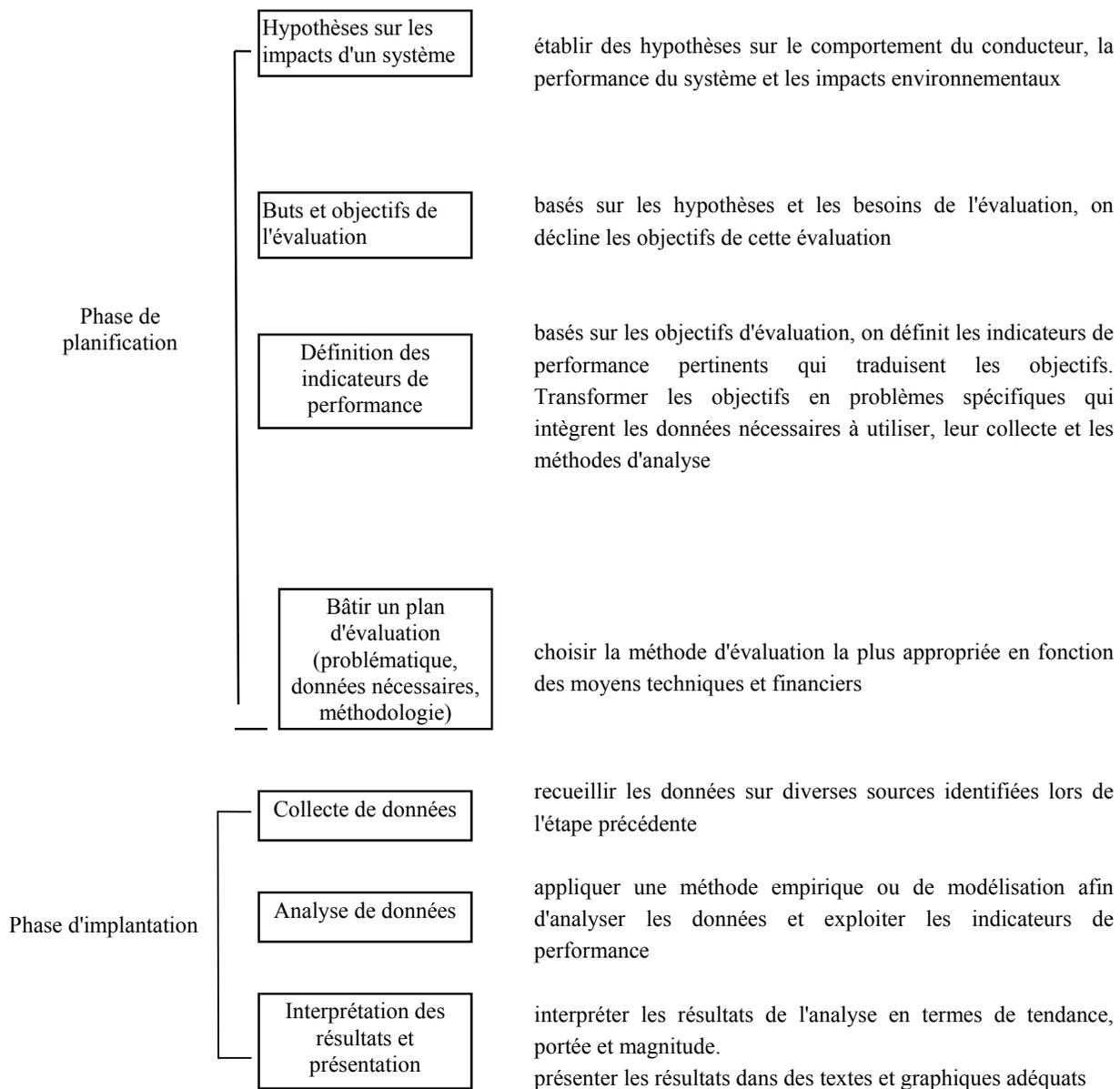
Critère	Temps de parcours	Vitesse de parcours	Capacité	Taux d'accidents	Consommation de carburant	Pollution de l'air (région de Detroit)	Arrêts de véhicules	Retard
Système								
Gestion du trafic de transit	↓15%-18%							
Régulation d'autoroutes	↓20%-48%	↑16%-62%	↑17%-25%	↓15%-50%	↓41%	↓CO 122 KT/an ↓HC 1.4 KT/an ↓NO 1.2 MT/an		
Contrôle des feux	↓8%-15%	↑14%-22%		↓	↓6%-10%	↓CO 5%-13% ↓HC 4%-10%	↓0%-35%	↓17%-37%
Gestion des incidents	↓10%-42%			10%				
Information des usagers	↓8%-20%				↓6%-12%	↓HC 33% ↓NO 1.5%		↓1900 vehxh/incident
Télépéage			↑250%		↓6%-12%	↓CO 72% ↓HC 83% ↓NO 45%		

Tableau n°II.2 - Impacts des STI aux Etats Unis (source : FHWA - 1996)

(↓ : réduction ; ↑ : augmentation)

FHWA et 'ITS Joint Program' ont lancé plusieurs études afin d'estimer les bénéfices des applications ITS.

D'autre part, une autre référence (Goodman, 1996) présente les concepts et la méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux en termes d'émission et de consommation de carburant. Ce type d'évaluation est intégré à celles liées aux impacts sur le comportement du conducteur pendant le trajet (choix d'itinéraire) et sur la performance du système. Les auteurs proposent un processus d'évaluation en deux phases et sept étapes, illustré par le schéma suivant :



Les objectifs d'évaluation utilisés habituellement, s'articulent autour de la détermination de:

- l'échelle spatiale (unité géographique de base) et temporelle (durée) de l'étude ;
- la portée de l'évaluation (microscopique ou macroscopique) ;
- l'estimation des impacts sur le comportement du conducteur, sur la performance du réseau (fluidité, sécurité et confort) et aussi sur les émissions de polluants et la consommation de carburant.

D'une table générique, qui montre les impacts des ITS sur le comportement du conducteur et l'efficacité du réseau routier, on a extrait les impacts des systèmes embarqués d'information. Il existe des effets directs et indirects, à savoir :

- des effets certains sur le choix de la destination, sur le choix et la planification de l'itinéraire;
- des effets incertains sur la fluidité du trafic au niveau du corridor, de l'autoroute, du réseau parallèle et du péage ; la distance du trajet et le temps de parcours.

Les deux indicateurs de base pour l'évaluation d'un système d'aide au déplacement (guidage ou autres) sont : la vitesse moyenne spatiale et le nombre de véh-km parcourus. Par exemple, un système embarqué de guidage permet d'une part, d'influencer les conducteurs sur leur choix d'itinéraire pour éviter des zones congestionnées mais d'autre part, augmente globalement le nombre de véh-km dans le réseau.

D'autres indicateurs sont communément utilisés dans l'évaluation des projets ITS : volume de trafic (débit), temps de parcours, nombre de trajets, longueur du trajet, heure de départ, choix modal, choix d'itinéraire, durée de retard, longueur de bouchon, durée de l'incident et le style de conduite.

La première étape de l'évaluation est de définir la problématique qui implique la traduction des objectifs d'évaluation en exigences et spécifications pour les besoins en collecte et en analyse de données puis l'interprétation des résultats.

La seconde étape de l'évaluation est de déterminer les méthodes pour obtenir les indicateurs de performance. La sélection de ces méthodes se base sur :

- des considérations techniques (faisabilité technique, efficacité, forces et faiblesses des méthodes et capacités des méthodes analytiques qui sont disponibles pour l'évaluation) et sur le plan expérimental ;
- des moyens nécessaires tels que la disponibilité des données, la demande en données, le coût de la collecte des données, les options d'analyse et aussi le temps nécessaire pour l'étude ;
- un plan expérimental qui englobe les niveaux de pénétration dans le marché, la performance du service pour l'utilisateur.

Avant de choisir une méthode d'analyse, le niveau de détail doit être déterminé en fonction des facteurs cités ci dessus et des objectifs de l'évaluation, la portée, l'échelle et les attentes des 'évaluateurs'.

L'analyse des données est une étape essentielle dans le processus d'évaluation. La méthode choisie qui peut être soit une analyse empirique soit une modélisation ou une combinaison des deux. Elle peut être compliquée par des aspects liés au comportement humain tels que le consentement à payer un service, la fréquence d'usage, le taux de pénétration au marché, le degré d'adéquation. Dans la pratique, il existe un écart considérable entre les outils d'analyse nécessaires et ceux qui sont disponibles.

II.4. Cadre d'évaluation en Europe

Plusieurs projets européens ont été consacrés à l'évaluation : DRIVE EVA (1992), CORD (1994) qui abordait les impacts sur la sécurité, le confort et l'environnement, et puis CONVERGE (4^{ème} PCRD ou Programme Cadre de Recherche et Développement) donnant une série de recommandations en vue de bâtir un plan de validation rigoureux. Ces programmes sont décrits succinctement dans ce qui suit :

II.4.1. Guide EVA

Dans le cadre du programme européen de recherche et développement DRIVE, le projet 'EVA' vise à définir une méthode d'évaluation applicable à tous les projets de télématique routière et permettant de les comparer aux projets de création d'infrastructures routières.

Les catégories d'évaluation identifiées dans le cadre du projet EVA sont résumées dans le tableau suivant :

Catégories	opérationnelle	stratégique	Socio-économique
Type d'évaluation	évaluation technique de l'efficacité intrinsèque	évaluation des stratégies à long terme à un niveau politique	Evaluation économique des impacts sociétaux
Objectif	détermination de la meilleure solution technique	estimation du potentiel et des risques à long terme	indication de la valeur sociétale
Variantes à évaluer	options techniques individuelles	toutes les technologies	projets impliquant des investissements publics
Perspectives	Contrôle et optimisation d'une solution technique	Bâtir les bases d'un développement cohérent	Allocation optimale de ressources limitées
Résultat	Enseignements sur la performance technique du système	Appréciation des retombées à long terme	Identification des gains et des pertes pour la société

Tableau n° II.3 – Catégories d'évaluation (source : document EVA, 1991)

Ainsi, le guide méthodologique 'EVA Manual' (EVA, 1991) aborde l'aspect socio-économique de l'évaluation des applications télématiques. Il préconise l'utilisation d'une analyse coût-avantages lorsque tous les gains de l'action ou du système évalué, peuvent être 'monétarisables'. Dans le cas contraire, une analyse multicritères de type coût-efficacité est recommandée.

Le guide 'EVA Manual' est considéré comme un outil d'aide à la décision en matière de choix d'investissements entre, par exemple, modifier les caractéristiques géométriques d'une route et déployer des actions d'exploitation capables d'optimiser le fonctionnement du réseau existant.

Les objectifs généraux définis dans le guide 'EVA' sont : l'amélioration de l'efficacité, de la sécurité et de l'environnement. Ceux-ci ont été déclinés selon plusieurs critères d'évaluation classiques puisque déjà utilisés dans le domaine de l'investissement routier. On peut citer : les coûts d'utilisation du véhicule, le temps de parcours, le confort, la sécurité, la pollution de l'air et le bruit.

La méthode 'EVA' associe à chaque critère, des indicateurs caractéristiques en vue d'effectuer une évaluation socio-économique du projet considéré. Elle propose une liste de valeurs monétaires (en ECU 1991 sur la base de 1 ECU = 1 Euro = 6.55957 F).

Le temps passé et les équivalents monétaires sont définis d'une manière plus fine que la méthode française. Les tableaux suivants montrent les valeurs retenues.

Type de temps	Motif travail	Motif autre
Préparation du voyage	8.5	2.1
Attente ou recherche	21.8	8.5
Voyage	17	4.3

Tableau n° II.4 - Valeurs pour les personnes en € / personne × heure (source : EVA, 1991)

Type du véhicule commercial	Valeur
Taxi	5.25
Autobus	51.82
Véhicule lourd 1 ^{ère} catégorie	20.33
Véhicule lourd 2 ^{ème} catégorie	32.14

Tableau n°II.5 – Valeurs pour les véhicules commerciaux en € / véhicule × heure (source : EVA,1991)

Les coûts d'exploitation des véhicules sont estimés en fonction de la distance parcourue. Les valeurs sont exprimées en € par véhicule × km

Type de véhicule	Valeurs
Taxi	0.09
Autobus	0.45
Véhicule lourd 1 ^{ère} catégorie	0.14
Véhicule lourd 2 ^{ème} catégorie	0.27

Tableau n° II.6 - Coûts d'exploitation des véhicules (source : EVA, 1991)

- Consommation de carburant : 0.36 € / litre

Les valeurs de la vie humaine sont données dans le tableau ci-dessous :

Tué	744 128 € / personne
Blessé grave	105 586 € / personne
Blessé léger	7079 € / personne

Tableau n°II.7 – Coûts de l'insécurité en € (source : EVA, 1991)

Monoxyde de carbone	3
Oxydes d'azote	442.97
Hydrocarbures	347.98
Dioxyde de soufre	239.98
Plomb	16900.89
Particules	226.98

Tableau n°II.8 – Coûts de la pollution atmosphérique en € / tonne émise (source : EVA, 1991)

II.4.2. Guide CONVERGE

Le projet CONVERGE définit les grandes lignes du plan d'évaluation auxquels doivent satisfaire les consortiums en charge de projets. Des travaux similaires ont été menés à une échelle nationale : c'est le cas de la France par le SETRA et du Royaume Uni par le TRL (Transport Research Laboratory).

Le document 'CONVERGE', plus général que le manuel 'EVA', présente un cadre méthodologique pour l'évaluation et la validation de diverses applications télématiques relatives à tous les modes de transport (route, rail, air, voie d'eau, transport multimodal, ..).

Ce projet a été développé afin que les projets de recherche et démonstration adoptent une approche commune dans les méthodes d'évaluation et de validation et en particulier pour permettre une 'transférabilité' des résultats d'applications similaires. Ceci signifie, pour divers projets comparables, que les impacts d'un système puissent être généralisés de façon cohérente et efficace sans tenir compte d'aucune spécificité.

Le guide 'CONVERGE' donne des recommandations détaillées sur l'identification des besoins des utilisateurs ; la définition des objectifs d'évaluation et de validation ; l'estimation qualitative des impacts potentiels ; la sélection et la définition de méthodes d'évaluation et de validation ; la description de la procédure détaillée de validation qui est appelée approche à douze étapes : définition des indicateurs, définition de la situation de référence, description de la méthode de recueil de données, spécification des conditions de mesure, considérations statistiques, définition du

plan de mesure et considération de l'intégrité de la mesure et / ou de la simulation et enfin l'analyse des données et la présentation des résultats.

II.4.3. Méthode des 12 étapes

Cette approche expérimentale vise principalement à mesurer les critères d'efficacité de la manière la plus précise possible. Pour ce faire, le passage par les étapes suivantes est fortement recommandé :

1. Définition du système devant être testé (quel type d'action d'exploitation ?)
2. Définition du type de comparaison (quelle situation de référence ?)
3. Définition des indicateurs et des critères de réponse correspondants
4. Définition du contexte dans lequel le système doit être testé et identification des attributs du contexte (heure, jour de la semaine, mois conditions météorologiques,...)
5. Définition des interactions entre le système et les attributs du contexte
6. Définition des moyens de mesure des critères de réponse
7. Traitement de la réponse
8. Définition d'un site de test
9. Considérations statistiques
10. Elaboration du planning de l'expérience
11. Analyse préalable de la robustesse des tests (certains effets externes ou biais peuvent induire des irrégularités dans le processus d'évaluation)
12. Organisation pratique stipulant la spécification de l'équipement et d'autres moyens pour mesurer la réponse du système.

Néanmoins, cet ordre d'étapes peut être revu selon le système testé et le type d'évaluation que l'on veut réaliser : technique, impact, a priori, a posteriori,...

II.5. Cadre d'évaluation en France

II.5.1. Généralités

L'évaluation d'un système d'exploitation, telle qu'elle a été définie par le SDER en milieu interurbain, peut être effectuée soit a priori, soit a posteriori. Les outils les plus utilisés dans l'approche a priori sont les simulations et prévisions. A cet effet, on introduit en simulation un événement dans le système et on déroule l'ensemble des procédures et des activités que l'on a prévu de mettre en œuvre. Ainsi, on mesure les temps de réaction de chacune des parties du système ; on évalue également la capacité qu'a le système à traiter simultanément plusieurs événements indépendants. L'analyse des dysfonctionnements permet d'identifier s'ils proviennent, conjointement ou séparément, des moyens techniques, organisationnels ou humains. L'évaluation 'a priori' est peu utilisée actuellement en dépit du fait qu'elle peut apporter des éclairages utiles avant le déploiement des systèmes d'exploitation. L'approche a posteriori porte sur trois domaines : le fonctionnement du

système d'exploitation, son efficacité et la perception de la qualité de service rendu, tant du point de vue des acteurs du système que de celui des usagers de la route.

Le fonctionnement du système : on évalue ce type de mécanisme par des logiciels de saisie des perturbations, par exemple, des fonctionnalités d'alarme indiquent en temps réel des anomalies de fonctionnement du système. D'autre part, l'analyse ergonomique du travail permet d'évaluer (a posteriori), avec des méthodologies éprouvées, la qualité de fonctionnement de toute structure d'exploitation.

L'efficacité du système : les moyens de mesurer, en temps réel, l'efficacité des actions mises en œuvre dépendent souvent de l'existence d'un recueil de données performant.

En temps différé, cette évaluation consiste à comparer un indicateur d'un jour donné (ex : Heures / kilomètres de bouchon : HKM) à un jour équivalent passé, et ensuite à mesurer le gain ou la perte.

La qualité du service rendu est évaluée d'une part du point de vue des acteurs du système d'exploitation et d'autre part du point de vue des usagers de la route. Du point de vue des acteurs du système, l'opinion qu'ont les personnes qui font fonctionner le système sur la qualité du service rendu est un élément important de son efficacité. Du point de vue des usagers, l'enquête par questionnaires est le moyen d'évaluation le plus utilisé afin de tenter de mesurer la satisfaction des usagers de la route, la compréhension et l'utilisation qu'ils font des messages diffusés. Ces évaluations sont souvent ponctuelles en fonction des événements. Plusieurs exploitants d'infrastructures s'intéressent au concept d'une mesure périodique. Néanmoins, une harmonisation des objectifs de ces évaluations et des méthodes utilisées reste à faire. Ceci permettrait d'effectuer des comparaisons entre exploitants et d'enrichir l'expérience de chacun.

II.5.2. Travaux de l'administration et de l'ASFA

Depuis 1988, l'administration française et l'ASFA (Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes) tentent de définir des méthodes et des outils d'évaluation des services d'information des conducteurs et des systèmes d'aide à l'exploitation routière. Ceci constitue un ensemble de critères s'articulant autour de la notion de service à l'utilisateur. Cette action est jusqu'à aujourd'hui en cours d'élaboration du fait que la circulaire sur l'évaluation des investissements routiers (juillet 1995) s'avère insuffisante pour caractériser et valoriser correctement l'ensemble des actions d'exploitation et des services d'information.

Cette section présente essentiellement les travaux réalisés, dans le cadre du schéma directeur de l'exploitation routière (SDER - niveau 2). Ils concernent en particulier les radios d'information autoroutière et les systèmes d'aide à l'exploitation. Une première réflexion est engagée afin de caractériser l'information routière dynamique, les attentes des usagers et les fonctions des systèmes allant du recueil des données jusqu'à la diffusion des messages sur des supports tels que des panneaux ou des radios.

II.5.2.1. Concepts

Les travaux ASFA – Administration ont permis de définir les concepts suivants :

- l'efficacité intrinsèque du système d'information qui consiste en la mesure de la mise à disposition d'une bonne information, au bon endroit et en temps utile aux usagers. Les critères de mesure de l'efficacité intrinsèque sont le taux de couverture et le facteur de crédibilité ;
- l'efficacité extrinsèque ou impact qui traduit la capacité "à atteindre" les usagers, à être compris par eux et à répondre à leurs attentes et besoins. Les critères principaux sont le taux de compréhension et de satisfaction ;
- les usagers intéressés par un événement sont ceux qui intègrent de l'information routière dans leurs choix au stade de la planification du voyage (choix d'itinéraire, horaire de départ,..) ou ceux qui se dirigent, au cours d'un trajet, vers le lieu d'un événement ;
- les usagers concernés par un événement sont ceux qui vont rencontrer un événement routier (bouchon, accident,..) ou ceux qui peuvent être affectés par une action d'exploitation (fermeture de voie, contrôle d'accès, ..) ;
- les usagers informés d'un événement sont ceux qui reçoivent l'information les intéressant (l'événement est situé sur leur itinéraire) ;
- les usagers bien couverts par l'information sont ceux qui sont à la fois concernés et informés ;
- les usagers mal informés sont ceux qui n'ont pas rencontré l'événement dont ils ont été informés au préalable ;
- un nombre d'unités d'information est le nombre d'éléments constituant une information routière : localisation, nature et importance d'un événement.

II.5.2.2. Critères de l'efficacité intrinsèque

Les critères caractéristiques de cette notion sont le taux de bonne couverture et le facteur de crédibilité. Le premier est la proportion d'usagers bien couverts parmi ceux qui sont concernés par l'événement ; le second est le ratio des usagers bien couverts parmi ceux qui sont informés.

Le second volet, introduit après la notion d'efficacité intrinsèque, consistait à mesurer par des enquêtes l'impact du message sur le conducteur en termes de lecture, perception, compréhension, mémorisation, utilité et satisfaction. Ces indicateurs qualitatifs ont été traduits dans des questionnaires types.

Dans la méthode d'évaluation coûts -efficacité des systèmes d'information routière, on introduit la notion de 'contact utile' défini comme étant le contact assuré par un message d'information avec un usager concerné par un événement routier. Le Coût du contact utile est le rapport du coût annualisé du système d'information par le nombre d'usagers concernés et couverts, pour une section et une année donnée. Il intègre d'une part tous les coûts liés au système d'information (équipement et fonctionnement) et d'autre part l'efficacité intrinsèque via la bonne couverture des usagers.

II.5.2.3. Méthode de calcul du coût du contact utile

La méthode consiste à recenser les différents coûts et à identifier le nombre d'utilisateurs bien couverts. On distingue dans les coûts du système d'information et de sa mise en œuvre :

- les coûts des équipements et de leur installation ;
- les coûts de fonctionnement (énergie, commande, maintenance,...) ;
- la proportion de temps des agents d'exploitation ayant un lien direct ou indirect avec la diffusion d'informations (détection des événements, élaboration des messages, transmission, affichage, suivi, évaluation).

Il est recommandé de faire une analyse des coûts de manière modulaire en séparant les coûts du système d'information des utilisateurs au sens strict (coûts des équipements, installation et fonctionnement) de ceux du système d'information des utilisateurs avec la proportion du système de recueil de données, de traitement et d'aide à l'exploitation.

Les coûts cités ci-dessus sont annualisés. La valeur de l'amortissement d'une année est retenue pour les investissements en équipement.

Ainsi, le coût de l'information est la somme des différents coûts des systèmes d'information, le ratio correspondant aux équipements et systèmes de recueil, le transport et le traitement des données nécessaires à l'information des utilisateurs et enfin les coûts afférents aux contributions des agents exécutant des tâches dans la chaîne d'information.

Les travaux de l'administration et de l'ASFA ont permis d'élaborer une grille de critères s'inscrivant dans la sphère d'évaluation économique. Celle-ci intègre les indicateurs suivants :

- Un noyau pour un bilan coûts -avantages et les indicateurs socio-économiques
- Des critères quantitatifs mais non valorisés
- Des critères qualitatifs.

Il est à rappeler que les critères économiques sont conformes aux instructions liées à l'évaluation des investissements routiers (circulaires de 1986 et 1995). Néanmoins, des facteurs supplémentaires sont pris en compte du fait de la spécificité de l'exploitation routière :

- impacts d'une meilleure fluidité de trafic tels qu'une baisse de surconsommation de carburant et d'utilisation des véhicules en situation de congestion ;
- réduction de l'incertitude et amélioration du confort lié à l'information routière. On introduit la notion de *bonus d'information routière* qui est estimé à 1 centime (en FF) par veh. Km pour un VL ;
- impact sur la pollution de l'air (travaux INRETS / ADEME).

Nous décrirons dans ce qui suit, le cadre global de l'évaluation socio-économique des systèmes d'exploitation routière proposé en 11 étapes (Rapport ASFA, 1996) :

1. Délimitation du réseau à étudier
2. Définition des objectifs, des fonctions, des acteurs, des équipements requis et estimation des coûts engendrés
3. Identification des impacts attendus pour chaque 'groupe cible' (usager, exploitant et collectivité)
4. Définition des méthodes de valorisation monétaire des critères
5. Recueil des données et mise en forme
6. Construction des situations de référence et de projet (par observation ou simulation)
7. Estimation des bilans coûts- avantages par 'groupe cible'
8. Agrégation des bilans et identification des transferts entre 'groupes cibles'
9. Définition des critères de rentabilité
10. Prise en compte d'autres effets
11. Présentation des résultats dans un contexte décisionnel.

II.5.2.4. Critères de rentabilité

Les critères de rentabilité pris en compte dans la note d'instruction de la Direction des Routes (juillet 1995) sont cités ci dessous :

- Bénéfice actualisé
- Taux de rentabilité interne (TRI) socio-économique pour la collectivité
- Taux de rentabilité interne (TRI) de l'exploitant
- Taux de rentabilité immédiate
- Bénéfice par franc investi
- Surplus des usagers.

Ainsi, la rentabilité socio-économique représente un indicateur de bien-être pour la collectivité, alors que la rentabilité financière traduit plutôt un taux de retour sur investissement. Ces deux paramètres peuvent diverger. Par conséquent, dans le cas d'une rentabilité socio-économique élevée et d'une rentabilité financière faible, les subventions sont justifiables et leur octroi fait intervenir la contrainte budgétaire publique.

II.5.3. Les méthodes

II.5.3.1. Les méthodes de valorisation et les critères "monétarisables"

Une grille de critères est proposée dans le cadre d'une évaluation économique. Elle comporte trois types d'éléments :

- des indicateurs permettant d'élaborer un bilan coûts-avantages sur le plan socio-économique : on les appelle des critères quantitatifs valorisés ;
- des critères quantitatifs mais non valorisés ;
- des critères qualitatifs.

On introduit également deux indicateurs supplémentaires liés à la spécificité de l'exploitation routière : le bonus relatif à l'amélioration du confort générée par l'information routière et les effets sur la pollution de l'air.

Le ratio "bénéfices / coûts" représente le taux de rentabilité immédiate au sens des définitions mentionnées ci dessus. Le numérateur comprend tous les avantages chiffrables correspondant à la première année de mise en service (notée année 0) et le dénominateur englobe d'une part, la totalité des coûts d'investissements qui sont concentrés sur l'année 0 et d'autre part, les coûts d'exploitation chiffrables liés à la première année de mise en service.

II.5.3.2. La méthode de simulation

L'intérêt de la simulation est d'éclairer les décideurs sur les impacts socio-économiques potentiels d'installation d'équipements d'exploitation. La période d'évaluation prise en compte dans les simulations est de 13 ans : 3 ans pour l'installation et 10 ans de fonctionnement.

Dans le bilan coût-avantages de l'évaluation socio-économique du point de vue de la collectivité, la valorisation est à monnaie constante et actualisée selon le taux recommandé par le Commissariat au Plan. La référence est l'année précédant la mise en service.

En revanche, la valorisation des séquences coûts et avantages dans l'analyse financière du point de vue de l'exploitant, est actualisée avec un taux d'intérêt à long terme représentatif du type d'investissement. Par souci de cohérence, la période d'analyse sera la même que pour l'évaluation socio-économique ainsi que la référence (année précédant la mise en service).

Dans les simulations, le pas de temps est pris égal à une année et la zone de référence géographique sera une section homogène entre deux échangeurs ou deux diffuseurs.

II.5.3.3. Construction des situations de référence et de projet

Cette section dresse un certain nombre de définitions de paramètres liés aux situations de référence et de projet :

- *la situation de référence* correspond à la période précédant l'installation du système ;
- *la situation projet* est relative à la phase de fonctionnement du système d'aide à l'exploitation routière ;
- *le trafic projet* est celui escompté dans la situation projet ;
- *le trafic de référence sur l'autoroute* est celui prévalant au moment du projet mais sans l'influence du système d'aide à l'exploitation routière ;
- *le trafic induit sur l'autoroute* est dû à l'augmentation des déplacements du trafic de référence générée par l'amélioration du niveau de service ;
- *le trafic induit sur le réseau associé* pourrait être dû à l'amélioration des conditions de circulation liée au soulagement du trafic capté par l'autoroute ;
- *le trafic capté RN (Route Nationale)* provient du réseau associé et il est dû à l'amélioration du niveau de service sur l'autoroute.

II.5.3.4. Bilans coûts-avantages par groupe cible

Les bilans coûts - avantages par groupes cibles (usager, collectivité et exploitant autoroutier) permettent d'appréhender la rentabilité socio-économique pour la collectivité et la rentabilité financière pour l'exploitant autoroutier.

Le bilan pour l'utilisateur et la collectivité consiste à estimer la variation du coût généralisé des déplacements. Il prend en compte les variations de temps de parcours, le malus de congestion, le bonus de confort généré par l'information en temps réel, la variation du surcoût lié à la congestion, les variations des coûts d'utilisation des véhicules (hormis le péage).

Quant à la sécurité, le bilan global pour la collectivité ne prend en compte que les accidents corporels. L'amélioration de la sécurité peut provenir d'une diminution de la durée d'intervention en cas d'accident dont découle une réduction de la gravité des blessures et aussi d'une réduction de la fréquence des accidents en queue de bouchons.

D'autre part, le bilan financier pour l'exploitant autoroutier est établi à travers les coûts de fonctionnement du système d'exploitation, les amortissements, les gains éventuels de productivité et de trafic. Du bilan coûts-avantages de l'exploitant autoroutier et du montant de l'investissement actualisé, découle le taux de rentabilité financière du système.

La sommation des bilans coûts - avantages décrits ci-dessus permet d'estimer le taux de rentabilité socio-économique d'un système d'exploitation.

II.5.4. Présentation des résultats

La méthodologie d'évaluation d'un système à l'exploitation routière est ponctuée par la présentation des résultats sous forme synthétique dans un contexte décisionnel.

Une annexe technique résume généralement les hypothèses, les données et le choix de la méthode de calcul.

Les éléments significatifs à présenter sont :

- La liste des critères retenus pour l'analyse coûts-avantages
- Le tableau résumant les bilans coûts-avantages pour chaque groupe cible (usager, collectivité, exploitant)
- La liste des critères qualitatifs et quantitatifs qui complètent l'analyse coûts-avantages.

Enfin, il n'existe pas de recette pré-établie afin d'évaluer un système d'exploitation routière. Ainsi, il est conseillé de :

1. procéder au début par une approche simplifiée de type tableur pour établir les hypothèses et analyser les données de base ;
2. définir des scénarii respectivement pour deux hypothèses haute et basse ;
3. identifier les critères qui ont une part importante dans les bilans coûts-avantages ;
4. effectuer des analyses de sensibilité afin de s'assurer de la robustesse des résultats.

Dans le processus d'évaluation, il existe plusieurs types de contraintes (ASFA, 1996). Les hypothèses d'impact d'un système d'exploitation routière sur les conditions de circulation, la sécurité et la prise en compte d'un bonus d'information routière, sont autant de facteurs déterminants pour le surplus de l'usager et la rentabilité socio-économique. Dans les simulations, il est impossible d'utiliser à l'heure actuelle des valeurs standard. Ceci est dû à la présence du facteur humain dans des aspects liés à la sécurité ou à la conduite. En dépit de la spécificité intrinsèque de l'exploitation routière, ses impacts sont valorisés conformément à des critères et à des pratiques usuelles d'évaluation de projets d'investissements routiers. Néanmoins, des facteurs tels que la réduction d'incertitude sur les temps de parcours ou l'amélioration du confort due à l'information routière ne sont pas clairement pris en compte. Ainsi, on introduit la notion de 'bonus d'information routière' dont la valorisation monétaire mérite un examen détaillé. Ce dernier critère est d'autant plus justifié que l'émergence des systèmes intelligents appliqués aux transports est en plein essor et que les effets attendus sont positifs. Du point de vue environnemental, la valorisation n'est pas adaptée pour l'exploitation routière. La circulaire révisée de 1995 sur les investissements routiers, ne prend en compte que la pollution de l'air et l'effet de serre relatifs à des volumes de trafic exprimés en véh × km. Les différents régimes de circulation et la variation d'émission de polluants en quantité et nature ne sont pas nuancés. Par conséquent, les actions d'exploitation routière contribuant à la fluidité du trafic sont exclues de ce champ de calcul malgré les avantages qu'elles procurent.

II.6. Améliorations de la méthode d'évaluation des actions d'exploitation :

La méthode d'évaluation décrite ci-dessus est définie pour les investissements routiers liés à des réaménagements ou à des nouvelles infrastructures. Son application aux actions d'exploitation passe inévitablement par des adaptations et des compléments tenant compte du cadre spécifique de l'exploitation routière. Les critères sur lesquels des améliorations sont envisageables, sont :

- Le temps passé : une différenciation de la valeur du temps est préconisée selon : le type de jour (jour de semaine, week-end), le motif de déplacement et le nombre de personnes à bord du véhicule
- La sécurité se décline selon trois aspects : l'impact de l'exploitation sur les secours aux blessés, l'influence des conditions de trafic sur le niveau d'insécurité (le nombre d'accidents par véhicule \times km), la réduction du nombre d'accidents secondaires grâce à une diminution de la durée totale des accidents ainsi qu'une meilleure alerte des conducteurs situés en amont d'un incident.
- La pollution de l'air se traduit par la prise en compte de l'influence de la vitesse sur les quantités de polluants émises.
- Le confort du conducteur : on distingue deux types ; le "confort de conduite" dépendant du débit total ainsi que du pourcentage des PL et le "confort d'information" estimé en fonction de la qualité et de l'adéquation de l'information aux conditions de circulation et aux contraintes spécifiques à chaque conducteur.

CONCLUSION

Cette première partie nous a permis de relever des références utiles pour l'orientation et l'interprétation de notre recherche. Mais, il ne s'agit encore que de généralités et le problème de l'évaluation des potentialités des systèmes embarqués de communication entre l'infrastructure et les véhicules doit maintenant être posé avec précision.

PARTIE II :

**LES SYSTEMES DE COMMUNICATION ENTRE
L'INFRASTRUCTURE ET LES VEHICULES**

INTRODUCTION

Dans cette seconde partie, nous nous intéressons aux systèmes de communication entre l'infrastructure et les véhicules. Ces systèmes supposent l'existence d'équipements embarqués à bord d'un certain nombre de véhicules. Ces dispositifs sont capables de remplir des fonctions intéressantes aussi bien en ce qui concerne le recueil de données dynamiques que l'information et l'alerte des conducteurs (chapitre 3). Ils reposent sur des technologies particulières (chapitre 4). Nous évoquerons des exemples actuellement mis en œuvre en Europe, Japon ou aux Etats-Unis. Nous poserons la question de l'évaluation de ces systèmes (chapitre 5).

CHAPITRE III

FONCTIONNALITES DES SYSTEMES DE COMMUNICATION ENTRE L'INFRASTRUCTURE ET LES VEHICULES

III.1. Introduction

Les systèmes embarqués de communication véhicule – infrastructure connaissent un développement relativement récent. Leur conception résultait d'une analyse des besoins et des tâches des conducteurs en terme d'information, de navigation et de contrôle du véhicule.

III.2. Généralités

III.2.1. Tâches de conduite

Les tâches de conduite sont le fruit d'objectifs généraux que s'est fixés le conducteur au préalable. Elles sont identifiées ci dessous :

III.2.1.1. Tâche stratégique

C'est une tâche relative à de la prise d'informations 'avant le voyage'. C'est une planification en amont du processus de circulation qui se fait donc à l'extérieur du véhicule. Elle consiste en des choix du mode de transport, des itinéraires et de l'heure de départ.

III.2.1.2. Navigation

Le conducteur prépare son trajet au moyen d'une carte quand il ignore les zones qu'il va traverser. Suivre l'itinéraire choisi ou le modifier pendant le trajet sont des exemples de tâches de navigation.

III.2.1.3. Information routière

Dans ce contexte, la route recouvre le marquage, les panneaux, les feux, l'environnement immédiat, les obstacles qui y sont situés et les conditions météorologiques. Tous ces facteurs conditionnent le choix du conducteur en termes de position et de trajectoire sur la chaussée.

III.2.1.4. Tâches liées à la circulation

Ce sont des tâches qui traduisent l'interaction avec les autres conducteurs tels qu'avec des véhicules rapides ou lents, une action de dépassement ou la réaction à des événements imprévus : accident, mauvaises conditions météorologiques...

III.2.1.5. Contrôle du véhicule

Il est utile que le conducteur connaisse l'état et le fonctionnement des systèmes techniques : moteur, carburant, huile, freins, pneus. Ces informations peuvent être fournies grâce aux moyens conventionnels. Cependant, elles ont été améliorées en matière de fiabilité et de prévision grâce aux nouvelles technologies. La question d'opter pour une application directe des techniques avancées sur le maniement du véhicule ou pour une totale intégration du conducteur dans la chaîne, a été longuement posée. En tout état de cause, il était indispensable d'alléger autant que possible la charge de ce type d'informations reçues par le conducteur.

III.2.1.6. Informations fournies par le conducteur

Dans beaucoup de cas, le conducteur exprime le besoin d'informer les autres de sa situation, de ses besoins ou de ses expériences. Dans ce contexte, les messages d'urgence ont un caractère primordial. L'information sur la position du véhicule est essentielle.

Plusieurs situations peuvent être signalées aux autres conducteurs : un objet sur la chaussée, une chute de pluie, du brouillard, un incident ou des travaux.

Certaines des tâches citées ci-dessus peuvent interférer avec la tâche fondamentale de conduite. Cette contrainte risque de s'amplifier si les systèmes embarqués d'information routière ne sont pas convenablement conçus. Elle peut générer une distraction visuelle pour le conducteur, surcharger ses canaux d'information en termes de charge mentale, occasionner une faible convivialité de l'Interface Homme Machine et créer des effets 'pervers' totalement opposés aux impacts escomptés du système embarqué.

III.2.2. Aspects généraux liés à la conception

La définition, la conception et la réalisation d'un système embarqué d'informations fait intervenir plusieurs acteurs qui poursuivent parfois des objectifs contradictoires : le maître d'ouvrage, l'exploitant (qui peut être aussi le maître d'ouvrage) et les industriels.

Les objectifs de chaque intervenant sont décrits ci dessous :

III.2.2.1. Maître d'ouvrage

Le maître d'ouvrage recherche dans un système d'aide au déplacement, une solution économique efficace et des investissements justifiés sur des dispositifs ayant une architecture ouverte et évolutive.

III.2.2.2. Exploitant

Les principaux objectifs de l'exploitant sont la performance en terme de temps de réponse, de précision d'informations, de fiabilité, de taux de disponibilité et d'ergonomie.

III.2.2.3. Les industriels

Les industriels visent une utilisation de technologies éprouvées afin de minimiser le risque financier associé au développement du système embarqué, une compatibilité des composants et une évolutivité du système.

Le développement des systèmes de communication route-véhicule s'accompagne de questions relatives aux aspects organisationnels en termes de partenariat entre les opérateurs de service, d'infrastructure, de télécommunications, les radio diffuseurs, les gestionnaires de transports publics, les constructeurs automobiles et l'autorité publique ; aux aspects juridiques tels que la confidentialité et la protection de la vie privée, la sécurité publique, la sécurité relative aux équipements embarqués, le respect des règles de concurrence et des marchés publics et la responsabilité et le rôle de chaque acteur ; aux aspects financiers couvrant la vente des données de trafic entre opérateurs publics et fournisseurs privés de services, la tarification des services offerts aux conducteurs, la répartition des coûts d'investissement et de fonctionnement et plus généralement l'ensemble des relations financières entre partenaires publics et privés impliqués dans le montage ; aux aspects techniques qui englobent la normalisation des fonctionnalités des systèmes, des procédures, des équipements techniques, des échanges d'informations et de la présentation des messages.

III.2.2.4. Réglementations et allocation des fréquences

Dans la majorité des pays, les systèmes de communication sont placés dans un cadre réglementaire contrôlé qui implique aussi bien la puissance publique que le secteur privé.

Des entités sont chargées de l'attribution des fréquences telles que le CSA (Conseil Supérieur de l'Audiovisuel) et l'ART (Agence de Régulation des Télécommunications) en France et la FCC (Federal Commission for Communications) aux Etats Unis.

Les fréquences doivent être disponibles à l'intérieur des frontières des pays. Il existe par ailleurs des organismes qui réglementent les écrans, les commandes et la taille des équipements embarqués.

Les pays membres de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) s'engagent sur la base d'un traité à se conformer aux règles édictées par cette instance. Cependant chaque service national de télécommunications alloue et réglemente l'utilisation des fréquences radio à l'échelle nationale. Lors de l'octroi de licences radio, des organismes contrôlent également la localisation, la puissance émise, la hauteur des antennes, la modulation, la stabilité de la fréquence et d'autres caractéristiques techniques.

Dans une zone donnée, une fréquence est attribuée à un seul candidat. Cette même fréquence peut être utilisée par d'autres mais dans des zones suffisamment éloignées afin d'éviter les interférences.

III.2.2.5. Acceptation

L'acceptation d'un système concerne d'une part les usagers de la route et d'autre part les autorités concernées. Le conducteur exige du système, une grande performance en matière de fiabilité et de crédibilité. L'interface Homme - Machine revêt une importance particulière. Elle intègre la fonction d'entrée des données, la présentation de l'information et l'utilisation pratique du système.

Pour les autorités concernées, les analyses coûts-avantages sont l'un des principaux facteurs qui conditionnent le processus décisionnel en matière d'implantation d'un nouveau système de communication sol / véhicule.

III.2.2.6. Modalités de financement de l'information routière

Le financement relève de la compétence des instances politiques. Plusieurs modalités sont possibles entre les services privé et public. Elles peuvent être sous forme d'une évaluation de redevances d'utilisation couvrant totalement les coûts d'exploitation, une couverture des coûts de diffusion de l'information par la publicité ou par le biais de la vente, la location ou la mise sous licence des équipements nécessaires à la diffusion de l'information, une sous-traitance par les organismes publics de services spécifiques à des entreprises commerciales, une attribution de subventions publiques aux services commerciaux lorsque l'information diffusée est d'intérêt général.

III.2.3. Classification des systèmes

Dans la littérature, les systèmes embarqués de communication sont généralement classés par leurs fonctions. La partie ci-dessous détaille cette classification.

III.2.3.1. Aides autonomes à la navigation

Ce sont des systèmes autonomes qui assurent au conducteur une fonction de navigation comme des informations de guidage et de localisation. Dans ce cas, le véhicule est équipé de détecteurs de distance appelés odomètres et de direction ou gyromètres. Ceux-ci permettent à partir d'un point de départ de suivre la progression d'un véhicule. Des systèmes de radio-localisation déduisent la position par une technique de triangulation. Des systèmes de localisation de flottes de véhicules utilisent des balises de position au sol.

Il existe principalement deux types de systèmes autonomes : les aides directionnelles simples, les aides au guidage et les dispositifs d'affichage de cartes.

III.2.3.1.1. Aides directionnelles simples :

L'information sur la direction est symbolisée par une flèche. Ces systèmes fournissent au conducteur sa position par rapport à sa destination et non pas tous les itinéraires possibles. Les systèmes DRIVEGUIDE, CITYPILOT ou ALI-SCOUT appartiennent à cette catégorie.

III.2.3.1.2. Aides au guidage :

Ces dispositifs guident le conducteur et lui fournissent le meilleur itinéraire. Ils combinent des informations liées aux caractéristiques géométriques de la route et à la circulation. Ces données sont traitées par un algorithme qui identifie l'itinéraire optimal en termes de temps ou de coût minimum. A titre d'exemple, un des premiers systèmes 'CARIN' couplait l'approche d'aide au guidage à un système d'affichage de cartes. D'autres dispositifs, comme 'EVA' et 'NAVIGATOR' développés au Royaume Uni donnent des indications visuelles et auditives par synthèse vocale.

Ces systèmes assurent un guidage statique. Ils ne prennent pas en compte les modifications survenant sur le réseau routier ou la variation des conditions de circulation.

III.2.3.2. Systèmes de diffusion par zone

Ces dispositifs permettent de diffuser des informations sur une zone large allant de dix à cent kilomètres de diamètre. Le principe est basé sur une communication unidirectionnelle, de l'émetteur vers le véhicule. On peut citer des systèmes de transmission par radio cellulaire et ceux de diffusion par satellites.

Les systèmes de diffusion par zone sont conçus pour transmettre des informations d'actualisation pour les véhicules équipés de systèmes à affichage de cartes et d'aides au guidage. Les messages seront soit des données liées au réseau (modification des caractéristiques géométriques de l'infrastructure...), soit des événements non récurrents tels que des incidents ou de mauvaises conditions météorologiques. Les informations d'urgence en cas de danger sont diffusées en temps réel.

Les messages doivent être codés sous un format normalisé afin que les différents types d'appareils embarqués dans les véhicules, puissent les interpréter. Plusieurs exemples caractérisent ce type de système : NAVIGATOR au Royaume Uni, HAR (Highway Advisory Radio) aux Etats Unis et VISIONAUTE en France.

III.2.3.3. Systèmes d'émetteurs locaux au sol

Ces systèmes découlent de ceux de la classe précédente. Ils peuvent être utilisés soit comme des émetteurs de messages d'alerte dans l'environnement immédiat tels que le HAR aux Etats Unis. Plusieurs moyens ont été testés dans le cadre de cette fonction : des aimants ou des boucles enterrés, des émissions radio à courte distance, un câble co-axial disjoint, des émetteurs à micro-ondes et à infrarouge.

Des balises transmettent en continu des informations sur la position. D'autre part, il existe aussi des émetteurs d'alerte diffusant des messages sur les conditions de circulation. Ils sont gérés depuis un centre de régulation afin de transmettre des informations en temps réel.

III.2.3.4. Systèmes de radio mobile

Ils permettent une liaison de communication à deux sens entre un poste central et le véhicule. Le concept le plus répandu est le système public de radio cellulaire. Il consiste à diviser la zone de couverture représentée par un pays ou une région en cellules dont le rayon varie de 16 Km en rase campagne à environ 2 Km en zone urbaine.

Chaque cellule est desservie par une unité émettrice/réceptrice fixe disposant de plusieurs canaux radio en duplex (à deux sens) par lesquels une communication avec les unités mobiles peut être établie.

Le système établit une interconnexion avec le réseau téléphonique commuté public. Des propositions ont été formulées en vue d'utiliser la radio cellulaire pour l'alerte des conducteurs et aussi pour des conseils de guidage. D'autre part, le conducteur peut effectuer des appels d'urgence et fournir sa position en des points du réseau routier. Les précurseurs dans ce domaine ont été les Etats Unis avec le système 'ETAK' et l'Australie avec 'IDIS'. Ensuite, il y a eu le développement du GSM (Global System for Mobile Communications) en Europe, et nous assistons aujourd'hui au développement des nouveaux dispositifs basés sur les medias GPRS (General Packet Radio Service) et UMTS (Universal Mobile Telecommunication System).

III.2.3.5. Systèmes d'émetteurs / récepteurs locaux au sol

Ces dispositifs utilisent une liaison à deux sens entre des modules embarqués et des équipements au sol. Ceux-ci sont contrôlés par un système central et envoient des instructions de guidage lors de la réception d'un code de destination transmis par le véhicule de passage. Les informations de guidage sont disponibles pour le conducteur sous forme d'affichage visuel.

Les premiers systèmes, comme AUTOGUIDE au Royaume Uni, étaient basés sur des boucles d'induction enterrées car celles-ci assuraient également la détection des véhicules.

Dès les années 1980, sont apparus les premiers systèmes de guidage dynamique basés sur la technologie infra-rouge. En Allemagne, on a assisté au développement du système 'EURO-SCOUT'. Au Japon, on a développé deux dispositifs l'un appelé RACS se basant sur des micro-ondes et l'autre AMTICS fondé sur la radio fréquence. Les Japonais ont aussi opté pour des balises à infrarouge. Cependant, la configuration de la communication est totalement différente de celle des systèmes EUROSCOUT du fait de la combinaison de la détection du véhicule et de la communication bidirectionnelle dans une seule balise. A la fin des années 1990, les enseignements tirés de ces systèmes ont donné naissance au service VICS largement déployé au Japon actuellement.

Aux Etats Unis, le système 'FAST-TRAC' a été développé et utilisait les mêmes longueurs d'onde, structure de données, vitesse de transmission et protocole de communication que le système européen EURO-SCOUT.

Les exemples les plus récents appartenant à cette catégorie sont le système AIDA développé en France et RTA (Road Traffic Advisor) au Royaume Uni.

III.3. Description fonctionnelle des systèmes embarqués d'information

Dans l'architecture fonctionnelle d'un système embarqué, trois fonctions sont définies : l'interaction avec les sous-systèmes d'information en termes d'envoi et de réception de données, la gestion de l'information en matière de filtrage, de hiérarchisation et d'intégration d'informations et l'interaction avec le conducteur

Le tableau ci-dessous résume les fonctions assurées par chaque classe de systèmes :

Classes de système	Aides autonomes à la navigation	Diffusion par zone	Emetteur local au sol	Radio mobile	Emetteur / récepteur local au sol
Fonction					
Information stratégique					
Historique	•	•	•	•	•
Prévisionnelle		•		•	
Information de navigation					
Historique	•	•	•	•	•
Dynamique		•	•	•	•
Alerte		•	•	•	•
Appels d'urgence				•	•
Gestion de trafic				•	•

Tableau n°III.1 – Fonctions des systèmes embarqués

(source : OCDE, Systèmes embarqués de guidage et de communication avec les conducteurs, 1988)

III.4. Enjeux et recommandations

III.4.1. Acteurs

La viabilité d'un système d'information embarqué passe par un regroupement de plusieurs organismes. Contrairement aux systèmes 'classiques' de gestion de trafic, les actions sont coordonnées par des entités intervenant à différents niveaux :

- les autorités publiques routières et exploitants responsables de la production des informations (recueil des données..), de la sécurité routière en termes d'alerte et de secours et aussi de la gestion de trafic. Toutefois, des opérateurs de service privés ou des associations d'usagers de la route peuvent assurer une partie de ces tâches et particulièrement les recueil et traitement des informations ;

- les industriels, incarnés par les constructeurs automobiles et les équipementiers, ont un rôle déterminant dans la réception de l'information et notamment dans la conception, l'intégration des équipements de bord, la fabrication et la commercialisation des systèmes ;
- Les autorités de télécommunications et les diffuseurs sont impliqués respectivement dans l'allocation et l'usage des fréquences et d'autre part dans les programmes de radiodiffusion.

III.4.2. Tendances

Les systèmes de communications bidirectionnelles entre l'infrastructure et les véhicules sont considérés comme les plus prometteurs malgré leur complexité et le coût présumé élevé de leur déploiement. Néanmoins, les aspects suivants doivent être pris en compte : le choix de la technologie de transmission des données entre le sol et le véhicule, la problématique multidisciplinaire liée à ces systèmes : algorithmes de contrôle et processus de traitement des données dans les centres de gestion de trafic ou dans les véhicules, les analyses coûts et avantages, l'ergonomie et l'acceptation par les conducteurs, le recueil des données grâce aux véhicules traceurs permettant d'appréhender des dimensions spatiales (origines- destinations) et temporelles (temps de parcours). Cette possibilité constitue un véritable gisement pour diverses applications.

III.5. Exemples d'exploitation basés sur des véhicules traceurs

III.5.1. Concept du véhicule traceur

On définit généralement, dans une flotte de véhicules particuliers, comme traceur tout véhicule circulant et susceptible d'être identifié et localisé de manière automatique à l'aide d'un système embarqué.

Le concept du véhicule traceur est fondé sur une liaison du véhicule vers une infrastructure au sol. En transmettant sur une telle liaison, son identifiant et sa position, le véhicule peut jouer le rôle de "traceur". A condition d'avoir une proportion suffisante de véhicules équipés, on peut obtenir des informations de trafic en temps réel.

L'apparition, dans le trafic quotidien, de véhicules équipés de moyens d'identification ou de localisation par GPS (Global Positioning System) incite les exploitants à examiner la prise en compte de ces véhicules pour compléter le recueil de données provenant d'équipements fixes. L'utilisation des véhicules traceurs est une partie intégrante des systèmes d'exploitation opérationnels dans des grandes métropoles américaines et notamment pour estimer et afficher des temps de parcours.

La détermination de l'échantillon minimal des véhicules à équiper pour obtenir une connaissance suffisante du trafic, a été abordée dans plusieurs références bibliographiques.

La section ci-dessous décrit dans quelle mesure, l'utilisation des véhicules traceurs peut remplir les différentes missions du SDER décrites précédemment pour les infrastructures de niveaux 2 et 3A et particulièrement la surveillance du réseau, le maintien de la viabilité hivernale et la gestion de trafic.

III.5.1.1. Surveillance du réseau

Les véhicules traceurs s'adaptent relativement bien à cette mission car ils produisent des informations participant à la connaissance en temps réel des conditions de circulation. Les données de trafic provenant de ces véhicules peuvent être également utilisées pour mettre en évidence des variations spatiales et temporelles des conditions de trafic et en déduire des présomptions d'incidents.

Les temps de parcours et les vitesses moyennes calculées renseignent l'exploitant sur l'état de circulation (fluide, dense, saturé) du réseau. Les temps de parcours peuvent également être exploités pour la détection automatique d'incidents (DAI). Cette application est basée sur la mise au point d'un algorithme approprié. Les temps de parcours mesurés hors incidents servent à définir des temps de parcours moyens, par tronçon et pour une tranche horaire donnée de la journée. On présume la détection d'un incident si, pour une tranche d'heure donnée, le temps de parcours mesuré pour un tronçon excède un certain intervalle de confiance calculé autour du temps de parcours moyen de ce même tronçon.

L'observation des changements de voies peut également fournir des informations sur les conditions de circulation. Cette technique est basée sur le postulat qu'un changement de voie massif des véhicules, d'une balise à l'autre, met probablement en évidence des conditions de circulation instables. Si la proportion de véhicules traceurs ayant changé de voie pendant un intervalle de temps défini est supérieure à un seuil prédéfini, un incident est déclaré. Cependant, cette méthode suppose que la technologie des véhicules traceurs est capable d'identifier la voie de circulation occupée par chaque véhicule traceur au moment de son passage.

Une surveillance du nombre de véhicules traceurs, voie par voie, peut également servir à mettre en évidence la présence d'un incident. Il s'agit de comparer à des intervalles de temps régulier le nombre de véhicules traceurs sur chacune des voies. Si leur nombre est inférieur à un certain seuil bas sur une voie, et qu'il est supérieur à un seuil haut sur les autres, un incident est déclaré.

III.5.1.2. Viabilité hivernale

Le recueil des informations météorologiques permet à l'exploitant d'infrastructures de définir des stratégies opérationnelles d'exploitation. La fonction de localisation des véhicules de déneigement est importante pour une rapidité d'intervention.

III.5.1.3. Gestion du trafic

La gestion de trafic consiste principalement en trois missions : la préparation de la gestion des flux de circulation ; l'élaboration d'un plan d'actions préventives avant le déplacement ; le traitement en temps réel des flux de trafic.

Les véhicules traceurs permettent l'élaboration de matrices origines / destinations considérées comme l'élément de base contribuant à la compréhension de la répartition des flux dans l'espace et dans le temps. On peut également bâtir un plan d'actions préventives en se basant sur des prévisions de trafic et sur l'analyse des effets d'une perturbation récurrente.

Le traitement en temps réel consiste à communiquer aux conducteurs, à travers un écran embarqué dans les véhicules, des informations relatives aux itinéraires de délestage et de guidage en temps réel.

III.5.2. MIGRAZUR

En France, une application basée sur le système de gestion de trafic MIGRAZUR (Moyens d'Information et de du Réseau Autoroutier en Zone Urbanisée) a été développée par la société d'autoroutes ESCOTA. Elle vise à améliorer la gestion de trafic, les systèmes de détection automatique d'incidents et les pratiques d'intervention et d'information sur l'autoroute A8.

La société ESCOTA a décidé de fournir une information de temps de parcours aux usagers qui empruntent son réseau. Ainsi, une méthode de recueil de temps de parcours basée sur des badges d'abonnés au télépéage, a été mise en place. Chaque PMV sur le réseau est équipé d'une antenne de lecture à une fréquence de 2.45 GHz. Les informations individuelles sont traitées par un calculateur qui estime le temps mis entre 2 PMV successifs. Le système calcule ainsi toutes les 6 minutes, une valeur moyenne de temps de parcours entre ces PMV.

Un algorithme permet d'extrapoler les temps de parcours si une capture de données est manquante, d'éliminer les valeurs aberrantes dues à des usagers qui repassent beaucoup plus tard sous un PMV (ex : arrêts prolongés sur des aires de service), d'indiquer les cas éventuels d'incidents sur le réseau par comparaison à des valeurs de référence.

Le système central propose automatiquement une série d'actions telles que le rapatriement des images de la caméra correspondant à la zone perturbée, un affichage et un rafraîchissement automatique des temps de parcours sur les PMV en amont des sections affectées, une information par radio trafic FM sur les temps de parcours pour des destinations définies.

III.5.3. Le Travel Tag Program

III.5.3.1. Description du projet

Troisième grande métropole du Texas et neuvième plus grande ville des Etats-Unis, San Antonio dispose aujourd'hui d'un système de gestion des transports nommé TransGuide (Transportation Guidance System) mis en place dans le cadre de l'initiative « Model Deployment Initiative » (MDI). Le système opérationnel depuis juillet 1995 couvre environ une centaine de km de voies rapides et devrait à terme couvrir un réseau d'environ 450 km. L'objectif principal est de permettre aux forces d'intervention de réagir rapidement - en moins de 2 min - en cas d'incidents ou d'accident.

Un système d'information en temps réel sur les temps de parcours fonctionne à partir de badges hyperfréquence embarqués dans des véhicules traceurs. La connaissance du temps de parcours permet aux services d'urgence de réagir plus rapidement et plus efficacement en cas d'incident. Pour leur part, les usagers ont la possibilité d'adapter si nécessaire leur itinéraire en fonction des conditions de circulation.

Les temps de parcours sont mis à la disposition du public au niveau de kiosques (42) implantés à des points stratégiques de la ville. Ils sont également disponibles sur Internet et à bord de certains véhicules institutionnels dotés d'unités de navigation embarquées.

III.5.3.2. Mise en œuvre technique

La flotte des véhicules équipés de badges électroniques est en majeure partie composée de conducteurs volontaires. Le Département des Transports du Texas a entrepris une campagne active visant à distribuer une grande quantité de badges électroniques (78000 au total, en fonction du budget prévu). Le critère requis pour disposer d'un badge est de circuler quotidiennement dans l'agglomération. Les badges électroniques sont utilisés uniquement pour le calcul des temps de parcours. Les identifiants des badges ont été brouillés afin de ne pas être en mesure d'effectuer des suivis individuels de véhicules.

Les antennes sont réparties sur 53 sites et sont localisées à la verticale des voies principales des routes à haute densité de circulation autour de San Antonio, sur les portiques de signalisation. Les sites sont espacés de 1,6km à 3,2km.

III.5.3.3. Éléments de coûts

Le coût du « Travel Tag Program » de San Antonio s'élève à 12.27 Millions € et inclut :

- Le « Travel Tag Program » ;
- Le programme d'information des voyageurs à partir des kiosques TransGuide ;
- Les unités de navigation embarquées (590 unités) fournies aux véhicules de la ville, du Comté, de l'Etat ainsi qu'aux véhicules fédéraux ;
- Le système d'alerte avancé des passages à niveau pour les voies ferrées ;
- Le système de téléconférence vidéo entre les hôpitaux et les services d'ambulances.

Pour référence, la mise en œuvre du système de gestion du trafic TransGuide a eu un coût d'environ 29 Millions €.

III.5.4. Autres applications potentielles

III.5.4.1. Les matrices O/D

Les données d'entrée utilisées par les modèles de simulation ou prévisions de trafic sont constituées des matrices O/D (Origine- Destination), qui fournissent l'intensité des débits issus de chaque entrée du réseau à destination de chaque sortie. Ces matrices sont établies à partir d'enquêtes pour les systèmes ouverts ou à la base des tickets de péage pour les systèmes fermés. Néanmoins, l'utilisation des données issues des porteurs de badges permet de calculer la matrice O/D vraie, par des mesures directes et indépendantes de la chaîne de péage. Celle ci peut être utilisée pour générer la matrice estimée à H+1, ou H+2 ou réajuster le modèle d'écoulement de trafic.

En temps réel, nous pouvons obtenir les éléments suivants :

- Une matrice horaire O/D : à partir des enregistrements d'entrée et de sortie, il est possible de calculer la matrice horaire O/D, qui comptabilise le nombre de véhicules équipés de badges pour chacun des couples origine - destination du réseau considéré ;
- L'enregistrement de l'itinéraire par marquage des enregistrements d'entrées ou de sortie, génération de l'historique des passages effectués par chacun des mobiles ;
- Une détection des incidents par analyse des données en temps réel (ex : comparaison des débits d'entrées et de sorties) ;
- Un comptage des mobiles présents simultanément sur chacun des segments du réseau.

III.5.4.2. Gestion de flottes

Les exploitants autoroutiers ont une flotte importante de véhicules : véhicules légers, fourgons des agents routiers, engins pour le maintien de la viabilité hivernale et voitures de patrouilleurs. La possibilité de disposer d'un synoptique au poste central d'information montrant la position des véhicules afin d'intervenir sur des événements imprévisibles, représente un réel besoin pour les exploitants autoroutiers.

Ce service peut fonctionner de la manière suivante : les véhicules équipés indiquent leur numéro d'identification et l'heure de passage sous les balises. Ces informations sont envoyées directement

au PC afin de rafraîchir le synoptique sur lequel les différents types de véhicules sont distingués par un symbole.

L'installation d'une balise sur la voie de droite peut être suffisante pour un bon fonctionnement de ce service (étant donné que les véhicules de service des sociétés d'autoroutes empruntent presque exclusivement la voie de droite).

Néanmoins, la gestion de flottes par la technologie DSRC (Dedicated Short Range Communication) n'occupe qu'une place marginale (essentiellement adaptée sur autoroute) par rapport à l'utilisation du GPS.

III.6. Incidents et fonctions d'alerte

Nous définirons le terme 'incident' comme étant un évènement aléatoire qui diminue la capacité de la route et / ou réduit le niveau de sécurité et pouvant aussi dégrader les conditions de circulation. Il existe deux catégories d'incidents : Les incidents primaires survenant indépendamment des conditions de circulation et causés par une panne, une chaussée glissante, des débris sur la chaussée ou par une distraction du conducteur ; et les incidents secondaires qui sont directement causés par un incident primaire ou par un bouchon qui en résulte.

La gestion des incidents routiers désigne la chaîne d'activités réalisée par des intervenants multiples (exploitants, forces de police, équipes médicales, personnel de dépannage) depuis la détection d'un incident ou d'un accident jusqu'à son traitement complet et le retour à des conditions normales de circulation.

La connaissance des caractéristiques des incidents routiers est nécessaire pour la mise en place de stratégies à travers toute la chaîne de gestion d'incidents.

La fréquence moyenne F des incidents sur autoroute est exprimée en nombre d'incidents par million de véhicules*km parcourus. Ainsi, à travers quelques exemples, la fréquence moyenne des incidents sur autoroute est de 64 incidents pour 10^6 véh*km aux Etats-Unis et 76 incidents pour 10^6 véh*km en Grande Bretagne.

Des évaluations de politiques de gestion d'incidents déjà effectuées ont révélé des gisements de gains substantiels pour les conducteurs et la collectivité tels que : des gains de temps et une diminution de l'insécurité routière.

III.6.1. Détection et alerte

La Détection Automatique d'Incidents par les véhicules traceurs fait l'objet de recherches effectuées essentiellement aux Etats-Unis consistant à tester de nouveaux algorithmes.

Un état de l'art est décrit ci dessous concernant la détection d'incidents sur les autoroutes concédées en France. Nous pouvons distinguer :

les moyens de détection classiques : Réseau d'appel d'urgence (RAU), patrouilles (temps de déclenchement de 4 à 5 mn) ; postes centraux (radio, PMV) ; détection des conditions météorologiques (avertisseur de verglas,..).

Détection Automatique d'Incidents (DAI) par boucles magnétiques, vidéo non automatique (système de caméras dans les tunnels avec visualisation par l'opérateur), DAI par traitement d'image.

D'autre part, l'alerte est fondée sur le principe qu'un conducteur arrivant à proximité d'un incident signale l'événement à l'exploitant en utilisant un terminal embarqué dans son véhicule. La probabilité de signalement d'un incident par un automobiliste arrivant à proximité dépend de sa volonté de remonter l'événement à l'exploitant de la section affectée par cet incident. Une alarme est déclenchée quand un ou plusieurs signalements sont notifiés à l'exploitant sur une longueur de tronçon définie et pendant un intervalle de temps donné.

Les performances de l'alerte incident dépendent des facteurs suivants : la proportion de véhicules équipés, le niveau de trafic, le type d'incident et la longueur de la zone de détection (zone de vision d'un automobiliste vis-à-vis d'un incident). Pour les systèmes de communication basés sur des équipements au sol, l'interdistance entre balises est un élément important.

Le temps de détection est défini comme le temps écoulé entre l'apparition d'un incident sur la chaussée et son signalement par un conducteur équipé d'un dispositif embarqué de communication route – véhicule. Ce temps de détection dépend essentiellement du taux d'équipement des véhicules et de la charge de trafic au moment de l'incident.

En France, l'interdiction d'utilisation des téléphones portables au volant pourrait militer en faveur du développement et la mise en œuvre de systèmes d'alerte basés sur des communications à courte portée.

III.6.2. Enjeux de la gestion des incidents

Les enjeux de la gestion des incidents sont primordiaux pour la sécurité routière. En cas d'accident corporel, la gravité peut être diminuée par une intervention plus rapide. D'après une étude américaine, il s'avère qu'une victime d'un accident meurt au bout de 5 minutes d'un arrêt respiratoire, de 15 minutes d'une compression intra-thoracique, de 30 à 60 minutes d'une hémorragie intra-abdominale. Ainsi, une importante proportion des décès par accident peut être évitée en écourtant le délai d'intervention. D'autre part, le signalement sur autoroute, de la fin de queue causée par un incident permet de diminuer le risque d'accident secondaire. En cas de fermeture de l'autoroute, le report du trafic modifie la sécurité sur les itinéraires de délestage qui ont fatalement des caractéristiques inférieures à celles de l'autoroute.

Il existe également des enjeux en matière d'impacts sur les temps de parcours. Un des plus importants est qu'une intervention plus rapide diminue les pertes de temps, causées par l'accident, pour les conducteurs se trouvant sur l'autoroute en amont.

Enfin d'autres impacts 'indirects' de la gestion des incidents pourraient être pris en compte tels que la réduction des émissions de polluants et de la consommation de carburant dues notamment aux gains de temps évoqués ci-dessus.

III.6.3. Enjeux sur la sécurité

L'influence des conditions de circulation (débit, vitesse, taux d'occupation) sur le niveau d'insécurité est importante. Dans ce contexte, plusieurs études montrent que dans le cas des autoroutes, le nombre d'accidents varie en fonction du débit horaire selon une courbe en forme de la lettre U. Aux débits élevés, les accidents impliquant plusieurs véhicules sont plus nombreux mais moins graves. En revanche, aux faibles débits, les accidents sont moins nombreux mais graves voire mortels (dus en grande partie à une vitesse moyenne élevée).

Les actions d'exploitation ont un impact sur les secours apportés aux blessés selon la nature de l'accident. Ceci se traduit par des tâches d'alerte et d'intervention des services concernés et par une localisation plus rapide des itinéraires les plus fluides. L'autre enjeu est l'impact de ces mêmes tâches d'exploitation sur la réduction des sur-accidents. Une rapidité d'intervention permet de réduire la durée de l'accident primaire et par conséquent la durée d'exposition à un accident secondaire. Un balisage au niveau de l'incident protège les personnes se trouvant dans la zone exposée et enfin on affiche des messages d'alerte en amont de l'incident via différents moyens d'information : Panneaux à Messages Variables, radio ou dispositif embarqué de type AIDA que nous détaillerons dans notre troisième partie.

III.6.4. Description de la chaîne de gestion des incidents

La gestion des incidents comporte plusieurs tâches :

- *La détection des incidents* qui peut s'effectuer soit par une intervention humaine : appel téléphonique, Réseau d'Appel d'Urgence, patrouilleur, surveillance d'écrans de télévision ; soit d'une manière automatique à travers des données traitées par des outils tels que des boucles électromagnétiques, des caméras et des radars ;
- *La coordination des actions à engager* qui est fortement tributaire de la nature de l'incident et des moyens disponibles ;
- *La réponse à l'incident* ou l'intervention des équipes médicales en cas d'accidents corporels et aussi des services de déblaiement de la chaussée ;
- *Les actions d'exploitation* consistant à diffuser des informations aux conducteurs par différents médias : PMV, radio et aussi à signaler les fins de retenue, le détournement aux entrées et le délestage.

Une perturbation due à un incident est constituée par une suite d'intervalles de temps détaillés ci-dessous :

- Le temps de détection **T1**, correspondant à l'intervalle entre le moment où se produit l'incident et le moment où celui-ci est signalé à l'exploitant routier ;
- Le temps de réponse (transmission, traitement et diagnostic) **T2** qui est le temps écoulé entre le signalement à l'exploitant et l'arrivée des services d'intervention sur les lieux de l'incident ;
- Le temps d'intervention **T3** nécessaire au déblaiement de la chaussée ;

- Le temps de retour à la normale **T4** qui représente le temps de rétablissement des conditions de circulation à leur état normal d'avant l'incident ou à celui qui prévaudrait normalement s'il n'y avait pas eu d'incident.

La figure ci-dessous montre l'enchaînement des étapes d'une chaîne de gestion d'incidents :

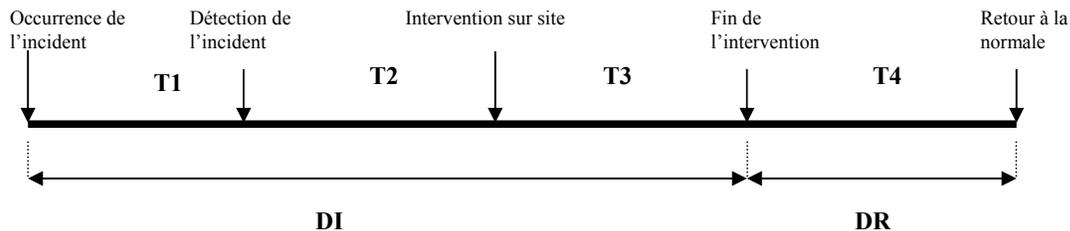


Figure n° III.1 – Chaîne temporelle d'une gestion d'incidents

L'intervalle symbolisé par **DI** dans la figure est celui de la durée entre l'occurrence de l'incident et la fin de l'intervention. Cette durée est tributaire de plusieurs facteurs tels que les outils de détection, les moyens humains d'organisation et d'intervention sur le terrain.

Par ailleurs, l'intervalle **DR**, représentant la durée de rétablissement de la circulation comprise entre la fin de l'intervention sur site et le retour à la normale, est proportionnel à la charge de trafic sur la section considérée c'est-à-dire le rapport de la demande (débit en amont de l'incident) à la capacité de cette section.

III.6.5. La détection des incidents par les véhicules traceurs

III.6.5.1. Les projets TRANSMIT et TRANSTAR

Dans les villes de New York et de Houston, ont été respectivement lancés les projets TRANSMIT et TRANSTAR. Ils ont été initiés en vue de tester la faisabilité de l'utilisation du lien télépéage pour la supervision du trafic et la détection d'incidents. Le concept est basé sur l'installation de lecteurs de badges hyperfréquence (balises) espacés régulièrement le long de l'autoroute. Chaque fois qu'un véhicule équipé d'un badge hyperfréquence passe sous la balise, son identifiant et le temps de passage sont enregistrés et transmis à un serveur central tout en préservant l'anonymat des automobilistes. Ainsi, les temps de parcours des véhicules sont estimés à travers l'analyse des temps mis entre deux balises successives. D'autre part, des incidents sont identifiés en comparant les temps de parcours mesurés avec des valeurs dites « normales » de temps de parcours sur la même période de la journée et aussi le même jour de la semaine. Quand un certain nombre de véhicules (valeur non donnée) ont de longs temps de parcours inhabituels (3 fois la valeur de l'écart type du temps de parcours moyen), ceci signifie un incident détecté.

La détection s'effectue à partir de l'algorithme SND (Standard Normal Deviate) développé par Dudek et Messer (Dudek & al, 1974). Le principe consiste à comparer le temps de parcours mesuré sur un tronçon à l'instant 't' à un seuil (temps de parcours maximum) à partir duquel on considère qu'un incident affectant l'écoulement du trafic a lieu sur le tronçon. Le seuil est déterminé pour chaque tronçon et pour chaque intervalle de temps d'une journée à partir du temps de parcours moyen mesuré sur le tronçon pendant le même intervalle de temps.

L'espace entre les balises est fixé de manière à minimiser le taux de fausses alarmes (au maximum 2 %) et le temps moyen de détection d'un incident (au maximum 5 minutes). Ainsi, ces applications permettent d'établir des matrices O/D et d'estimer des temps de parcours.

Dans le cas de Houston, 720 balises sont déjà installées en section courante et 350 000 badges sont en circulation afin de mener une expérimentation visant à estimer les temps de parcours à travers les passages des véhicules traceurs [Ullmann, 1996]. Ceci permet de détecter la congestion due à des incidents dans un délai comparable à celui des boucles électromagnétiques à condition qu'il y ait un nombre adéquat de véhicules capteurs et des volumes de trafic importants.

Dans un flux de trafic, on mesure les temps de parcours entre deux points définis du réseau routier. Les systèmes de localisation automatique de véhicules 'AVL' (Automatic Vehicle Location) et d'identification automatique de véhicules 'AVI' (Automatic Vehicle Identification) ont été tous les deux testés.

L'avantage des véhicules traceurs est d'avoir la possibilité de calculer un temps de parcours sur un quelconque segment autoroutier donné. Les études montrent l'importance de la précision de l'information 'temps de parcours' sur le comportement des conducteurs en matière de choix d'itinéraire et de délestage.

Une expérimentation menée par le 'Texas Transportation Institute' (TTI) visait à faire varier le format des informations d'un jour à l'autre pour les conducteurs dès que ces derniers appelaient sur leur téléphone cellulaire. La variation du format de l'information consistait à donner uniquement la localisation d'un incident ; le temps de parcours et la localisation de l'incident ; ou l'incident et le retard.

Les résultats de cette étude n'ont pas montré de différence significative entre les formats d'information définis.

Les chercheurs du TTI ont voulu tester les temps de parcours (fournis par les véhicules capteurs) à une fonction de détection d'incidents. Pendant le test avec les téléphones cellulaires, on a modifié l'algorithme 'SND' (Standard Normal Deviate) qui a été développé à l'origine pour la détection d'incidents utilisant des données fournies par les boucles. Dans sa forme modifiée, l'algorithme 'SND' permet de juger statistiquement si un temps de parcours obtenu grâce à un véhicule capteur, excède d'une manière significative le temps de parcours normal sur la même section et au même moment de la journée. Si c'est le cas, on estime qu'il y a une congestion non récurrente (ex : un incident) présente sur cette même section.

En effet, l'algorithme 'SND' établit un intervalle de confiance sur le temps de parcours typique ou moyen. Cet algorithme est basé sur l'hypothèse suivante :

les temps de parcours, sur une section donnée à un instant donné de la journée, suivent une distribution normale avec une valeur moyenne μ et un écart type.

La déviation SND d'un temps de parcours sur un tronçon est calculée par la formule suivante :

$$SND = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

dans laquelle

x désigne le temps de parcours d'un tronçon mesuré à l'instant 't',

\bar{x} le temps de parcours moyen du tronçon pour un intervalle de temps donné,

σ la déviation standard du temps de parcours du tronçon pour l'intervalle de temps donné.

À partir de cette formulation, on déduit, dans des conditions de circulation nominales, c'est-à-dire sans incident, le temps de parcours à l'instant 't' d'un tronçon :

$$x = \bar{x} + SND \cdot \sigma$$

On présume la détection d'un incident si un temps de parcours mesuré sur un tronçon excède l'intervalle de confiance calculé autour du temps de parcours moyen du tronçon à une heure donnée.

SND est la valeur correspondant au test Z de statistique classique pour une population respectant une distribution normale. Le SND permet d'estimer l'intervalle de confiance. Par exemple, pour une valeur de SND égale à 2, correspond un intervalle de confiance de 97.72 % de la population contenue dans l'intervalle $[\mu \pm 2\sigma]$.

Une base de données de 1133 incidents ayant un impact sur le trafic a été développée. En même temps, l'exploitation des temps de parcours mesurés hors incidents par des systèmes de communication route-véhicule a permis d'obtenir des temps de parcours moyens par tronçon et par tranche horaire de 15 min.

Les critères de performance de la détection des incidents par les véhicules capteurs sont pour les périodes de pointe du matin et du soir :

- le taux de détection (ratio entre le nombre d'incidents correctement identifiés via l'algorithme de temps de parcours et le nombre d'incidents survenus)
- le taux de fausses alarmes (rapport entre le nombre de fausses alarmes d'incidents et du nombre total de temps de parcours mesurés par les véhicules capteurs).

Le tableau ci dessous donne les valeurs numériques de ces paramètres pour différents algorithmes de DAI classiques basés sur des boucles magnétiques :

Algorithme	taux de détection	taux de fausses alarmes
SND - véh capteurs	58 %	5.3 %
Californien	82 %	1.7 %
Californien modifié	68 %	0.177 %
SND - boucles	92 %	1.3 %
McMaster	68 %	0.0018 %

Tableau n° III.2 – Performances des algorithmes de DAI

D'après le tableau n°III.2, le taux de détection le plus bas (58 %) est relatif à la détection par les véhicules capteurs. Ceci s'explique par le faible nombre de véhicules traceurs qui donnent l'information 'temps de parcours' (200 véhicules pour la démonstration). De plus, les distances entre les points de mesure (6 à 10 km) rendent l'estimation du temps de parcours insensible aux perturbations locales de trafic. Ainsi, des points de relevés plus rapprochés augmenteront le taux de détection.

L'expérimentation de Houston a montré l'intérêt de la collecte 'temps de parcours' par les véhicules traceurs et aussi la détection de la congestion due à un incident aux conditions qu'il y ait un nombre suffisant de véhicules capteurs et des conditions de trafic assez denses. En revanche l'utilité et la

réponse de l'utilisateur à une information 'temps de parcours' sur le réseau associé demeurent inconnues.

III.6.6. Algorithmes de DAI basés sur des systèmes de communication route - véhicule

Trois algorithmes basés sur les données d'un système de communication route-véhicule sont proposés par Parkany et Bernstein (Parkany & al, 1994) :

- Algorithme de temps inter-véhiculaire (Headways Algorithm) ;
- Algorithme de changement de voie (Lane Switches Algorithm) ;
- Algorithme de surveillance des voies (Lane-Monitoring Algorithm).

III.6.6.1. Algorithme de temps inter-véhiculaire

Il est basé sur la comparaison temporelle et spatiale des temps de parcours et des temps inter-véhiculaires des véhicules traceurs. Il consiste à réaliser trois tests séquentiels pendant chaque intervalle de temps. Si les trois tests sont satisfaits pendant un intervalle de temps, un incident est déclaré.

Test 1

Pour chaque intervalle de temps, on calcule d'abord le temps de parcours moyen des véhicules traceurs entre deux balises, à partir de la formule suivante :

$$ATT(t_{cur}, r_{down}) = \frac{1}{N_V(t_{cur})} \sum_{j=1}^{N_V(t_{cur})} TT_j$$

dans laquelle :

$ATT(t_{cur}, r_{down})$ désigne le temps de parcours moyen pendant un intervalle de temps courant (t_{cur}) entre balise amont (r_{up}) et balise aval (r_{down}),

$N_V(t_{cur})$: le nombre de véhicules traceurs passés par la balise aval pendant l'intervalle de temps courant,

TT_j : le temps de parcours du véhicule traceur j.

Le premier test consiste à examiner la contrainte ci-dessous :

$$|ATT(t_{cur}, r_{down}) - ATT(t_{prev}, r_{down})| > HD_TH1$$

avec :

$ATT(t_{prev}, r_{down})$: temps de parcours moyen pendant intervalle de temps précédent (t_{prev}) entre balise amont (r_{up}) et balise aval (r_{down}),

HD_TH1 : seuil prédéfini dépendant du débit.

Quand le test 1 est satisfait, on poursuit avec le test 2. Sinon, on considère qu'il n'y pas d'incident entre deux balises et les tests 2 et 3 ne seront pas effectués.

Test 2

Pour réaliser le test 2, il faut calculer d'abord le temps inter-véhiculaire moyen des véhicules traceurs passant par une balise pendant un intervalle de temps. Il est calculé ainsi :

$$HDWYS(t_{cur}, r_{down}) = \frac{1}{Nv(t_{cur})} \sum_{j=2}^{Nv(t_{cur})} t_j - t_{j-1}$$

avec :

$HDWYS(t_{cur}, r_{down})$: temps inter-véhiculaire moyen des véhicules traceurs passant par la balise aval (r_{down}) pendant l'intervalle de temps courant (t_{cur}) ;

t_j : heure de passage du véhicule équipé j par la balise aval pendant l'intervalle de temps courant ;

t_{j-1} : heure de passage du véhicule équipé $(j-1)$ par la balise aval pendant l'intervalle de temps courant.

Le test 2 consiste à comparer le temps inter-véhiculaire des véhicules traceurs pour l'intervalle de temps courant à ceux des intervalles de temps précédents, par rapport à un seuil prédéfini noté : HD_TH2 .

Test 3

Il consiste à comparer le temps inter-véhiculaire moyen des véhicules traceurs mesuré par les balises amont et aval. Le test 3 revient à examiner la contrainte suivante :

$$|HDWYS(t_{cur}, r_{down}) - HDWYS(t_{cur}, r_{up})| > HD_TH3$$

avec :

$HDWYS(t_{cur}, r_{down})$: temps inter-véhiculaire moyen des véhicules traceurs passant par la balise aval pendant l'intervalle de temps courant ;

$HDWYS(t_{cur}, r_{up})$: temps inter-véhiculaire moyen des véhicules traceurs passant par la balise amont pendant l'intervalle de temps courant ;

HD_TH3 : seuil prédéfini.

III.6.6.2. Algorithme de changement de voie

Il est basé sur le constat suivant : un nombre important de changement de voie par des véhicules traceurs d'une balise à l'autre implique vraisemblablement des conditions de circulation instables. Il suppose que le système technique est capable d'identifier la voie de circulation occupée par chaque traceur au moment de son passage. Ceci nécessite généralement l'installation d'une série de balises dédiées pour chaque voie de la section examinée.

L'algorithme consiste à calculer à chaque intervalle de temps, le pourcentage de véhicules traceurs ayant effectué un changement de voie entre deux balises et de le comparer avec un seuil prédéfini. La proportion de véhicules ayant changé de voie est calculée de la manière suivante :

$$NM_SW(t_{cur}, r_{down}) = \frac{1}{Nv(t_{cur})} SWITCH(t_{cur}, r_{down})$$

Si la proportion de véhicules traceurs ayant changé de voie pendant un intervalle de temps est supérieure à un seuil prédéfini, un incident est déclaré.

III.6.6.3 Algorithme de surveillance des voies

Le principe consiste à observer, pendant deux ou plusieurs intervalles de temps, des véhicules traceurs passant par chaque voie de circulation en un point de la route équipé de balise. Si peu de véhicules sont présents sur une voie donnée, on examine si plus de véhicules sont sur les autres voies. À chaque intervalle de temps, le débit de chaque voie est comparé avec un seuil bas. Lorsque le seuil bas est vérifié sur une voie, on examine le débit des autres voies par rapport à un seuil haut. Si le débit sur une des voies restantes dépasse le seuil haut, un incident est alors déclaré.

Pour réduire les fausses alarmes les données sont lissées. L'algorithme utilise le débit moyen des véhicules équipés de chaque voie sur un nombre d'intervalles de temps prédéfinis (deux ou trois). Ainsi, le débit moyen des véhicules équipés pendant deux intervalles de temps sur la voie lente (voie 1) est calculé par :

$$LN_AVG(t_{cur}, r_{down}, l_1) = \frac{Nv(l_1, t_{prev}) + Nv(l_1, t_{cur})}{2}$$

avec :

$Nv(l_1, t_{prev})$: nombre de véhicules passant par la voie 1 au droit de balise pendant l'intervalle de temps précédent ;

$Nv(l_1, t_{cur})$: nombre de véhicules passant par la voie 1 au droit de balise pendant l'intervalle de temps courant.

III.6.6.4. Évaluation en simulation

Parkany et Bernstein ont effectué une comparaison en simulation des performances des algorithmes décrits ci-dessus avec celles des approches classiques basées sur des données de boucles de comptage.

La simulation porte sur une portion (19.31 km) de voie rapide à 3 voies de circulation. Plusieurs scénarii sont testés avec différents types d'incidents, différentes localisations et plusieurs niveaux de trafic.

Les caractéristiques de simulation sont les suivantes :

Longueur du réseau : 19.31 km

Distance entre les points de mesure : 1.21 km

Durée de simulation : 40 min dont 15 min pour le chargement du réseau

Incident placé à 0.4 km en amont du capteur (magnétique ou balise)

Nombre de scénarii d'incidents (un incident ayant une durée de 5 à 20 mn) : 40

Trois niveaux de trafic : 1000 véh/h/voie, 1200 véh/h/voie et 1400 véh/h/voie

Taux d'équipement des véhicules : 50% de la flotte totale de véhicules

Intervalle de temps d'évaluation des algorithmes : 30 secondes.

Un incident est considéré comme détecté s'il est déclaré dans un délai de 6 min suivant l'instant où il débute dans la simulation. Au-delà de ce délai, il s'agit d'une fausse alarme.

Le tableau suivant présente les résultats obtenus avec les trois algorithmes basés sur les véhicules traceurs en comparaison avec l'algorithme Californien #7 basé sur des données de boucles magnétiques.

Algorithme	TD*	TFA**		TMD***
	(%)	(NFA / h)	(NFA / 30s)	(mn)
<i>Headways algorithm</i>	75	1,30	0,0195	2,00
<i>Lane switches algorithm</i>	94	0,65	0,0098	2,94
<i>Lane monitoring algorithm</i>	92	2,20	0,0330	1,73
<i>California algorithm #7</i>	53	1,05	0,0158	2,19

*TD : Taux de Détection,

**TFA : Taux de Fausses Alarmes ; NFA : Nombre de Fausses Alarmes

***TMD : Temps Moyen de Détection

Tableau n° III.3 – Performances de la DAI par véhicules traceurs

Pour un taux d'équipement de 50% et un niveau de trafic élevé, les trois algorithmes basés sur la communication infrastructure - véhicule sont assez performants.

III.6.6.5. DAI par fusion des données traceurs et boucles

Il s'agit de mettre à profit les données de la communication route-véhicule pour renforcer la fiabilité et la précision des temps de parcours estimés à partir des moyens traditionnels et aussi pour améliorer la performance des méthodes de DAI basées sur les capteurs à boucles magnétiques. Dans la littérature, des architectures de systèmes de DAI fusionnant des données provenant des boucles magnétiques et de véhicules traceurs sont proposées selon deux étapes : une première consistant en une présomption d'un incident et la seconde correspondant à une vérification (Westerman, 1996). Néanmoins, un calibrage et des expérimentations sont nécessaires afin d'évaluer la performance de ce type de systèmes.

III.7. Fonction de recueil de données

Le recueil des données constitue une chaîne d'informations comportant les maillons suivants :

- capteur : procédé physique permettant d'appréhender les phénomènes à mesurer
- détecteur : dispositif électronique servant à mettre en forme le signal issu du capteur
- transmissions : concerne les liaisons capteur / détecteur ; détecteur / unité locale ; unité locale / unité centrale
- traitement : permet de fournir des données élaborées à partir de signaux de détecteurs. Cette tâche peut être centralisée ou effectuée partiellement par des unités locales.

Une distinction est effectuée entre les capteurs de mesure fournissant des informations chiffrées (ex: débit, vitesse,..) et entre des capteurs d'événements (ex : DAI,..).

Généralement, les critères de performance des capteurs de mesure sont : la précision (égale au rapport entre la valeur mesurée par le capteur et une valeur de référence) ; l'erreur E correspondant à la différence entre la valeur de référence et la valeur mesurée ; le taux d'erreur représenté par le rapport : $E/\text{valeur de référence}$.

En revanche, les critères de performance des capteurs d'événements sont :

- taux de détection : rapport entre le nombre d'événements intéressants détectés et le nombre réel de ces événements ;
- taux de fausses alarmes désignant le rapport le nombre de détections erronées et le nombre des événements intéressants ;
- temps de détection qui correspond à la durée s'écoulant entre l'occurrence de l'événement et le déclenchement de l'alerte.

La connaissance précise des temps de parcours et des autres paramètres de déplacement représente aujourd'hui une demande conséquente de la part des conducteurs et des exploitants d'infrastructures. Ces données sont d'autant plus pertinentes que les conditions de circulation deviennent difficiles (incidents, grands départs saisonniers,..).

Deux approches permettent principalement de déterminer les temps de parcours. La première repose sur une mesure directe des temps de parcours réalisés par un certain nombre de véhicules à l'aide de détecteurs embarqués à bord de ces véhicules (capteurs embarqués) ou d'observateurs localisés le long des routes (enquêtes sur les plaques minéralogiques). Dans cette approche, les véhicules peuvent être soit actifs, c'est-à-dire instrumentés et ayant pour consigne la collecte du temps de parcours : c'est le concept des véhicules flottants ; soit passifs et dans ce cas, les véhicules dans un flot de trafic disposent de moyens de communication et de mesure de leurs temps de parcours : ce sont les véhicules traceurs.

La seconde approche est basée sur des variables macroscopiques de trafic : débit, taux d'occupation, aisément calculables par des outils classiques de recueil des données de trafic.

III.7.1. Utilisation des données de temps de parcours

L'utilisation des temps de parcours par les exploitants d'infrastructures, les opérateurs de services recouvre divers aspects : diagnostic de l'état de circulation, gestion du trafic en temps réel, détection d'incident, qualité du service et information routière, identification des points noirs.

Les véhicules traceurs peuvent, grâce à des algorithmes de prévision, mesurer le temps de parcours actuel à partir duquel un système d'aide à l'exploitation pourra évaluer l'état du trafic sur le réseau et le temps de parcours prévu (il s'agit du temps que va mettre le véhicule entrant à un instant donné pour parcourir l'itinéraire considéré).

Les données recueillies sont de 2 types :

III.7.1.1. Les données temps-réel

Ce sont les variables instantanées suivantes :

- temps de parcours instantané et vitesse par segment à partir d'un calcul directement effectué en sortie après la lecture d'informations contenues dans le badge et préalablement encodés lors du passage sous la balise précédente au niveau de l'entrée du segment.

III.7.1.2. Les données statistiques et historiques

A partir des données citées ci dessus, des variables statistiques peuvent être calculées :

- statistiques relatives aux temps de parcours : distribution, valeurs extrêmes, valeurs moyennes, écart type,..
- calcul des vitesses de passage dans les différents segments du réseau ainsi que la répartition des vitesses ;
- statistiques relatives aux itinéraires empruntés sur le réseau (ex : cas des réseaux maillés).

CHAPITRE IV

TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION ENTRE LES VEHICULES ET L'INFRASTRUCTURE

Les différents types de systèmes se distinguent par le média de communication utilisé entre l'infrastructure et les véhicules. Ces technologies ont fait l'objet de plusieurs expérimentations. Certaines de ces techniques ont conduit à une mise en œuvre de systèmes opérationnels.

D'autre part, des instances telles que la Conférence européenne des Postes et Télécommunications (CEPT) sont responsables des normes de transmission. Celles-ci sont établies de manière fiable afin d'éviter des interférences avec d'autres moyens de transmission.

Le codage de l'information est normalisé en tenant compte de la compatibilité du code aval et l'évolutivité des versions. Le codage doit être aussi dense que possible pour éliminer toute contrainte liée à la capacité du canal de transmission.

Dans le domaine de la télématique routière, une coopération technique et politique entre les pays Européens s'avérait indispensable pour assurer une interopérabilité des systèmes et une compatibilité des services. Les motivations de cette démarche sont nombreuses. Une des plus importantes est la réduction des coûts des équipements et des services favorisant un taux de pénétration élevé des systèmes embarqués.

Les travaux de normalisation menés au sein des instances ISO (International Standard Organisation), CEN (Comité Européen de Normalisation) et ETSI (European Technical Scientific Institute) visent à définir d'une part des fonctionnalités communes de systèmes et d'autre part des interfaces les rendant compatibles entre eux.

IV.1. Technologies de communication infrastructure – véhicule :

Hormis la transmission analogique par voie hertzienne telle que la fréquence modulée FM dédiée à l'information autoroutière, les principales technologies de communication entre la route et le véhicule sont :

- La communication à courte portée ou DSRC ;
- La téléphonie cellulaire ou GSM (Global System for Mobile communications) ;
- La technologie sans fil appelée WIFI.

D'autres techniques de diffusion, par voie hertzienne, d'informations aux conducteurs se sont développées. Il s'agit de la transmission par RDS-TMC et la radio numérique DAB (Digital Audio Broadcasting).

Nous aborderons également dans cette partie la technique de localisation par satellite (GPS) qui est souvent associée aux différentes technologies de communication citées ci-dessus.

IV.1.1.La communication à courte portée par DSRC

IV.1.1.1. Principes de la technologie

Les communications à courte portée (DSRC) sont issues d'une des technologies utilisables pour la liaison sol- véhicule. C'est un média qui offre la possibilité de développer plusieurs applications comme le télépéage (péage électronique), l'information routière, les aides à la navigation, l'assistance à la conduite, la gestion de l'information des transports en commun et des véhicules commerciaux et enfin les systèmes de priorité aux feux.

Ce lien hyperfréquence sol- véhicule à courte distance utilise des zones de communication entre les mobiles et l'infrastructure de l'ordre de 4 à 10 mètres. La liaison est bidirectionnelle et se base sur un fonctionnement en semi-duplex (signifie que les équipements fixes et mobiles émettent à tour de rôle).

L'instance internationale de normalisation ISO a défini un modèle destiné à permettre le dialogue entre des systèmes hétérogènes. Ce système, appelé "modèle de référence pour l'interconnexion des systèmes ouverts", est basé sur une architecture composée de sept niveaux ou couches. Chacun d'eux effectue des fonctions indépendantes de celles assurées par les autres niveaux.

Le modèle de communication à courte portée DSRC est conforme à cette architecture mais avec une importance accordée à 3 couches suffisantes pour les besoins de la communication. Ce sont la couche 1 dite 'physique' basée sur le lien micro-ondes à 5.8 GHz, la couche 2 permettant la gestion des données et les communications point à point entre équipement au sol et dispositif embarqué et la couche 7 dite 'd'application' comportant un ensemble de commandes qui traitent les applications envisagées.

La fréquence de communication est centrée sur 5.8 GHz avec l'allocation d'une bande passante de 10 MHz. Plusieurs canaux sont exploitables dans cette bande. Ils sont fonction des choix technologiques faits par les industriels. La technologie DSRC permet plusieurs classes de débits allant de 250 kbits/s à 1 Mbits/s. En Europe, les débits utilisés pour la majorité des applications et notamment le télépéage sont de 500 Kbits/s dans le sens descendant (infrastructure vers véhicule) et de 250 Kbits/s dans le sens montant (véhicule vers infrastructure).

Pendant la durée de communication, un lien logique entre l'équipement au sol et le véhicule est établi. La communication effectuée en alternance est basée sur des fenêtres temporelles ou créneaux de communication.

La couche 7 a pour rôle d'intégrer plusieurs applications sur le même média de communication en organisant les flux de données de manière à les intégrer dans des trames DSRC.

IV.1.1.2. Domaines d'applications

Le lien dédié à courte portée DSRC représente l'interface 'air' de la communication qui se résume à la transmission radio.

Les communications à courte portée DSRC peuvent supporter plusieurs applications mais qui fonctionnent encore de manière indépendante. Nous pouvons citer :

- Les transactions financières électroniques (télépéage) : considérée aujourd'hui comme l'application la plus répandue du fait qu'à l'origine, la technologie DSRC a été conçue pour répondre à ce besoin.
- L'alerte des conducteurs en amont d'un incident (prévention des collisions) : les DSRC constituent un moyen d'alerter, dans une zone limitée et d'une manière très précise, les conducteurs arrivant en amont d'un incident afin d'éviter des sur-accidents.
- L'aide à l'appel d'urgence : Par le DSRC, on fait parvenir au conducteur, un numéro de téléphone à appeler à partir d'un téléphone cellulaire (ex : n° de peloton de gendarmerie ou d'équipes de secours en charge de la section affectée).
- La collecte de données de trafic : Les véhicules équipés d'un équipement DSRC deviennent une source de recueil d'informations sur l'état de trafic. Ainsi, il sera possible de recueillir des vitesses moyennes, des temps de parcours ou des temps inter-véhiculaires ;
- La collecte d'informations événementielles : Les véhicules équipés peuvent remonter des informations directement liées au véhicule telles que les mauvaises conditions météorologiques (grâce à l'allumage des feux anti-brouillard ou à l'actionnement des essuie-glace) du recueil de vitesses instantanées ou des situations anormales (ex : fort ralentissement,..).
- L'information routière dynamique : consistant à redistribuer par le lien descendant sol – véhicule les informations collectées comme des bouchons, travaux, accidents,...
- La navigation et le guidage routier
- Les informations pour le confort: fournissant aux conducteurs des services de proximité (aires de services ou de repos, tarifs des carburants et signalisation des sorties,...)
- Les carrefours intelligents : Les DSRC peuvent être utilisées pour des applications aux transports en commun pour gérer la priorité des bus ou d'autres véhicules d'urgence aux feux tricolores.

IV.1.1.3. Exemples d'expérimentations

En France, le système de télépéage Liber-t (Télépéage Inter Sociétés) commun à toutes les sociétés concessionnaires d'autoroutes est opérationnel depuis le mois de juillet 2000. 1 100 000 badges Liber-t sont actuellement en circulation. En Norvège, le projet AUTOPASS vise à déployer un système aux normes européennes sur une partie du réseau autoroutier, notamment à Oslo et Trondheim.

Le tableau ci-dessous décrit la situation actuelle des systèmes de télépéage en Europe :

Pays	Nom du service de télépéage	Nombre d'abonnés
Italie	TELEPASS	4 000 000
Portugal	VIA VERDE	1 600 000
France	LIBER-T	1 100 000
Norvège	AutoPASS	1 100 000
Autriche	GO !	350 000
Espagne	VIA-T	300 000
Danemark	BroBIZZ	150 000
Suède	BroBIZZ	100 000
Royaume Uni	DarTAG	150 000

Tableau n°IV.1 – Situation du Télépéage en Europe

Concernant les services complémentaires au télépéage, les projets AIDA et RTA (Road Traffic Advisor) en Europe ont pour objectif de développer un système d'aide au déplacement aux conducteurs.

Aux Etats-Unis, les porteurs de badges sont utilisés comme véhicules traceurs, dans les projets TRANSTAR à Houston et TRANSMIT à New York, pour estimer les temps de parcours et détecter les incidents. Le recueil des données sur les déplacements est obtenu par un suivi des mobiles eux-mêmes, via les balises auxquelles on associe des capteurs météo et polluants installés sur l'infrastructure. Le projet HELP (Heavy Vehicle Electronic Licence Plate) exploite un système de télépéage pour effectuer en section courante le contrôle automatique des poids lourds. Ce dispositif est déployé sur le réseau des autoroutes inter-états. Il effectue en temps réel un contrôle réglementaire, à partir des données lues par l'antenne au passage des camions équipés de badges.

IV.1.1.4. Normalisation

A l'échelle européenne, la normalisation des technologies DSRC est récente. Elle est conduite par le CEN pour les services routiers basés sur les communications à courte portée. En Europe, les travaux de standardisation ont porté essentiellement sur l'application de télépéage. Le CEN a établi des normes pour les couches 1, 2 et 7. Elles ont été définitivement votées en 2003 et 2004. Aux Etats Unis, les couches 1 (physique) et 2 (liaison) ont été normalisées pour les applications relatives au péage et à la gestion des véhicules commerciaux. Une demande d'utilisation de la bande 5.85-5.925 GHz pour les communications à courte portée DSRC, a été formulée auprès de l'autorité régulatrice des télécommunications FCC.

Au Japon, nous assistons à une forte évolution de la technologie DSRC. Cependant, le mode d'accès au media choisi par les Japonais diffère de celui retenu par le CEN en Europe. Cette différence réside dans le fait que l'équipement au sol adresse en continu des messages aux dispositifs embarqués et reçoit simultanément leurs réponses sur un autre canal. En effet, Les technologies

DSRC sont utilisées au Japon pour des applications demandant un échange d'un volume important de données.

IV.1.1.5. Avantages

- Une communication DSRC dédiée encapsule les données transmises. Une trame DSRC transporte tout type de données.
- Rapidité, sécurité des transmissions.
- Bonne fiabilité des données échangées (taux d'erreur de 10^{-6} à la vitesse de 160 Km/h).
- Technologie pouvant supporter simultanément plusieurs applications
- Localisation précise des véhicules
- Norme DSRC stabilisée
- Gratuité de la fréquence de transmission contrairement à la téléphonie cellulaire

IV.1.1.6. Inconvénients

- Technique limitée aux infrastructures équipées de balises
- Dépendante du taux d'équipement des véhicules
- Stade expérimental pour quelques applications basées sur cette technologie
- Capacité de transmission réduite (sauf pour la norme japonaise)
- Besoin de synchronisation des horloges de tous les communicateurs constituant le système. La fiabilité du calcul des temps de parcours en est fortement tributaire.

IV.1.2. La communication par téléphonie cellulaire GSM

IV.1.2.1. Principes de la technologie

Le principe de base de la radiotéléphonie cellulaire consiste à mettre en place de nombreux émetteurs de faible puissance couvrant des zones géographiques réduites. Ainsi, en limitant la taille des cellules, on peut réutiliser plusieurs fois, les mêmes fréquences dans les cellules voisines.

Une architecture de téléphonie cellulaire est constituée des stations mobiles (MS ou Mobile Station), des stations de base (BTS ou Base Transceiver Station et BSC ou Base Station Controller) et des centres de commutation mobile (MSC ou Mobile Switching Centre).

La norme la plus utilisée est le GSM fonctionnant dans les bandes de fréquences 890-915 MHz (dans le sens montant du mobile vers la station fixe) et 935-960 MHz (dans le sens descendant de la station fixe vers le mobile). Une bande passante de 25 MHz est utilisée pour ce type de média. Ces deux bandes de fréquence sont divisées en 124 canaux de 200 kHz qu'exploitent les opérateurs GSM. Chaque canal est multiplexé grâce à la technique d'accès multiple à répartition dans le temps ou TDMA (Time Division Multiple Access) en 8 intervalles de temps.

Les possibilités existantes du GSM dans le domaine de la communication entre la route et les véhicules sont les messages courts SMS (Short Message Service) dont l'usage est de plus en plus répandu et qui peuvent être adaptés à l'information routière et à l'alerte rapide.

Il existe aussi le GPRS (General Packet Radio Service) reposant sur la transmission par paquets sur des canaux multiples en parallèle et selon plusieurs modes : point à point, point à multipoint et connexions anonymes. Cette dernière configuration est adaptée au calcul des temps de parcours par des véhicules traceurs. Enfin, la future génération de la téléphonie cellulaire UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) autorisera des débits de 2 Mbits/s ouvrant ainsi l'opportunité de développer une multitude de services à valeur ajoutée.

IV.1.2.2. Domaines d'application

Cette technologie permet le développement de plusieurs applications telles que :

- un système d'appel d'urgence comme le numéro européen '112' ou américain '911'.
- une localisation du mobile par triangulation (par exemple entre trois stations BTS)
- une diffusion de messages courts lors du passage du véhicule dans une cellule (SMS-CB ou Short Message Services – Cell Broadcast)
- un accès à l'Internet mobile via le protocole WAP (Wireless Application Protocol)
- un accès direct au réseau d'appel d'urgence (RAU) d'un exploitant d'infrastructures à travers des nano-répéteurs GSM installés sur les postes d'appel d'urgence (PAU)
- l'information des conducteurs sur les conditions de trafic et les événements.

Pour la fonction de localisation, la téléphonie cellulaire est utilisée pour des véhicules traceurs à titre expérimental. D'autre part, dans le domaine de l'exploitation routière, les variables recueillies sont le temps de parcours moyen sur un tronçon donné, la vitesse moyenne, les matrices O/D (Origine–Destination).

IV.1.2.3. Exemples d'expérimentations

Aux États-Unis, des expérimentations de recueil de temps de parcours basé sur des téléphones mobiles ont été menées dans quelques agglomérations et notamment Boston, Houston et Washington. Deux approches sont utilisées :

- La technique du « reporting » qui permet au conducteur d'envoyer un appel à un centre de contrôle lorsqu'il passe au niveau de certains points de communication. Les enregistrements effectués entre deux sites successifs permettent de calculer un temps de trajet ou une vitesse moyenne.
- La technique de localisation qui utilise le suivi des transmissions téléphoniques mobiles afin de collecter des temps de parcours et contrôler les conditions de circulation sur les voies rapides.

En France, Le projet STRIP (System for Traffic Information and Positioning) mené dans le cadre du programme Eurorégional SERTI (South European Road Telematics Implementation) vise à évaluer la possibilité d'adapter la technologie des téléphones mobiles au concept du véhicule traceur. Ce projet repose sur une collaboration entre les services du Ministère de l'Équipement et les opérateurs de téléphonie mobile (Société Française de Radiotéléphonie - SFR). Une

expérimentation a été menée sur l'autoroute A7 exploitée par ASF (Autoroutes du Sud de La France) ainsi que sur la partie du périphérique de la ville de Lyon exploitée par les services publics. Les résultats montrent que le nombre de mobiles constaté a été supérieur à celui qui avait été attendu et que le volume des appels est un bon indicateur des conditions de trafic. En milieu interurbain, les temps de parcours estimés sont réalistes.

Dans le domaine des systèmes d'appel d'urgence, L'INRETS a réalisé, en collaboration avec le groupe SAGEM, un projet de recherche proposant de moderniser le réseau d'appel d'urgence (RAU) actuel par un réseau GSM constitué de nanorépéteurs situés dans les postes d'appel d'urgence (PAU). La communication de moyenne portée relayée par le réseau d'appel d'urgence devient de ce fait continue entre les véhicules et le gestionnaire d'infrastructure en charge de celle-ci. Le message d'alerte est transmis directement à l'exploitant chargé de la gestion de la zone où se trouve l'utilisateur. Ce système permet de s'affranchir des erreurs fréquentes de routage liées à l'utilisation d'un numéro comme le 112 qui ne permet que rarement le dialogue immédiat entre l'utilisateur et le gestionnaire de l'infrastructure. Un autre aspect de ce système consiste à diffuser, depuis les PAU situés en amont, une information d'urgence destinée aux usagers qui se dirigent vers une perturbation identifiée. Le message d'alerte est capté par tous les conducteurs équipés de portables GSM en veille et circulant sur le tronçon concerné en amont de l'incident.

IV.1.2.4. Normalisation

A l'origine, la norme GSM est européenne. Elle fait aujourd'hui référence dans plusieurs pays du reste du monde. Avec le développement croissant de nouveaux services basés sur la téléphonie cellulaire, le GSM a évolué pendant l'année 2001 vers la technologie GPRS qui est basée sur des transmissions en mode paquet. Le GPRS nécessite de nouveaux équipements du réseau et une architecture caractérisée par des cellules plus petites que celles du GSM.

Depuis cette année (2004), la troisième génération du téléphone mobile appelée UMTS commence à être déployée. Cette technologie utilise une commutation par paquets et les débits de transmission associés peuvent aller jusqu'à 2 Mbits/s en zone urbaine. La norme UMTS est perçue comme étant la convergence de l'Internet et de la téléphonie mobile. Elle ouvre l'opportunité de développer un large éventail de services tels que du guidage en temps réel en fonction des conditions de trafic et météorologiques, des transactions bancaires à distance, du divertissement en téléchargeant sur son terminal des jeux, films ou morceaux de musique.

IV.1.2.5. Avantages

La technique de téléphonie cellulaire est considérée comme éprouvée et bénéficie d'un taux de pénétration en terminaux mobiles important et d'une bonne couverture du réseau routier. Le service est interopérable à l'échelle européenne et ne nécessite aucune intervention des utilisateurs pour la fonction de localisation. De plus, c'est une technologie qui a permis le développement d'applications diverses avec des supports de communication variés : vocal, SMS, WAP et données.

IV.1.2.6. Inconvénients

Les principaux inconvénients de la téléphonie cellulaire GSM se traduisent par une vitesse de transmission des données faible (débit maximum de 9,6 Kbits/s) avec un fort risque de saturation des réseaux en cas d'accidents. La taille des messages transmis en mode SMS est limitée (160 caractères au maximum) et l'affichage sur les terminaux portables présente une mauvaise ergonomie. La localisation par ce type de média reste encore imprécise. Par ailleurs, la forte interférence entre la tâche de conduite et l'utilisation d'un téléphone mobile dégrade la sécurité des conducteurs.

Du point de vue économique, des coûts sont versés aux opérateurs de télécommunications pour la majorité des applications développées. Enfin, l'acceptabilité de ce média, pour des applications de recueil de données dynamiques, peut être discutable en raison des aspects de confidentialité.

IV.1.3. La communication par RDS

IV.1.3.1. Principes de la technologie

La norme RDS (Radio Data System) contribue à un confort d'écoute qui consiste en une commutation automatique sur l'émetteur le plus audible de la chaîne et un affichage du nom de la station. Le média RDS-TMC (Radio Data System – Traffic Message Channel) est un flux permanent d'informations numériques diffusées en parallèle avec les émissions des radios FM. Les véhicules équipés de récepteurs RDS-TMC peuvent recevoir des messages à raison de 20 par minute. Ce mode de communication est adapté pour les liaisons à moyenne distance (de 10 à 100 km).

Au début des années quatre-vingt, des travaux au sein de l'Union Européenne de Radio diffusion (UER), ont permis de mettre au point un système de radio diffusion de données en radio à modulation de fréquence appelé Radio Data System (RDS). La transmission des données revient à moduler une porteuse de la bande FM par un signal basse fréquence baptisé signal multiplex. Le débit des données RDS est d'environ 1,2 kbit/s.

L'élément le plus important de la structure RDS-TMC est appelé "groupe". Chacun contient 104 bits et comporte quatre "blocs" de 26 bits. La transmission de données est parfaitement synchrone et les groupes et blocs se succèdent sans interruption.

Dans le domaine de l'information routière, deux protocoles ont été définis : 'ALERT-C' et 'ALERT-PLUS' (Advice and problem Location for European Road Traffic). De l'émission jusqu'à la réception, ces protocoles proposent une méthode de codage de l'information permettant au récepteur de retrouver l'intégralité de l'information diffusée.

La structure des messages destinés aux conducteurs est constituée de deux parties : une base de données événementielle (situations de trafic, conditions météorologiques,..) et une base de données géographiques, appelée aussi table de 'localisants', permettant de déterminer la position de l'événement.

IV.1.3.2. Domaines d'application

Le principal domaine est l'information routière. Ces éléments sont relatifs à la nature, l'importance et la durée prévisible des perturbations : c'est de l'information de type 'événement' ; ou à l'état de circulation des différentes sections routières et aux temps de parcours de celles-ci : ce sont des données de type 'état'.

IV.1.3.3. Exemples d'expérimentations

Des expérimentations du système RDS-TMC ont été menées dans le cadre du programme européen DRIVE II et notamment les projets PLEIADES, MELYSSA et CITIES.

En France, l'opérateur de service Mediamobile a lancé en région parisienne le premier service privé basé sur la technologie RDS-TMC utilisant le protocole ALERT + . Ce service couvre aujourd'hui la totalité de la France.

Les messages TMC sont stockés dans un récepteur RDS-TMC et sont ensuite présentés au conducteur sous une forme sonore ou visuelle selon le type du terminal.

IV.1.3.4. Normalisation

Les résultats obtenus à travers le projet européen FORCE-ECORTIS, servent de base aux travaux des différents comités de normalisation. Ainsi, le CEN/TC278 au niveau européen et l'ISO/TC204 au niveau mondial ont pour mission d'élaborer l'essentiel des normes dans ce domaine. Les objectifs visés sont une indépendance des messages vis-à-vis de la langue du conducteur et un même mode de présentation sous forme de pictogrammes et de couleurs.

Les données liées à l'information routière (états de trafic, accidents, travaux, météo,..) qui sont échangées entre les centres de gestion de trafic et les centres d'information routière font l'objet d'une action de normalisation. Celle-ci consiste à établir un dictionnaire de données routières décrivant les variables de trafic (vitesses, débits,...) et les données événementielles (accidents, travaux,..) destinées aux exploitants d'infrastructures routières. Les échanges d'informations sur les conditions de circulation sont effectués en utilisant un protocole normalisé appelé DATEX (Data Exchange).

IV.1.3.5. Avantages

La diffusion d'informations par RDS-TMC est devenue un service interopérable en Europe à travers la norme ALERT-C. L'affichage des messages est indépendant de la langue du conducteur.

IV.1.3.6. Inconvénients

Le système de diffusion par RDS possède des ressources limitées en taille de messages transmis. De plus, il est nécessaire de mettre à jour une table de localisation géographique dès que l'on souhaite renseigner de nouvelles sections routières.

La ressource RDS étant déconnectée de la ressource analogique du canal radio FM, les terminaux de réception sont le plus souvent dissociés de l'autoradio traditionnel et exploitent une structure cellulaire spécifique au service RDS-TMC.

IV.1.4. La diffusion par DAB

IV.1.4.1. Principes de la technologie

Le media DAB comporte généralement trois séries de traitements :

- Une compression d'information (fondée sur la méthode MUSICAM) qui a pour rôle de numériser et de réduire le débit des signaux audio en maintenant la qualité audio du signal ;
- Une technique originale de codage du canal appelée COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex) permettant de transporter avec une robustesse satisfaisante le signal vers le récepteur ;
- Des procédés de multiplexage permettant d'insérer divers programmes.

Deux bandes de fréquence sont allouées au DAB terrestre : la bande III dans l'intervalle de fréquence 174 - 230 MHz et la bande L utilisée en France qui se situe entre 1452 MHz et 1467.5 MHz.

C'est un ensemble représentant 16 blocs de programmes. Chaque bloc peut contenir 5 programmes audio stéréophoniques ayant un débit de 256 kbits/s et un canal réservé aux données.

En plus du son à qualité numérique, on peut diffuser par le media DAB des services de données textuelles ou graphiques. Il s'agit soit de données insérées dans la composante audio elle-même et qui sont appelés PAD (Program Associated Data) soit de données diffusées par un canal indépendant de l'audio et ce sont les NPAD (No Program Associated Data).

La technologie de diffusion DAB (Digital Audio Broadcasting) possède un débit plus élevé que celui du RDS-TMC (1,2 Mbits/s contre 1,2 kbits/s pour le RDS-TMC).

IV.1.4.2. Domaines d'application

Dans le domaine de l'information routière, deux bouquets de services DAB sont proposés : un destiné aux conducteurs portant sur les aspects liés aux temps de parcours, incidents, conditions météorologiques, et aux images sur les conditions de trafic en temps réel (ex : webcams) ; un autre bouquet de services interactifs pour les passagers fournissant en plus des informations trafic, des rubriques pratiques : les tarifs de péage, les services disponibles sur les aires et des informations touristiques.

IV.1.4.3. Exemples d'expérimentations

En Suède, un service commercial a été lancé en 1995. Celui-ci couvre à ce jour 35% de la population. Au Danemark, la radio DAB était lancée en 2002. L'objectif principal est de couvrir 100% de la population à la fin de cette année (2004). En Allemagne, des réseaux pilotes ont été

déployés sur onze Länder. Néanmoins, du fait du coût élevé des récepteurs DAB et de la faible couverture en Europe, il faudrait quelques temps pour que ce média remplace le RDS-TMC. En France, les cadres législatif et réglementaire actuels ont empêché jusqu'à aujourd'hui le déploiement de ce média dans des conditions opérationnelles.

D'autre part, il existe d'autres modes de transmission numérique à grand débit sur une sous-porteuse FM tels que : HSDS (High Speed Data System) à 19 kbits/s, le DARC (Data Radio Channel) japonais et le STIC (Subcarrier Traffic Info Channel) américain. Ces différents dispositifs ont été testés dans le cadre de plusieurs expérimentations : HSDS dans le projet SWIFT à Seattle, STIC à Atlanta, DARC à San Francisco.

IV.1.4.4. Normalisation

La norme DAB a été définie dans le cadre d'un projet Européen appelé 'Eurêka' 147 et rendue officielle par l'instance ETSI en mai 1997. Ce media est aujourd'hui complètement normalisé au niveau international et notamment reconnu par l'UIT.

IV.1.4.5. Avantages

La norme de radiodiffusion DAB permet de diffuser du son et des données numériques d'une manière adaptée à une réception en mobile avec une grande robustesse. C'est une technologie qui possède des capacités d'évolution rapide dans le monde du multimédia. De plus, elle offre un débit de transmission pouvant supporter des applications nécessitant un transfert de volumes importants de données.

IV.1.4.6. Inconvénients

Le DAB a la particularité de diffuser dans un seul sens : de l'émetteur terrestre vers le véhicule. Ce facteur pénalise l'offre de services destinés aux gestionnaires d'infrastructures puisque ces derniers ne peuvent pas bénéficier d'une liaison remontante qui permettrait d'enrichir les données recueillies. De plus, le cadre juridique et réglementaire n'est pas totalement abouti afin de pouvoir bénéficier de fréquences allouées par les autorités régulatrices dans les domaines de l'audiovisuel et des télécommunications. C'est le cas qui prévaut actuellement en France.

IV.1.5. La communication par WIFI

IV.1.5.1. Principes de la technologie

La technologie WiFi (Wireless Fidelity) permet de créer des réseaux locaux de communication sans fil avec un haut débit (11 Mbits/s ou supérieur). Cette liaison peut être assurée sur un rayon de 20 à 50 mètres en milieu intérieur et sur plusieurs centaines de mètres en environnement ouvert.

Le WiFi est basé sur le standard international IEEE 802.11 qui décrit les caractéristiques d'un réseau local sans fil appelé WLAN (Wireless Local Area Network). La norme 802.11 définit les couches basses du modèle OSI pour une liaison sans fil utilisant des ondes électromagnétiques :

- La couche physique définit la modulation des ondes radio-électriques et les caractéristiques de la signalisation pour la transmission de données ;
- La couche liaison de données gère l'interface entre le bus de la machine et la couche physique. Elle utilise notamment un mode d'accès similaire à celui du standard Ethernet.

Il existe deux principaux types d'équipement pour la construction d'un réseau sans fil WiFi :

- Les *cartes d'accès* ou adaptateurs sans fil. Tout équipement intégrant ces cartes est appelé *station* (ex : ordinateur portable,..)
- Les *points d'accès* appelés aussi bornes sans fil et permettant de se raccorder à un réseau filaire.

Le standard 802.11 possède deux modes opératoires : un mode infrastructure dans lequel les clients équipés sont connectés à un point d'accès et un mode ad hoc où les utilisateurs communiquent entre eux sans aucun point d'accès.

IV.1.5.2. Domaines d'application

Les cas pratiques d'utilisation du WiFi consistent à relier des ordinateurs portables ou des assistants personnels ou tout type de périphérique à une liaison haut débit. On assiste aujourd'hui à un déploiement des réseaux WiFi dans des zones à forte concentration d'utilisateurs (ex : hôtels, aéroports, gares,..).

IV.1.5.3. Exemples d'expérimentation

Vu le développement récent de cette technologie, il n'existe pas à ce jour d'expérimentation, basée sur le WiFi, dans le domaine de l'exploitation d'infrastructures routières.

IV.1.5.4. Normalisation

La norme IEEE 802.11 est la première définie pour la technologie WiFi autorisant des débits de 1 à 2 Mbits/s. Afin d'optimiser ce débit, des révisions lui ont été apportées. La norme 802.11b est actuellement la plus répandue avec un débit théorique de 11 Mbits/s et une portée de 300 m dans un environnement dégagé. La fréquence utilisée est dans la bande des 2,4 GHz. Une compatibilité ascendante du fonctionnement des équipements en 802.11b est assurée à travers le développement de la norme 802.11g qui offre un débit théorique plus important (54 Mbits/s).

Dans le cadre de l'instance ISO, les travaux de l'initiative CALM (Continuous Air interface for Long and Medium communication) visent à développer un équipement embarqué et des stations au sol compatibles avec la norme 802.11 dans la bande de fréquence des 5 GHz.

IV.1.5.5. Avantages

La technologie WiFi permet une transmission des données à des débits élevés avec une portée de communication de plusieurs centaines de mètres. La topologie des réseaux mis en place est adaptée pour effectuer de la communication infrastructure - véhicule (*en mode infrastructure*) et aussi entre véhicules équipés de stations WiFi (*en mode ad hoc*).

IV.1.5.6. Inconvénients

Le risque majeur d'un réseau de type WiFi est lié à la sécurité. En effet, une mauvaise protection d'un réseau sans fil peut engendrer plusieurs conséquences : une interception des données consistant à écouter les transmissions des différents utilisateurs du réseau ; un détournement de connexion ; un brouillage des transmissions ou des dénis de service rendant le réseau inexploitable en envoyant des commandes factices. De surcroît ; les performances de cette technologie en vue de communiquer avec des véhicules en mouvement restent à démontrer.

IV.2. Techniques de localisation par satellites

IV.2.1. La technologie GPS

IV.2.1.1. Principes

La mise en service par le Département américain de la défense du système GPS (Global Positioning System) et l'autorisation de son utilisation pour des applications civiles ont considérablement modifié l'approche technique de la localisation des mobiles. De très nombreux systèmes de localisation reposent sur l'utilisation du GPS. En pratique, la réalisation d'un point GPS nécessite la mise en œuvre de trois sous-ensembles distincts :

- Les satellites au nombre de vingt-quatre sur des orbites quasi-circulaires et à une altitude d'environ vingt mille kilomètres ;
- Les stations de contrôle au sol, composées de stations de poursuite et d'émetteurs de télécommande ;
- Le récepteur constitué d'un module radio, d'une horloge et d'un processeur.

Un utilisateur à bord d'un mobile équipé d'un récepteur se positionne en mesurant les distances qui le séparent de plusieurs satellites à l'aide des messages qu'ils émettent.

Trois satellites suffisent théoriquement pour calculer les trois coordonnées d'un mobile. Néanmoins, vu que les distances sont calculées à partir de la mesure des temps de propagation satellites-récepteurs et que ces temps ne sont mesurés qu'à une inconnue près (le biais existant entre l'horloge du récepteur et celles des satellites), un quatrième satellite est nécessaire. Ainsi, la localisation d'un mobile est caractérisée par quatre grandeurs : la longitude, la latitude, l'altitude et l'heure. De celle-ci, on déduit la vitesse du mobile et sa direction de déplacement.

La précision de positionnement peut être améliorée par l'utilisation d'une technique différentielle appelée DGPS. Une station de référence fixe compare sa localisation propre estimée par les signaux des satellites avec sa position géographique réelle. Les erreurs de mesure sont déduites toutes

sources confondues. Ces valeurs transmises aux mobiles par liaison hertzienne leur permettent de corriger leur position horizontale afin d'obtenir une précision de quelques mètres.

Il existe une autre technique qui consiste à coupler le GPS au système de navigation à l'estime qui utilise des capteurs de distance et de direction. Cette combinaison est considérée comme la meilleure solution de positionnement pendant les périodes de non visibilité des satellites. La navigation à l'estime délivre des positions relatives alors que le système GPS donne des positions absolues.

IV.2.1.2. Domaines d'applications

Dans le domaine de l'exploitation routière, plusieurs applications sont basées sur le positionnement par satellites. Elles sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Application	Fonction
Transport routier de marchandises (flux tendu, stock roulant,...)	Gestion
Transport de marchandises coûteuses, dangereuses	Sécurité
Localisation et suivi de véhicules volés	Surveillance et sécurité
Appel d'urgence dans les autobus	Sécurité
Gestion et surveillance des véhicules loués	Gestion et surveillance
Appel d'urgence pour les automobilistes	Sécurité
Guidage des automobilistes	Information
Gestion des lignes de bus et information des usagers	Gestion et information
Gestion des flottes d'intervention	Gestion et sécurité
Gestion de flottes de taxis	Gestion et surveillance

Tableau n°IV.2 – Applications basées sur la localisation par GPS

IV.2.1.3.Exemples d'expérimentations

En France, le suivi de flottes de taxis s'est développé dans plusieurs villes : Paris, Lyon, Toulouse, Nice. Les bus de la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) sont localisés par GPS.

Des sociétés concessionnaires d'autoroutes mènent des expérimentations liées à la gestion des véhicules de viabilité hivernale (déneigement, salage,...).

IV.2.1.4. Normalisation

Outre le système GPS, les différents bouquets de satellites conçus pour des communications avec les mobiles sont :

- INMARSAT (International Maritime Satellite Organization), né en 1979, qui est constitué de satellites stationnaires et dispose de canaux pour la voix et les données. La dernière version INMARSAT-C possède des canaux numériques d'une capacité de 600 bits/s ;
- GLOBALSTAR (1998), une constellation comprenant 48 satellites en orbite à 756 miles d'altitude ;
- IRIDIUM (1998) composée de 66 satellites en orbite à 420 miles d'altitude ;
- ORBCOMM, une constellation de satellites en orbites basses constituée de 36 satellites en 1998 et qui offrira des communications à moindre coût pour l'Internet, le fax et les services de radio- messagerie.

Nous notons enfin, l'initiative 'GALLILEO' qui permettra de doter l'Europe d'une constellation autonome de satellites de localisation du domaine civil à partir de 2008.

IV.2.1.5. Avantages

- Constante diminution des coûts de liaison avec les satellites et ceux des récepteurs GPS
- Rapidité de l'information
- Précision de localisation
- Aucune sensibilité aux conditions météorologiques
- Résistance aux interférences
- Simplicité d'utilisation

IV.2.1.6. Inconvénients

- Difficultés de fonctionnement des liaisons par satellite dans les tunnels et les régions montagneuses.
- Dépendance militaire des systèmes GPS et GLONASS (Global Orbitography Navigation Satellite System)
- Taux de disponibilité des satellites
- Temps d'initialisation nécessaire pour le réglage du système.

CHAPITRE V :

EVALUATION DES SYSTEMES DE COMMUNICATION INFRASTRUCTURE / VEHICULE

V.1. Introduction

Les progrès des technologies de l'information et de la communication ont permis le développement de systèmes embarqués de communication entre le conducteur et l'infrastructure. Ce foisonnement d'applications souvent désordonné est soumis à la sanction du marché ou à des critères de faisabilité technique. La question de l'évaluation des potentialités et des enjeux de ces systèmes ainsi que l'identification de leurs limites, est peu abordée. Par conséquent, des interrogations demeurent quant à leurs impacts sur la sécurité, sur les conditions de circulation, sur l'environnement et quant à leur perception par les usagers.

Les évaluations s'effectuent généralement selon deux modes : la simulation ou l'étude sur site réel. L'approche par simulation permet d'obtenir des résultats par prédiction. C'est une manière d'estimer les impacts du déploiement d'un système quand il n'est pas disponible en vraie grandeur ou quand son implantation est trop récente. En revanche, les résultats d'une évaluation en vraie grandeur sont issus de mesures directes et quantifiées sur site. La majorité des évaluations effectuées sont de type 'ex-ante' (a priori).

D'autre part, la valorisation monétaire des effets cités ci-dessus est rendue complexe par la difficulté de définir des valeurs de conversion pour les services rendus aux conducteurs tels que l'information routière, le confort procuré par les aides à la conduite et la navigation.

La répartition des coûts des systèmes peut être tributaire de facteurs tels que la quantité de données à échanger entre l'infrastructure et le véhicule, l'intelligence dont sera pourvu l'équipement au sol et la nature du terminal embarqué.

Dans le cadre du présent chapitre, nous dressons un état de l'art en termes d'évaluation des systèmes de communication entre l'infrastructure et le véhicule. La première section présente, sans viser l'exhaustivité, les principaux exemples nationaux et précise les méthodes d'évaluation utilisées. Le recensement des exemples est effectué d'une manière chronologique et par zone géographique : Europe, Etats-Unis et Japon.

V.2. Des expérimentations à travers le monde

Plusieurs études relatives à l'évaluation des gains potentiels des systèmes de communication entre la route et le conducteur sont exposées ci après.

Les premiers tests de systèmes embarqués de guidage remontent aux années 80 et notamment en Europe avec les systèmes LISB, Autoguide et au Japon avec les projets CACS et AMTICS.

V.2.1. Royaume Uni :

V.2.1.1. AUTOGUIDE

V.2.1.1.1. Mise en œuvre

Le système AUTOGUIDE est l'un des premiers systèmes de guidage et de communication par infrarouge, développés autour de la ville de Londres. Il est composé d'un réseau de balises ou panneaux électroniques pouvant être installés au niveau des principaux carrefours. Ces balises sont connectées par le réseau téléphonique à un centre de régulation où un serveur supervise les conditions de circulation.

V.2.1.1.2. Les bénéfices

Une étude réalisée par le TRL (Transport Research Laboratory), visant à évaluer le système AUTOGUIDE, montrait l'intérêt du guidage dynamique : les gains de temps représentent 10% en moyenne en urbain dans la ville de Londres pour chaque véhicule équipé du dispositif embarqué. Une économie d'environ 915 € est réalisée sur un poids lourd parcourant annuellement une distance de 16 000 Km.

Selon les hypothèses émises qui sont un amortissement en une année des coûts des terminaux embarqués et l'équipement d'un tiers du parc, le TRL a estimé les gains entre 0,15 à 0,23 milliards € par an.

V.2.1.2. RTA

V.2.1.2.1. Mise en œuvre

Le système RTA est un dispositif embarqué d'information routière qui utilise la technologie de communication à courte portée hyperfréquence à 5.8 GHz (DSRC). Il est déployé sur 350 km d'autoroutes de Swansea à Heathrow et une partie de l'autoroute M25 autour de la ville de Londres. Ce site diversifié comprend en même temps des autoroutes urbaines, interurbaines et des sections dont la limite de vitesses est affichée sur des Panneaux à Vitesses Variables.

Les objectifs principaux du projet sont de vérifier le concept d'un système ayant une architecture ouverte qui peut supporter quatre applications : recueil de données par des véhicules traceurs, aide au déplacement pour les conducteurs, consignes de vitesses et des informations liées au transport public dans des bus équipés.

Dans le système RTA, l'équipement embarqué a été conçu pour recevoir des données à travers différents média : le badge pour le DSRC, le GPS, le GSM et le RDS-TMC. Un gestionnaire de dialogue installé dans le véhicule a pour rôle de coordonner la fusion des données provenant des différentes sources citées ci-dessus. La présentation des messages pour le conducteur est sous forme visuelle et sonore.

L'évaluation du système RTA s'est limitée uniquement à l'acceptabilité par les conducteurs sur un échantillon restreint (10 conducteurs). Les essais en vraie grandeur ont abouti à des résultats satisfaisants en termes de facilité d'utilisation du système et de perception des messages affichés.

V.2.1.2.2. Les bénéfices

Les bénéfices et les coûts de l'expérimentation RTA ne sont pas décrits dans la littérature disponible sur le sujet.

V.2.1.3. Une démarche plus globale (TRL)

Le TRL a été chargé par le Ministère britannique des Transports (DETR) de mener une étude visant à apprécier les impacts socio-économiques des systèmes intelligents appliqués aux transports (TRL, 1996). Sur un échantillon de 36 applications, quatre concernaient des systèmes embarqués d'information et de guidage des conducteurs. L'évaluation financière de ces systèmes mettait l'accent sur les difficultés qu'auront les constructeurs à fabriquer les terminaux au prix équivalent au consentement à payer des utilisateurs.

Cette analyse coût – bénéfices a permis de tirer essentiellement des enseignements sur l'estimation de la taille des marchés, les perspectives pour les industriels concernés et la complexité de la structure des acteurs impliqués.

Cette étude conclut que la taille du marché des systèmes embarqués peut considérablement augmenter à condition que les protocoles de communication soient disponibles et que les terminaux soient installés en première monte dans les véhicules.

V.2.2. France

V.2.2.1. CARMINAT

V.2.2.1. Mise en œuvre

Dans le cadre d'un partenariat public - privé, le système CARMINAT d'information de trafic et de guidage dynamique a été évalué.

Le plan d'évaluation s'articulait autour de six objectifs principaux : validation de la chaîne, technique, qualité de l'information, qualité de l'interface homme – machine, impacts sur la sécurité, effets sur les déplacements, adéquation aux attentes des utilisateurs.

La phase de validation technique consiste à effectuer des tests au niveau des différents maillons de la chaîne d'information depuis le recueil des informations par les CRICR jusqu'à l'affichage des informations sur les terminaux embarqués. Les moyens de tests et de validation sont les mains courantes des CRICR, les boîtes noires des terminaux et les bornes de réception. La qualité de l'information est testée à travers des mesures des temps de parcours et aussi du recueil des enquêtes qualitatives et quantitatives.

Les moyens utilisés sont : les Panneaux à messages variables, les mains courantes, les boîtes noires, les carnets de bord, les questionnaires et les terminaux CARMINAT.

Concernant l'IHM (Interface Homme Machine), l'objectif était de mesurer les impacts du système CARMINAT sur la tâche de conduite en fonction de l'ergonomie de l'interface. Des tests à l'arrêt et en situation de conduite ont été effectués.

D'autre part, deux types de tests ont permis d'évaluer les impacts du système CARMINAT sur les déplacements : les tests 'origines- destinations focalisées' servant à mesurer l'impact des informations reçues sur la capacité des conducteurs équipés à changer d'itinéraire ; les tests 'origines- destinations imposées' permettant d'évaluer les effets possibles du système CARMINAT sur les temps de parcours et les modifications d'itinéraires.

V.2.2.2. Résultats

Les résultats sont présentés selon les 6 objectifs d'évaluation mentionnés ci-dessus.

Pour la chaîne technique d'information, les résultats ont montré qu'elle est globalement satisfaisante ; que le délai de réception entre la tête de réseau et la réception dans le véhicule est compris entre 2 et 8 minutes. En milieu interurbain, les temps de diffusion étaient de l'ordre de 2 à 3 minutes.

Sur la qualité de l'information, la majorité des expérimentateurs (80 à 85 %) ont jugé que les informations recueillies et les conditions de circulation observées sur place, sont cohérentes. Les écarts entre les temps de parcours réels et ceux affichés sur les terminaux CARMINAT sont répertoriés dans le tableau suivant (sur un échantillon de 198 observations) :

Site	Durée moyenne des trajets	Ecart		
		0 à 2 mn	3 à 5 mn	plus de 6 mn
Boulevard périphérique	9 mn	77 %	18 %	5 %
Paris intra-muros	12 mn	54 %	33 %	12 %
VRU du SIER et N7	7 mn	79 %	15 %	6 %

Tableau n° V.1 - Ecart des temps de parcours (source : Rapport DSCR / GIE CARMINAT, 1996)

Sur *L'interface Homme – Machine*, les résultats des questionnaires montrent que dans l'ensemble, les terminaux sont bien perçus par les utilisateurs et les consultations des terminaux ne semblaient pas nécessiter des détournements de regard longs (supérieurs à 2 secondes).

Afin d'appréhender les effets sur la sécurité, 1.400.000 Km ont été parcourus au cours de l'expérimentation. Ce chiffre s'est avéré insuffisant du point de vue statistique pour effectuer une évaluation basée sur le critère 'accident'. Aucune quantification n'a été possible. Au niveau qualitatif, les conducteurs semblaient mettre en place des stratégies d'utilisation leur évitant une surcharge d'attention.

Quant aux Impacts sur les déplacements, 3 à 8 % des utilisateurs déclarent avoir changé d'itinéraire, en milieu interurbain, suite aux informations CARMINAT.

Le système CARMINAT a été jugé globalement satisfaisant par 72 % des utilisateurs. Une des plus fortes attentes de la part des conducteurs est le gain de temps. Sur ce point, le niveau de satisfaction des utilisateurs est jugé insuffisant.

En conclusion, l'évaluation effectuée dans le cadre du projet CARMINAT a montré l'intérêt d'un partenariat public - privé. Néanmoins, elle n'a pas permis de mesurer les impacts socio-économiques de ce système. Les études réalisées montrent qu'il y a un marché réel mais restreint du fait de la dépendance du dispositif vis-à-vis de la couverture géographique et de la précision des informations. C'est suite à cette évaluation que la société Mediamobile a été créée pour lancer le service 'Visionaute' en région parisienne.

V.2.3. Allemagne

V.2.3.1. LISB

V.2.3.1.1. Mise en œuvre

L'évaluation du système LISB (système d'information et de guidage dans la ville de Berlin) visait à étudier la faisabilité du système, appréhender les effets induits et estimer le ratio coûts - performances.

Les travaux de l'Institut de psychologie du travail et de recherche systémique interdisciplinaire se sont focalisés sur le comportement des conducteurs face au système LISB et sur les erreurs de conduite et les situations critiques survenues au cours de l'expérimentation.

V.2.3.1.2. Résultats

L'utilisation du système LISB a conduit globalement à une réduction des changements de direction ou de voie. Cependant, cette approche expérimentale n'a pas permis de mesurer quantitativement l'impact de ces modifications comportementales sur la sécurité routière.

Sur l'interface homme - machine, la présentation graphique sous forme de pictogrammes associée à une assistance vocale, est perçue comme un soutien.

Dans ce projet, le guidage dynamique de 400 véhicules s'est avéré sans influence sur les conditions de trafic dans la ville de Berlin. On a estimé que le taux de véhicules équipés devra être supérieur ou égal à 20 % afin d'obtenir potentiellement une répartition plus équilibrée de la charge sur les axes principaux de la ville.

Du point de vue de l'acceptation par les utilisateurs, les résultats d'enquêtes ont montré que 90 % des conducteurs d'une flotte de 400 véhicules équipés sont favorables à une poursuite de l'exploitation du système LISB. D'autre part, 25 % des utilisateurs étaient prêts à l'achat du terminal embarqué pour un montant de 410 €.

V.2.3.1.3. Coûts et Bénéfices

L'approche repose sur deux volets : une analyse coûts - efficacité et une étude de rentabilité. L'analyse coûts - efficacité comporte trois étapes : un calcul des coûts, une estimation de l'efficacité et une comparaison des coûts et des valeurs d'efficacité.

Le tableau ci-dessous résume les coûts totaux rapportés à un exercice d'exploitation.

Taux d'intérêt des calculs (8 %)					
Poste de frais	Nombre	Coût par unité (K€)	Coût global (K€)	Durée d'utilisation	Coût global pro anno (K€)
Coûts d'investissement					
Investissements côté infrastructure	250	18	4500	10	685
Investissements pour le poste central de guidage	1	1533	1533	4	463
Investissements en équipements embarqués	700	1	700	10	106
Total			6733		1254
Coûts d'exploitation					
Total			1355		1355
Coût global annuel du projet LISB					2609

Tableau n° V.2 - Coûts du système LISB

(Source : Rapport 'Système LISB d'information et de guidage de Berlin', 1991)

Le calcul de l'efficacité est effectué en définissant des critères hiérarchisés. Une valeur cible est affectée au poids de chaque indicateur à l'aide de fonctions d'évaluation. A titre d'exemple, la valeur '0' caractérise un niveau tout juste acceptable, tandis que '10' équivaut à « très bien ». Tous les critères ne revêtant pas la même importance, chacun d'eux doit être pondéré. Leur importance peut être estimée grâce à des enquêtes auprès des utilisateurs. En effet, la multiplication de cette note par le coefficient de pondération correspondant donne l'efficacité partielle.

L'efficacité globale du système est obtenue en effectuant la somme des valeurs d'efficacité partielle.

Globalement, les résultats obtenus sur les deux scénarii avec et sans le système LISB, montrent l'importance liée aux fonctions destinées aux conducteurs non habitués des lieux. Les critères fortement pondérés par cette catégorie de participants sont les gains de temps et la qualité des recommandations d'itinéraires.

L'analyse coût – efficacité laisse augurer une appréciation positive du système LISB en regard des coûts annuels relativement faibles de 2,6 millions d'€ répartis équitablement entre les coûts d'exploitation courants et ceux d'investissement.

En revanche, l'étude de rentabilité de LISB s'est révélée insatisfaisante en raison d'une quantité insuffisante de données.

V.2.4. Etats-Unis

V.2.4.1. Le système TransGuide

V.2.4.1.1. Mise en œuvre

Ce système développé dans le cadre du programme américain 'Model Deployment Initiative', est basé sur l'identification automatique de véhicules (AVI). Le test consistait à installer 53 lecteurs de badges tout au long de la chaussée (157 km au total) et à équiper 78 000 véhicules capteurs dans la région de San Antonio.

Les objectifs du système TransGuide sont d'améliorer le temps de réponse des véhicules d'intervention en cas d'accidents pour une meilleure sécurité et de mieux informer les conducteurs. La technologie de lecture des badges par fréquence radio est utilisée pour estimer des temps de parcours en temps réel. Le système a été implanté sur un réseau de routes secondaires et d'artères.

Une évaluation socio-économique de type avant – après du système TRANSGUIDE a été menée par le TTI (Texas Transportation Institute) . Les données provenant des sections équipées du système Transguide ont été comparées à celles relatives à d'autres sections ayant les mêmes caractéristiques géométriques et des conditions de trafic similaires (Henk & al, 1996).

V.2.4.1.2. Coûts et bénéfices

Les résultats de l'expérimentation Transguide sont quantifiés dans le tableau ci-dessous.

Configuration	Taux d'accidents		Taux de variation
	Avant	Après	
<u>Sections équipées du système Transguide</u>			
Taux d'accidents global (par 10 ⁶ véh –km parcourus)	2.04	1.74	-15%
<u>Autres sections</u>			
Taux d'accidents global (par 10 ⁶ véh –km parcourus)	2.33	2.43	+4.3%

Tableau n° V.3 – Résultats d'une évaluation 'avant – après' (Source : 'Texas Transportation Institute')

Cette étude montre que le taux d'accidents sur les sections équipées de Transguide diminuait alors que sur les autres sections, ce paramètre ne cessait d'augmenter. Ainsi, les bénéfices annuels, engendrés par l'implantation du système Transguide, liés à la sécurité, sont estimés à 3.2 millions d'€. Ce chiffre est basé sur des coûts unitaires d'accidents corporels et matériels respectivement de 24 500 € et 2 000 €.

D'autre part, les temps d'intervention en cas d'accidents, ont été calculés avant et après l'implantation du système Transguide. Ils sont répertoriés dans le tableau suivant :

Type d'accidents	temps de réponse global (mn)		Taux de variation
	Avant	Après	
Mineur	26	20	-19%
Grave	24	19	-21%

Tableau n° V.4 – Temps de réponse en cas d'accidents (source : TTI)

En utilisant un modèle de simulation de voies rapides urbaines compatible avec une évaluation avant / après, les gains dus à l'amélioration de la durée d'intervention en cas d'accidents sont estimés à 1.5 millions d'€ par an.

V.2.5. Japon

V.2.5.1. Le système VICS

V.2.5.1.1. Mise en œuvre

Au Japon, le service VICS (Vehicle Information Communication System) existe depuis 1996. Ce service couvre les zones de Tokyo, d'Osaka et toutes les autoroutes japonaises.

Le système VICS assure les fonctions de recueil des données par des organismes tels que la police, l'administration des routes et des autoroutes ; de traitement et de diffusion des informations. Il est basé sur trois technologies complémentaires selon la densité de voies et la zone géographique : des balises hyperfréquence de communication à courte portée à 2.5 GHz sur les autoroutes, des balises à infrarouge sur les principales artères urbaines et périurbaines, des émetteurs FM sur les grandes régions.

La réception et la présentation de l'information sont assurées par un terminal embarqué dans le véhicule. Les types d'information fournis sont : l'état du trafic, les temps de parcours par sections ; les événements et les indications sur les parcs de stationnement.

L'évaluation du système VICS a porté sur les aspects suivants :

- les performances du système en termes de temps de réaction, de capacité des canaux de transmission et de cohérence des messages ;
- le contenu, la compréhension des messages, la qualité de l'information et la facilité d'utilisation des équipements embarqués ;
- le point de vue de l'utilisateur en matière d'acceptation et d'utilité ;
- le point de vue de la collectivité en regard des impacts sur les conditions de circulation et du volet socio-économique.

Une évaluation élaborée sous forme de questionnaires pour 120 conducteurs équipés, visait d'une part à confronter les performances du service par rapport aux attentes des utilisateurs et d'autre part, à tester les informations de confort.

V.2.5.1.2. Résultats

Les résultats de cette évaluation ont montré que les services offerts diminuaient d'une manière qualitative le stress vu qu'ils permettent le choix d'itinéraires et d'heures de départ. La préférence est donnée à l'affichage des cartes sur écran illustrant les zones de congestion. En revanche, les aspects à améliorer sont la lisibilité, la compréhension par les conducteurs des messages affichés, la précision de l'information fournie et la couverture géographique du système.

Le coût d'exploitation du service est de 1 milliard de yens par an. Ce budget est assuré par les contributions d'industriels intéressés par la fourniture d'équipements et de services moyennant la mise à disposition des informations suivantes : une base de données des sections couvertes par VICS ; des modalités de contrôle des balises infrarouges, le format et la structure des données transmises par les balises micro-ondes ; la carte des implantations de balises, le contenu et le volume des informations.

D'autre part, une évaluation des effets du système VICS sur le trafic a été effectuée à travers des tests en simulation en calculant les temps de parcours sur 3 couples d'origine / destination d'un réseau selon trois scénarii : des véhicules équipés de VICS et d'un système de guidage dynamique ; des véhicules avec VICS en état de fonctionnement et des véhicules non équipés.

Ce modèle a été validé sur site réel. Les résultats montrent que le scénario 1 (véhicules équipés simultanément de VICS et d'un système de guidage) donne les meilleures performances (gain de 15 % sur les temps de parcours par rapport à une situation avant l'installation du système VICS) [Morita & al, 1996].

En février 2002, près de 4,1 millions de systèmes embarqués VICS ont été vendus au Japon. Il demeure toujours le plus important projet ITS au monde.

CONCLUSION

Dans cette deuxième partie, les différentes technologies et évaluations de systèmes de communication entre l'infrastructure et les véhicules ont été présentées. Ces expérimentations n'ont pas toutes abouti à une mise en œuvre à grande échelle. Des interrogations portant sur la pénétration du marché, l'exploitation des systèmes et l'acceptation par les conducteurs restent sans réponse.

Les évaluations cependant concernent avant tout les aspects fonctionnels et techniques de ces systèmes. Les approches coûts / avantages théoriques les évaluent en règle générale d'une manière positive. Elles indiquent que les bénéfices potentiels peuvent être supérieurs aux coûts. Les exemples étudiés aux Etats-Unis aboutissent à la conclusion que les systèmes de communication unidirectionnelle sont rentables du point de vue économique tandis que les expérimentations allemande, anglaise et japonaise démontrent des bénéfices notables pour les systèmes de communication bidirectionnelle.

PARTIE III :

LE SYSTEME AIDA

INTRODUCTION

Le maillon clé d'un processus d'évaluation est de définir des scénarii adéquats. Ceci implique la prise en compte de plusieurs hypothèses liées aux caractéristiques techniques du système, le degré d'implantation, la nature et l'importance des impacts.

Dans notre cas, nous supposons que le fonctionnement du système AIDA est satisfaisant. Le rapport émis par le consortium chargé du projet AIDA montre que les résultats de l'évaluation technique sont concluants (Paulin & al, 2001). Nous nous focaliserons essentiellement sur la mesure des bénéfices potentiellement induits par le déploiement du système AIDA et non pas sur la technologie elle-même qui est dans ce cas, la technologie DSRC à 5.8 Ghz. Néanmoins, les fonctionnalités et les services basés sur cette technologie devront être connues afin de pouvoir estimer les coûts et les bénéfices liés à l'ensemble du dispositif.

Dans cette partie, une description du système AIDA et de ses services est donnée. Ensuite, deux fonctions d'exploitation sont particulièrement examinées : le recueil de données dynamiques et la détection et alerte rapide. Afin de tester la capacité du système AIDA à remplir ces deux missions, deux méthodes sont utilisées : l'une par simulation et l'autre par une analyse statistique de données réelles.

La viabilité commerciale du système AIDA est explorée à travers le dernier chapitre de cette partie consacré à l'étude de son acceptabilité par les utilisateurs et à des éléments de valorisation socio économique de ses impacts potentiels.

CHAPITRE VI :
DESCRIPTION DU SYSTEME AIDA

VI.1. Historique

Le concept des systèmes embarqués de communication entre le véhicule et l'infrastructure fait l'objet d'investigations et d'expérimentations à travers le monde. Le système AIDA est un de ces programmes de recherche. Il vise à développer un dispositif de communication bidirectionnelle à courte portée basée sur le lien DSRC. Le système AIDA s'inscrit dans la continuité du projet ADAMS (Automatic Debiting Application for Motorway Services) qui avait pour but de concevoir un système d'information embarqué basé sur la technologie du télépéage. Les travaux menés par COFIROUTE et RENAULT participants au projet ADAMS ont permis de vérifier la faisabilité technique d'un tel concept. En 1996, le constructeur automobile PSA-PEUGEOT-CITROËN et CSSI (Compagnie des Signaux et Systèmes d'Information) ont rejoint le groupement ADAMS afin de développer un terminal à faible coût et de réaliser une expérimentation à grande échelle : c'est la naissance du projet AIDA.

VI.2. Description du système AIDA

VI.2.1. Architecture du système

L'architecture du système AIDA se décompose en trois parties principales : le serveur d'informations SIRA (Serveur d'Informations Routières Aida), la partie infrastructure et l'équipement embarqué dans le véhicule (cf. Fig n° VI.1).

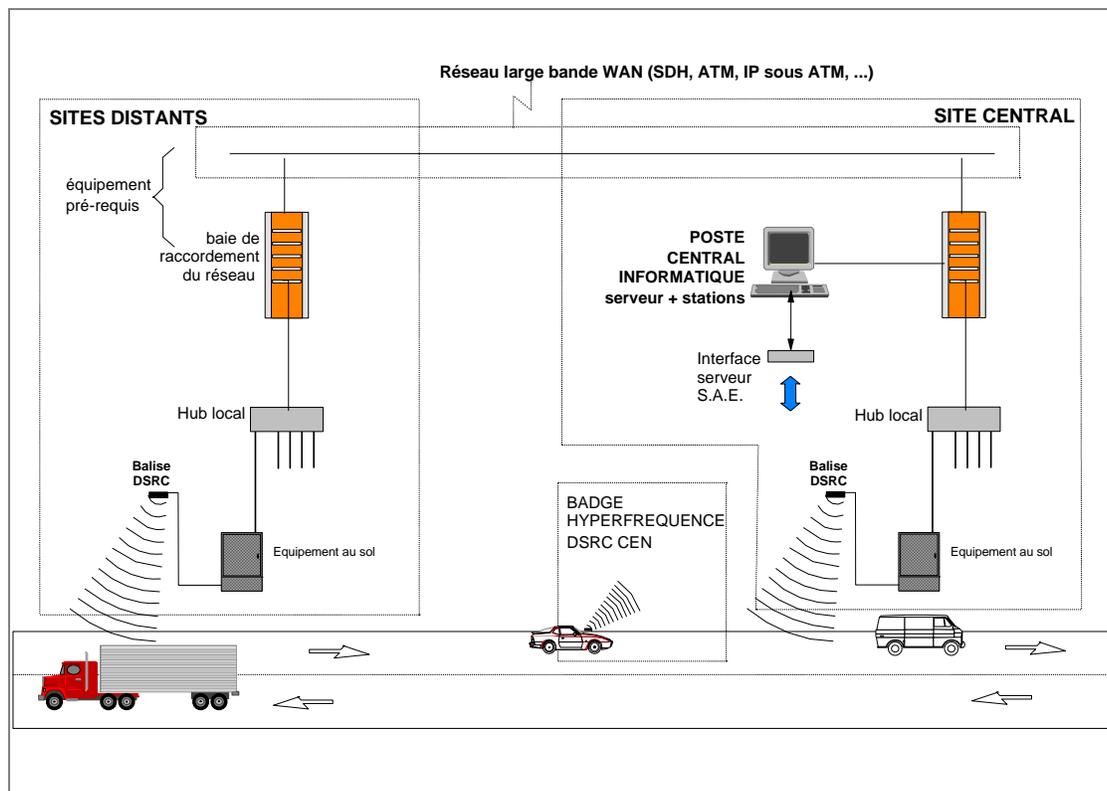


Figure n° VI.1 - Architecture physique du système AIDA

VI.2.1.1. Le serveur SIRA

Le SIRA ou serveur d'informations routières AIDA centralise les informations provenant des applications hébergées au PCI (Poste Central d'Information) de COFIROUTE.

Il recueille les données émises par les véhicules AIDA en interrogeant les balises par scrutation régulière avec une périodicité de trois minutes.

Le SIRA diffuse aux balises des informations destinées aux conducteurs, recueille en provenance des balises des données qu'il traite et rediffuse aux balises concernées. Il met à jour un registre d'informations à transmettre en fonction des priorités des services.

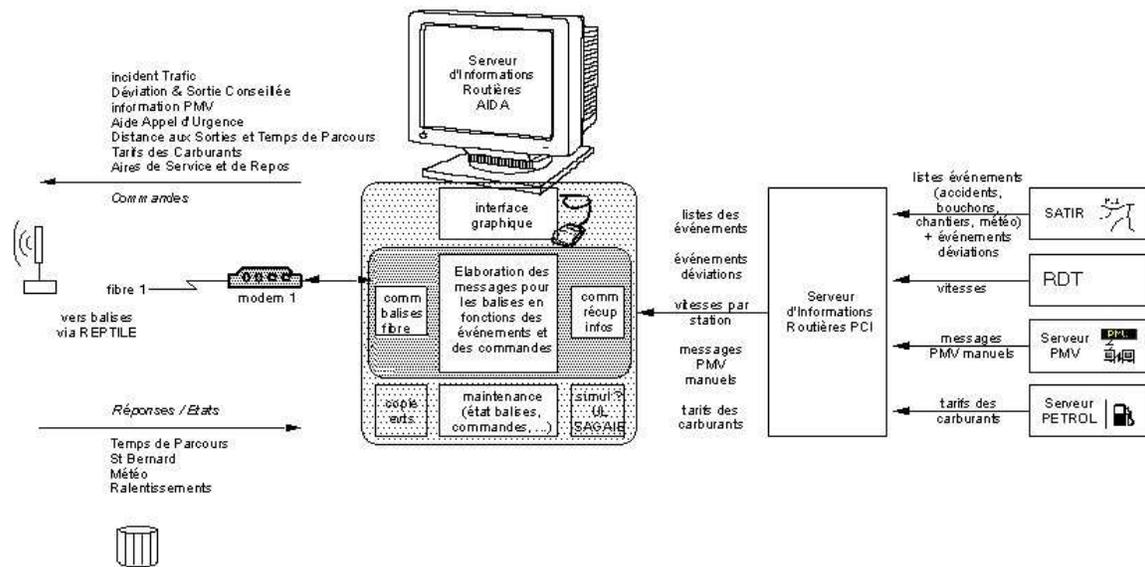


Figure n° VI.2 - Architecture du serveur AIDA

L'application actuelle du serveur SIRA comporte les éléments suivants : un synoptique général incluant les différents sites de communication et les symboles d'état des balises (interrogation, maintenance, arrêt) ; les commandes à envoyer aux balises telles que l'arrêt, la mise en marche, le téléchargement des scénarii et la récupération des données ; un module permettant de générer automatiquement les scénarii à partir de fichiers contenant les données applicatives utilisées par les différents services et enfin un affichage sur écran des remontées d'information lors du franchissement des balises.

VI.2.1.2. Equipements au sol

La partie infrastructure est composée de trois éléments : des balises installées sur les ponts au-dessus de chaque voie de circulation ; une armoire technique disposée en bordure de voie qui comprend un modem permettant à chaque balise de dialoguer avec le serveur et des protections électriques pour les matériels ; une liaison de communication entre l'armoire technique et le serveur qui peut faire partie d'un réseau de cuivre ou de fibre optique.

Les balises AIDA fonctionnent actuellement en configuration monovoie (une balise couvre une seule voie de circulation).

La transmission des données entre le serveur AIDA et les balises s'effectue via le réseau de communication interne de Cofiroute.

La communication entre le PCI et une balise AIDA repose sur trois couches représentées ci-dessous:

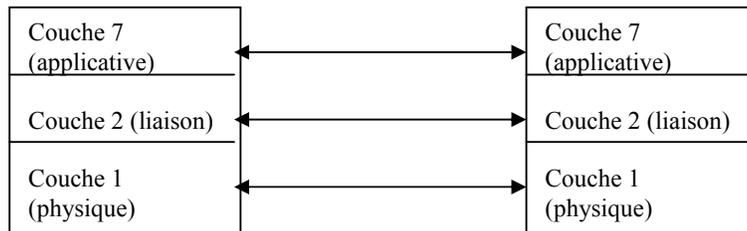


Figure n° VI.3 – Couches de communication entre le PCI et les balises AIDA

La couche 1 (ou couche physique) qui est le moyen physique d'échanger les messages entre les équipements. Elle est composée d'un modem connecté au réseau ;

La couche 2 contrôle, grâce à un protocole, le bon acheminement des messages entre les équipements ;

La couche 7 ou applicative offre des fonctions permettant au PCI d'envoyer des données à l'équipement embarqué dans le véhicule, de recevoir des données provenant de celui-ci et de surveiller le bon fonctionnement des balises.

Le dialogue entre le serveur et les balises est du type commande / réponse : le PCI est « maître » et les balises « esclave ».

La balise n'effectue aucun traitement sur les données applicatives échangées entre le serveur AIDA et l'équipement embarqué. Le seul élément qui déroge à cette règle est la possibilité pour la balise de mettre à jour automatiquement les données de l'attribut D_PASS contenant les informations relatives au recueil des temps de parcours (*cf. chapitre VII 'contribution au recueil des données dynamiques'*).

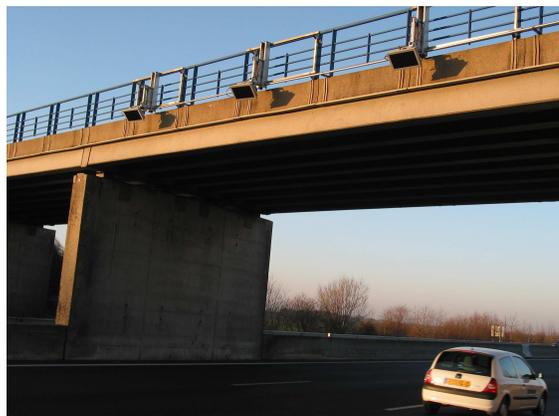


Photo n°VI.1 – Balise AIDA installée sur une section à trois voies de l'autoroute A10
VI.2.1.3. Equipements embarqués

L'équipement embarqué est constitué d'un badge situé derrière le pare-brise du véhicule dans l'axe de la balise, d'un terminal avec un écran installé au niveau du tableau de bord et des interfaces avec les essuie-glaces, les feux de brouillard et l'odomètre.

Le badge utilise la fréquence 5.8 GHz allouée en Europe pour les applications de télématique routière. Il peut recevoir les deux fréquences descendantes (5,7975 et 5,8025 GHz) afin de pouvoir mettre deux balises côte à côte sans générer d'interférence et de couvrir plusieurs voies de circulation. La configuration du badge est conçue de manière à ce que l'équipement au sol puisse distinguer un badge AIDA d'un badge TIS et puisse traiter l'attribut D-PASS issu du recueil de données dynamique qu'on détaillera dans la section suivante intitulée « Les services ».



Photo n°VI.2 – Badge TIS

Le terminal AIDA se compose de deux parties : un boîtier contenant les éléments matériels. (Celui-ci a la particularité d'être amovible et comporte deux zones principales : un écran à cristaux liquides de 128 x 64 pixels et un pavé de 6 touches dont 4 touches directionnelles pour les déplacements dans les menus, 1 bouton de validation, 1 bouton à double usage : Marche / Arrêt et fonction « saint-Bernard »); le logiciel comprenant tous les services AIDA.

Le terminal n'est opérationnel qu'au passage sous la première balise rencontrée. A partir de ce moment, il prend en compte les événements générés par le véhicule ou par le conducteur. Le terminal dispose des informations diffusées par le PCI qu'il fournira au conducteur, spontanément ou à sa demande, selon le type et la priorité des situations rencontrées.



Photo n°VI.3 – Terminal AIDA

VI.2.2. Les services

Le système embarqué AIDA permet de fournir aux conducteurs des informations liées à l'état de trafic et aux événements qu'ils peuvent rencontrer. D'autre part, pour les exploitants, l'intérêt du lien bidirectionnel DSRC est de pouvoir utiliser les véhicules équipés du dispositif embarqué (badge + terminal + capteurs météo et brouillard) comme véhicules capteurs – émetteurs permettant de collecter et d'envoyer des informations au gestionnaire d'infrastructures.

VI.2.2.1. Les services pour les conducteurs

Les informations destinées aux conducteurs sont envoyées, dans le sens descendant de la communication, d'un Poste Central d'Information (PCI) aux véhicules. Elles sont dédiées soit à la sécurité, soit au confort.

VI.2.2.1.1. Services sécurité

Les services dédiés à la sécurité se caractérisent par un affichage spontané et un signal sonore pour avertir le conducteur d'un évènement proche. Les différentes situations sont détaillées ci-dessous.

Incident trafic

Plusieurs types d'événements peuvent être transmis : travaux, bouchon, accident, objet sur la chaussée, véhicule arrêté, forte pluie, brouillard (cf. tableau n° VI.1)

Ce type d'information est donné lors du passage sous la dernière balise en amont de l'incident puis 1000 mètres avant la dernière sortie précédant la section d'autoroute affectée.

Typologie des Incidents Trafic	Affichage d'un pictogramme
Travaux	
Bouchon	
Accident ou incident avec ou sans bouchon	 
Objet sur la chaussée	
Forte pluie, Brouillard	 

Tableau n° VI.1 - Typologie des incidents trafic dans le système AIDA

Déviation

Ce service complète, le cas échéant, une information "incident trafic" diffusée préalablement. A l'aide de ce service, le système AIDA ouvre la possibilité de répartir les véhicules déviés sur des itinéraires différents.

PMV (Panneaux à Messages Variables)

Ce service est identique au service "Incident trafic" dans le sens où les informations proviennent ici également du serveur PMV. Cela signifie que le même message sera à la fois affiché à bord des véhicules équipés et sur le PMV pour les automobilistes non équipés d'un terminal AIDA.

Signalisation de sortie

Ce service correspond à l'affichage à bord d'un message indiquant au conducteur qu'il approche de sa gare de sortie et qu'il doit donc sortir de l'autoroute. Ce type de message appartient à la catégorie des services de sécurité car il permet d'éviter certaines manoeuvres dangereuses et de diminuer l'anxiété du conducteur occasionnel.

Aide à l'appel d'urgence

Ce service ne correspond plus à un affichage spontané, mais à une information accessible sur demande du conducteur. Les indications affichées sur l'écran sont d'une part : la position du véhicule sur l'autoroute (autoroute, PK, sens), la distance et la direction vers le Poste d'Appel d'Urgence le plus proche et d'autre part, le numéro de téléphone des secours en charge de la section d'autoroute concernée qui servira aux détenteurs de téléphones cellulaires.

VI.2.2.1.2. Services de confort

Les services de confort sont consultables à tout moment par le conducteur. Ils sont décrits dans ce qui suit.

Distances aux sorties et temps de parcours

On transmet du Poste Central d'Information (PCI) vers les véhicules, des informations sur les différentes distances et éventuellement des temps de parcours estimés jusqu'aux sorties concernées par le sens de circulation (*pour les 5 prochaines sorties*).

Tarifs carburants

Ce service consiste à transmettre vers les véhicules les prix des carburants pratiqués dans les trois prochaines stations-service dans le sens de la circulation.

Aires de services repos

On propose la liste des dix prochaines aires de repos et de services disponibles. Le conducteur peut choisir son aire de repos et le terminal AIDA l'avertira automatiquement 2000 mètres avant la bretelle d'accès.

VI.2.2.2. Services pour les exploitants

Ces services concernent les informations émises des véhicules équipés à destination d'un Poste Central d'Information (PCI). Les données enregistrées par les véhicules depuis le dernier passage sous une balise sont transmises au PCI pour traitement et diffusion de messages d'alerte pour les conducteurs qui suivent le véhicule capteur. Dans le cas d'événements météorologiques, l'information est diffusée dans les deux sens.

Recueil de temps de parcours

Chaque balise reçoit les temps de parcours correspondant à la dernière section d'autoroute parcourue par chacun des véhicules AIDA (calculés en secondes par chaque terminal). Tous ces enregistrements sont transmis périodiquement au serveur central SIRA. Les informations recueillies sont structurées selon un format normalisé à l'échelle nationale et qui est appelé 'D-PASS'.

Le service "St Bernard"

Ce service permet au conducteur de signaler un incident au PCI. Quatre types de situations sont pris en compte : accident, véhicule arrêté, objet sur la chaussée et mauvaises conditions météorologiques.

L'information est alors diffusée aux véhicules AIDA en amont de l'incident par l'intermédiaire du service « **incident traffic** » décrit précédemment.

D'autres services potentiels, destinés aux exploitants, ont été expérimentés. Il s'agit de :

- collecte d'informations météorologiques (brouillard et forte pluie) à travers l'allumage des feux de brouillard et la mise en marche des essuie-glaces afin de signaler la présence d'une forte pluie ;
- recueil des ralentissements par le terminal AIDA qui peut détecter des chutes brusques de vitesse par rapport à la vitesse moyenne de la section circulée. Ce différentiel de vitesse est enregistré et transmis à la balise suivante.

CHAPITRE VII :
CONTRIBUTION AU RECUEIL DES DONNEES
DYNAMIQUES

VII.1. Introduction

Actuellement, les méthodes en vigueur pour le recueil des données de trafic ou de météo se basent essentiellement sur l'utilisation des capteurs fixes. Les nouveaux systèmes de communication entre l'infrastructure et les véhicules peuvent représenter une opportunité d'utiliser des véhicules équipés de dispositifs embarqués, comme source d'information à des fins d'exploitation d'infrastructures routières. Ces véhicules traceurs peuvent-ils remplacer à terme des capteurs fixes ou seront-ils complémentaires à des installations existantes de recueil de données ? C'est la question à laquelle on tentera de répondre dans ce chapitre.

VII.2. Analyse par simulation

La simulation permet d'examiner les impacts du système AIDA avant sa mise en œuvre effective sur la section autoroutière expérimentale. Elle offre la possibilité d'étudier des réseaux avec différentes caractéristiques et des scénarii multiples. Une recherche d'un modèle de simulation répondant à notre problématique nous a conduit à utiliser l'outil ARCHISIM.

VII.2.1. Description de l'outil ARCHISIM

L'objectif de ces essais de simulation consistait à examiner les fonctionnalités principales du système AIDA notamment le recueil de données dynamiques, la détection automatique d'incidents et l'alerte des conducteurs en amont d'un incident.

L'outil ARCHISIM vise à reproduire de façon réaliste le comportement du couple conducteur – véhicule à travers la modélisation de la conduite automobile et la simulation de trafic. Le modèle de trafic est fondé sur une approche multi-acteurs : chaque véhicule ou mobile est doté de caractéristiques qui lui sont propres et réagit en fonction de son environnement (mobiles à proximité, nombre de voies de circulation,..).

Un contrôleur, dans le modèle de trafic d'ARCHISIM, est un acteur qui peut gérer des capteurs et/ou des actionneurs. Un capteur est un objet qui permet au contrôleur de recevoir des informations issues de l'environnement. Cet objet peut représenter un capteur ponctuel (boucle magnétique) ou une balise électronique de type AIDA. Un actionneur permet au contrôleur de transmettre des informations à l'environnement. Il peut représenter, un panneau de signalisation, un panneau à messages variables (PMV) ou une balise de type AIDA. Dans notre cas, les balises AIDA sont à la fois capteurs et actionneurs.

Dans ARCHISIM, les objets sont caractérisés par la combinaison :

type - route – pk - sens – voie – noVoie – nbVoies

Le **type** indique la qualité de l'objet (capteur ponctuel, spatial, panneau...). La **route** permet d'attribuer l'objet à une route spécifique du réseau. La position kilométrique (**pk**) donne la distance au point d'origine de la route choisie. Le **sens** représente le sens de circulation sur cette route.

La **voie** représente un indicateur géométrique, il donne la distance à l'axe de la route.

Le **no Voie** représente un indicateur logique, il donne le numéro de la voie sur laquelle l'objet agit.

Le **nb Voie** indique le nombre de voies actives au pk considéré. Le pk et la voie s'expriment en décimètre.

Les contrôleurs décrits ci-dessus ont été conçus pour agir sur des réseaux autoroutiers. Il est possible de simuler plusieurs contrôleurs simultanément en décrivant leurs caractéristiques : nombre, type et position des capteurs et actionneurs utilisés.

Des exemples de fichiers de contrôleurs, de recueil de données par boucles et par les balises AIDA, sont donnés en *Annexe III*.

L'outil ARCHISIM est constitué de trois parties principales :

- un module appelé "Distrib1" qui fournit les données d'entrée (ex : niveaux de trafic,..) au programme qui effectue la simulation ;
- un programme appelé "DR2" qui exécute la simulation et permet de visualiser son déroulement. Ce programme utilisera plusieurs fichiers d'entrée ;
- Un module baptisé "Dess1" qui a pour objectif d'exploiter les informations issues des fichiers "capteurs" générés lors de la simulation. Cette exploitation se fait à travers l'agrégation des données "capteurs" selon une dimension temporelle ou spatiale. Le résultat est la génération de plusieurs fichiers exploitables sous un tableur de type Excel.

VII.2.2. Fichiers de sortie

Dans le cadre de cette étude, le module logiciel ARCHISIM / AIDA a été intégré dans les programmes Distrib1 et Dr2 :

En plus des niveaux de trafic, Distrib1 contient les moyens de fixer le taux d'équipement des véhicules par le système AIDA, la position des balises hyperfréquence (espacement et densité des balises AIDA sur l'infrastructure).

Des fichiers en sortie sont générés par scénario volume de trafic et taux d'équipement. Ils correspondent aux données signalées par chaque véhicule lors de son passage devant une balise.

Les données suivantes sont produites pour une balise :

- Le n° de véhicule
- Sa longueur
- La localisation de sa voie
- Sa vitesse
- Sa vitesse désirée (dans le cas où il n'est pas gêné par d'autres véhicules)
- Sa date de génération
- La date de passage
- Le temps de passage

VII.2.3. Scénarii

Grâce à cet outil, un recueil de données de trafic microscopiques est effectué. Des scénarii de simulation sont définis en tenant compte du type d'événements, du taux d'équipement des véhicules et du niveau de trafic.

Dans le cadre de cette étude, ARCHISIM a permis de simuler différents types d'incidents en injectant une demande correspondant à différents niveaux de trafic.

ARCHISIM a été utilisé pour un recueil de données de trafic microscopiques. Des scénarii de simulation sont définis en tenant compte du type d'événements, du taux d'équipement des véhicules et du niveau de trafic. Il a été validé avec des données de trafic d'une section autoroutière à 3 voies. Ce qui conforte des travaux de calibration et de validation de l'outil déjà effectués sur des sections autoroutières similaires (El Hadouaj, 2000).

ARCHISIM a permis de simuler différents types d'incidents en injectant une demande correspondante à différents niveaux de trafic.

L'évaluation porte sur une section d'autoroute à 3 voies de circulation ayant une longueur de 21 km.

Les paramètres de simulation sont décrits ci-dessous :

- Durée de simulation : 60 min,
- Durée d'incident : 30 min,
- Début d'incident : 20 min après le début de la simulation,
- Localisation d'incident : pk 8000 m,
- Localisation des boucles de comptage : pk 3000m et pk 20000m
- Localisation des balises AIDA: pk 4000m, pk 12000m, pk 20000m
- Pas de temps : 6 min.

Cet incident influence une zone ayant une longueur de 1 km où la vitesse pratiquée est de 50 km/h.

On prend en compte 2 volumes de trafic avec un taux constant de PL égal à 10%.

3 taux d'équipement des véhicules sont étudiés sachant qu'uniquement les VL sont équipés du système AIDA : 10%, 20% et 30%. Par combinaison des niveaux de trafic et des taux de pénétration AIDA, on obtient 6 situations.

VII.2.4. Principe de la méthode

La méthode vise à estimer des temps de parcours pendant les scénarii décrits ci-dessus. Une analyse de type 'avant – après' est effectuée grâce à l'outil ARCHISIM. La situation 'avant' ou de référence correspond à un calcul des temps de trajet basé sur des boucles de comptage à travers la méthode de stock. La situation 'après' est celle où l'on utilise des véhicules traceurs AIDA comme moyen de recueil de temps de parcours.

VII.2.4.1. Situation de référence :

Nous avons simulé, grâce à ARCHISIM, la situation de référence où l'on estime, par la méthode dite de « stock », les temps de parcours instantanés moyens sur le tronçon examiné. Celle-ci s'appuie sur l'analyse du déplacement des flux sur un axe par comparaison, à intervalles réguliers, des flux entrants et sortants.

Soit [A, B] une section constituée de plusieurs tronçons S_i représentés ci-dessous :



Avec :

IT = Intervalle de temps élémentaire de calcul, typiquement 6mn

$t = p * IT$ = horodate de calcul du temps de parcours, multiple de IT

$Q_{i,H,S,t}$ = débit horaire de sortie du tronçon S_i à l'instant t

$Q_{i,IT,E,k}$ = débit, sur IT, d'entrée du tronçon S_i pendant la kème séquence IT

$Q_{i,IT,S,k}$ = débit, sur IT, de sortie du tronçon S_i pendant la kème séquence IT

$TP_{AB,t}$ = estimation, en minutes, du temps de parcours moyen instantané des véhicules entre A et B à l'instant t

$STO_{i,t}$ = stock du tronçon S_i à l'instant t

$STO_{i,0}$ = stock initial du tronçon S_i à l'instant $t=0$

La méthode de stock consiste, pour chaque séquence de temps, à calculer le nombre de véhicules présents dans chaque tronçon constituant l'itinéraire (ASFA, 1999) :

$$STO_{i,t} \approx STO_{i,0} + \frac{IT}{H} \times \sum_{k=1}^p [Q_{i,IT,E,k} - Q_{i,IT,S,k}]$$

Ensuite, elle estime le temps de parcours instantané à travers ces tronçons en effectuant le rapport entre le stock et le débit de sortie du tronçon, débit supposé constant et égal à sa valeur actuelle :

$$TP_{AB,t} \approx H \times \sum_i \frac{STO_{i,t}}{Q_{i,H,S,t}}$$

Deux stations de recueil de données de trafic fournissant des débits situées au début et à la fin de chaque tronçon élémentaire, suffisent pour mettre en œuvre cette estimation du temps de parcours instantané moyen. Dans le scénario défini ci-dessus, deux boucles de comptage sont installées aux PK 3 et PK 20 du site étudié.

VII.2.4.2. Situation après

C'est le cas où l'on simule le déploiement du système AIDA pour assurer une fonction de recueil de temps de parcours grâce à des véhicules équipés de terminaux embarqués. Des balises AIDA sont positionnées, sur la section autoroutière, avec un espacement régulier de 8 Km. Trois taux de pénétration du système AIDA sont examinés : 10%, 20% et 30% du débit total des véhicules circulant sur le réseau simulé.

VII.2.5. Résultats

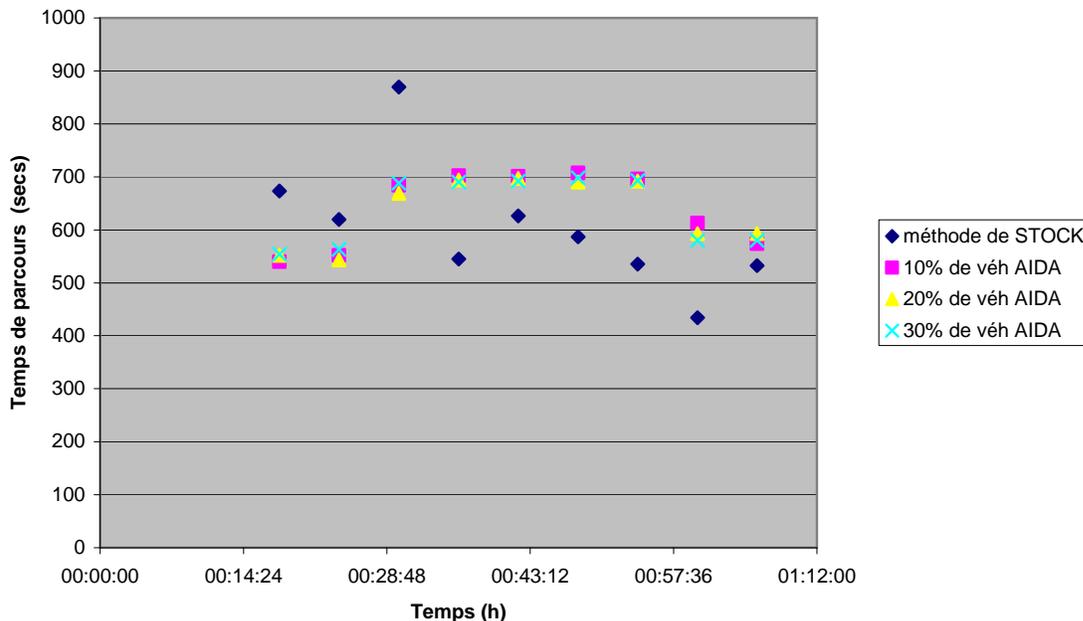
Un extrait d'un fichier résultat des temps de parcours moyens (en secondes) par pas de 6 minutes est donné dans le tableau ci-dessous pour les deux situations : avant (par la méthode de stock) et après (par les véhicules traceurs AIDA) :

Pas de temps (minutes)	Situation avant	Situation après		
	Méthode de STOCK (Boucles)	Véhicules AIDA (10%)	Véhicules AIDA (20%)	Véhicules AIDA (30%)
00:18:00	673	540	552	554
00:24:00	619	552	543	563
00:30:00	869	684	669	688
00:36:00	544	702	694	690
00:42:00	626	701	697	692
00:48:00	586	707	690	698
00:54:00	535	696	692	693
01:00:00	434	613	593	580
01:06:00	532	574	593	580

Tableau n° VII.1 – Temps de parcours (en secondes) estimés par ARCHISIM pour les situations avant et après

La figure ci-dessous illustre la comparaison des temps de parcours calculés par la méthode de stock et ceux estimés par les véhicules traceurs AIDA.

**Figure n°VII.1 - Comparaison des temps de parcours AIDA et boucles
(Q = 2550 veh/h)**



VII.2.6. Observations

On remarque que les temps de parcours fournis par les véhicules traceurs simulés, présentent une faible sensibilité à la variation du taux de pénétration du système AIDA. Une valeur de l'ordre de 10% pourrait être suffisante pour estimer des temps de parcours significatifs.

Pour les deux situations, on observe une croissance des valeurs moyennes des temps de parcours mais avec des ratios différents (plus de 5 minutes à $t = 24$ mn). Les temps de parcours estimés par les véhicules traceurs AIDA augmentent de 17%, 10 minutes après l'occurrence de l'incident ($t = 30$ mn) et commencent à diminuer 4 minutes après sa fin (à $t = 54$ mn). La distribution des temps de parcours ARCHISIM est relativement stable pendant la durée de l'incident (entre $t = 30$ mn et $t = 50$ mn) tandis qu'une fluctuation notable entache les valeurs estimées par la méthode de 'Stock' (écart type de deux minutes).

L'écart type de la distribution des vitesses spatiales est relativement stable pour les différents scénarii examinés. Il est identique pour les situations impliquant 20 et 30 % de véhicules équipés (de l'ordre d'une minute).

Pour un niveau de trafic plus faible (1275 véh/h), les observations sur l'écart type de la distribution des temps de parcours estimés par les deux méthodes, restent valides.

Les biais observés entre les valeurs calculées par Stock et celles des véhicules traceurs AIDA s'expliquent par des carences connues de la méthode de stock. Celle-ci permet de réagir à la survenue d'un incident sans attendre que la retenue créée remonte sur la station amont, puisque la baisse du débit aval fait augmenter le stock. Cependant, elle est sensible aux erreurs de comptage et son utilisation nécessite une réinitialisation périodique (typiquement 8 à 10h) du calcul des stocks pour éviter le cumul des erreurs. De surcroît, elle se traduit par une méconnaissance du stock initial des véhicules.

VII.2.7. Validation de l'algorithme

L'algorithme permettant de calculer ces valeurs, est validé à partir d'une comparaison avec des valeurs de référence qui sont, dans notre cas, celles basées sur la méthode de stock. La précision de l'approche est caractérisée par l'écart quadratique moyen absolu EQMA et l'écart quadratique moyen relatif EQMR.

Ces indicateurs de précision sont définis par les expressions suivantes :

$$EQMA = [(1/N) \sum (TPR - TP_{obs})^2]^{1/2} \quad (1)$$

$$EQMR = [\sum (TPR - TP_{obs})^2 / \sum TP_{obs}^2]^{1/2} \quad (2)$$

Dans ces formulations, TPR désigne les temps de parcours estimés par la méthode de Stock et TP_{obs} les valeurs fournies par l'outil ARCHISIM pour les 10, 20 et 30 % de proportion de véhicules équipés.

Le tableau suivant indique les résultats des erreurs moyennes relatives pour le scénario étudié :

Proportion de véhicules traceurs (%)	EQMR
10	20.7 %
20	20.3 %
30	19.2 %

Tableau n°VII.2 – Valeurs des erreurs moyennes relatives

Dans cette phase de validation, le niveau de précision se révèle satisfaisant, l'erreur relative est d'environ 20 % quand la proportion des véhicules équipés d'un dispositif embarqué représente 10 %. La sensibilité de cette erreur par rapport à la proportion de véhicules équipés est faible. Ce qui conforte le constat qu'un taux d'équipement de 10 % suffit à fournir avec une précision satisfaisante des temps de parcours moyens sur une section autoroutière.

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par la méthode de stock à travers plusieurs campagnes de mesure réelle sur plusieurs tronçons autoroutiers similaires au site simulé. Lorsque l'ensemble des points d'entrée et de sortie est équipé, une erreur quadratique moyenne comprise entre 10 et 18% pour des trajets de 35 à 86 mn a été relevée.

VII.3. Analyse de données réelles

La section qui suit vise à évaluer les potentialités du système AIDA, en conditions réelles de trafic, à remplir les fonctions d'estimation des temps de parcours et de détection des présomptions d'incidents.

VII.3.1. Architecture du système

Le système AIDA est composé des éléments suivants :

- Des badges Liber-t (application de télépéage commune à toutes les sociétés d'autoroutes françaises) ou des terminaux embarqués AIDA permettant la collecte et l'enregistrement des passages, en vue du calcul des temps de parcours ;
- Des équipements au sol sous forme de balises hyperfréquence déployées en section courante selon un maillage prédéfini ;
- Une transaction contenant l'enregistrement du point de passage (lecture du badge par la balise au sol) ;
- Des outils d'aide à l'exploitation permettant d'exploiter les données temps réel remontées par les balises, d'effectuer des calculs statistiques et d'enrichir la base de données historiques.

VII.3.2. Description du réseau équipé

Le site en vraie grandeur est situé entre Saint-Arnoult et Orléans sur l'autoroute A10 exploitée par la société COFIROUTE. Il est équipé de sept sites dont chacun est constitué de six balises hyperfréquence. Une section délimitée par deux balises consécutives est appelée 'tronçon atomique' (cf. figure n°VII.2).

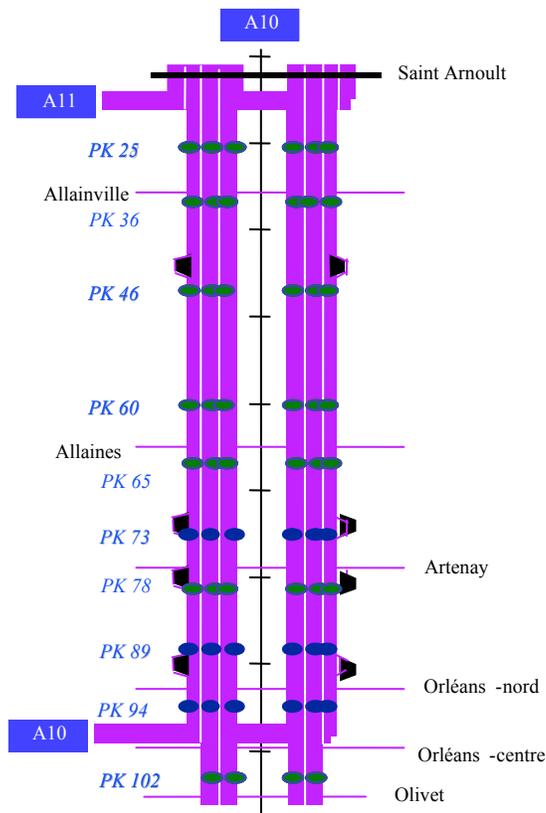


Figure n° VII.2 – Site de test du système AIDA sur la section saint Arnoult – Orléans (Autoroute A10)

VII.3.3. Recueil des temps de parcours

Au premier passage sous une balise AIDA, il est attribué au véhicule un numéro d'identifiant aléatoire (qui est « inscrit » de manière provisoire sur son badge de télépéage) qui sera ensuite reconnu par les autres balises. Ce système d'écriture aléatoire d'un numéro provisoire à chaque trajet, sur la portion d'autoroute équipée, garantit une confidentialité à l'utilisateur puisqu'il n'y a aucun moyen de relier l'identité de l'utilisateur à ce numéro. Ceci est considéré comme une condition fondamentale à la création d'une application de recueil de temps de parcours basée sur des véhicules traceurs. Chaque point de passage est équipé d'une horloge temps réel. Les horloges des différents points de passage sont nécessairement synchronisées à l'aide d'une horloge maître.

Le système AIDA permet la collecte des temps de parcours d'une manière complètement anonyme. Un logiciel spécifique a été développé sur l'ensemble des balises AIDA et traite automatiquement l'attribut D-PASS implanté dans tous les badges Liber-t.

Le principe de base de l'algorithme d'estimation des temps de parcours remontés par les véhicules équipés de badges DSRC consiste à utiliser une horodate portée par le badge et mise à jour par les balises, au franchissement de celles-ci.

Le tableau suivant décrit la définition des cas normaux et des anomalies :

Valeur du code	Description du code	Commentaires
0	OK	D PASS correct mis à jour
1	OK et initialisation effectuée	D PASS
2	Identifiant service / version non géré	Positionné lorsque l'identifiant service est différent de 7 ou l'identifiant service différent de 1
3	Horodate incohérente	Positionné lorsque l'horodate du D_PASS a une différence trop grande par rapport à l'horodate courante de la balise
4	Temps de parcours incohérent	<i>Non géré par la balise</i>
5	Adresse locale incohérente	<i>Non géré par la balise</i>
6	Point de passage incohérent	Positionné si le numéro de voie n'est pas compris entre 0 et 99
7	Enregistrement d'origine incohérent	Positionné si le pays est différent de la France ou si la société est inconnue ou si le numéro de voie n'est pas compris entre 0 et 99
8	Enregistrement d'itinéraire incohérent	Positionné si un point de passage est localisé sur une autre société
9	Autres cas de transaction échouée	<i>Non géré par la balise</i>
10	Double traitement lors du même passage	Positionné si le temps de parcours est inférieur à 10 s
11	Détection d'un badge inconnu	Positionné si le pays est différent de la France ou si la société est inconnue dans le point de passage
12	Pile du badge faible	Non utilisé actuellement
13	Détection d'un double passage depuis l'origine	Positionné lorsque le point de passage est identique
14	Trajet comportant plus de 4 sociétés	Positionné lorsque le nombre de sociétés renseignées est dépassé

Tableau n° VII.3 – Caractéristiques de l'attribut D-PASS

La structure de l'attribut D-PASS est décrite ci-dessous :

Contenu du fichier	<p>Entête avec date, code société d'autoroute, nombre d'éléments</p> <p>Pour chaque ligne</p> <ul style="list-style-type: none"> • Code OBU : T pour TIS et A pour AIDA • Code de l'application et de la version • Code société du point de passage CS (25005 pour COFIROUTE) • Code gare du point de passage NG • Code voie du point de passage NV • Code sens du point de passage NS (0 pour Paris -> Orléans et 1 pour Orléans -> Paris) • Date du passage • Heure du passage • Identifiant (volatile) du badge • Caractéristiques du point de passage origine : CS, NG, NV, S • 16 codes des points de passage de la société A • 16 codes des points de passage de la société B • 16 codes des points de passage de la société C • 16 codes des points de passage de la société D • Code d'état CET • Code CEV • Code TP
--------------------	---

Tableau n° VII.4 – Structure de l'attribut D-PASS

Les balises AIDA envoient les données de temps de parcours au serveur AIDA qui les archive dans des fichiers exploitables sous Excel. Chaque fichier contient une série d'enregistrements des passages des véhicules sous les balises AIDA. Pour chaque enregistrement, on dispose (entre autres) des données suivantes : date de l'enregistrement, heure de l'enregistrement, identifiant provisoire du véhicule, sens de passage du véhicule, voie sur laquelle le véhicule a été enregistré. Un extrait d'un fichier exemple de données brutes est donné ci-dessous.

Projet :	AIDA													
Type Fichier :	Recueil TP													
Version :	1													
N° Fichier :	45602													
Code Société :	25005													
Date Constit :	15/07/2001													
Heure Constit :	01:30:14													
Nb éléments :	2735													
OBU :	D_PASS													
	SV	Point de passage				Horodate			Enregistrement de l'origine					
		CS	NG	NV	S	Date	Heure	@	TP	CS	NG	NV		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
T		113	25005	10049	2	0	14/07/2001	00:01:18	4C.5E.20	557	25005	10028	3	
T		113	25005	10073	2	0	14/07/2001	00:02:05	B8.04.7C	650	25005	10049	2	
T		113	25005	10073	3	0	14/07/2001	00:01:57	B0.22.9E	311	25005	10060	3	
T		113	25005	10073	1	1	14/07/2001	00:02:14	84.9C.F2	600	25005	10094	1	
T		113	25005	10085	2	0	14/07/2001	00:01:03	38.8C.E8	0	25005	10085	2	
T		113	25005	10085	2	0	14/07/2001	00:02:46	60.E6.9C	306	25005	10073	2	
T		113	25005	10085	2	0	14/07/2001	00:02:53	98.9C.F8	1563	25005	10028	3	
T		113	25005	10085	2	0	14/07/2001	00:02:53	98.9C.F8	1563	25005	10028	3	
T		113	25005	10085	2	0	14/07/2001	00:03:30	72.24.98	2059	25005	10028	1	
T		113	25005	10085	3	0	14/07/2001	00:00:46	3B.67.DF	0	25005	10085	3	
T		113	25005	10089	2	0	14/07/2001	00:03:21	38.8C.E8	138	25005	10085	2	
T		113	25005	10089	2	1	14/07/2001	00:02:56	28.86.42	0	25005	10089	2	
T		113	25005	10094	3	0	14/07/2001	00:02:40	A6.10.3E	0	25005	10094	3	
T		113	25005	10060	3	0	14/07/2001	00:06:16	4C.5E.20	855	25005	10028	3	

Tableau n° VII.5 – Données brutes issues des véhicules traceurs AIDA

VII.3.4. Traitement des données

Un traitement préliminaire de ces fichiers consiste à éliminer des doublons (enregistrements identiques qui ont été copiés plusieurs fois) représentant un peu moins de 3 % des données ; des données aberrantes telles que des véhicules s'arrêtant longtemps sur des aires de repos ou lorsqu'un véhicule n'a été repéré que sous une seule balise et que par conséquent, on ne peut pas déduire un temps de parcours entre deux points de passage.

Une procédure programmée en langage Visual Basic permet de traiter automatiquement ces fichiers afin de regrouper les données exploitables et d'éliminer celles qui ne peuvent pas être utilisées (*cf. annexes 1 & 2*). Elle calcule les temps de parcours à partir des heures de passage d'un même véhicule et effectue un marquage de ces données afin de les repérer facilement dans l'espace et dans le temps (intervalle de temps et tronçon parcouru). On regroupe enfin, pour chaque tranche temporelle (d'une durée d'une heure ou de six minutes), sur chaque tronçon, les données correspondantes.

VII.3.5. Observations

VII.3.5.1. Variations de vitesse

Les vitesses de passage se situent entre 120 km/h et 150 km/h. La section de l'autoroute A10 équipée de balises AIDA est essentiellement en milieu interurbain et donc des difficultés de circulation sont rarement observées. En majorité, les vitesses mesurées grâce aux balises AIDA sont

proches des "vitesses libres" sur autoroute. Certaines mesures sont nettement plus élevées que la limite de 130 km/h.

VII.3.5.2. Nombre de passages

A partir de l'exploitation des fichiers Excel journaliers de recueil de temps de parcours pendant la période de mai à juillet de l'année 2001, on a constaté une augmentation considérable du nombre de passages de véhicules traceurs par jour. En moyenne, ce nombre est passé d'environ 2200 véh/jour au début du mois de mai 2001, à environ 3800 véh/jour à la fin du mois de juillet 2001. Cette croissance de l'ordre de 70 % en 3 mois est la conséquence de la montée en charge des abonnements au système Liber-t (Télépéage Inter Sociétés) d'autoroutes et à la progression saisonnière du trafic. Le nombre de mesures le plus élevé a été enregistré le vendredi 20 juillet 2001 avec 5275 passages répertoriés. D'une manière générale, les plus gros nombres de passages sont relevés durant les jours de grands départs et les week-ends. Ce résultat est très utile en vue d'analyser les données correspondantes à des journées à fort trafic sachant qu'en première approche, il est admis que le télépéage est plus utilisé pour des trajets de type domicile / travail que pour ceux liés aux loisirs.

En raison du faible taux d'équipement de véhicules en terminaux sophistiqués remplissant toutes les fonctionnalités du système AIDA décrites précédemment, on a mis l'accent dans cette étude sur les données collectées par les balises AIDA à travers les véhicules munis de badges de télépéage inter sociétés utilisant la même technologie hyperfréquence. Depuis juillet 2000, cette proportion de véhicules traceurs est de plus en plus importante sur le réseau autoroutier français (*cf. figure VII.3*).

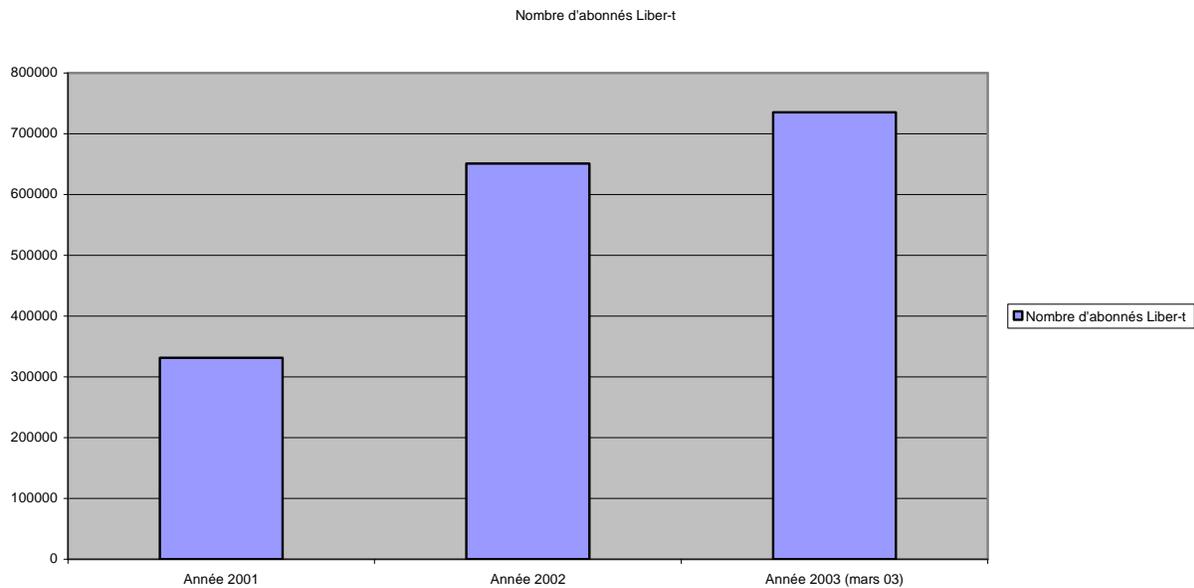


Figure VII.3. Evolution du nombre d'abonnés au Télépéage Liber-t en France (Source : données ASFA)

Sur le site examiné (saint Arnoult – Orléans de l'autoroute A10), le nombre d'enregistrements de passages de véhicules traceurs a quasiment doublé en 1 an entre 2001 et 2002 (*cf. figure VII.4*). Ce constat est cohérent avec le graphique précédent.

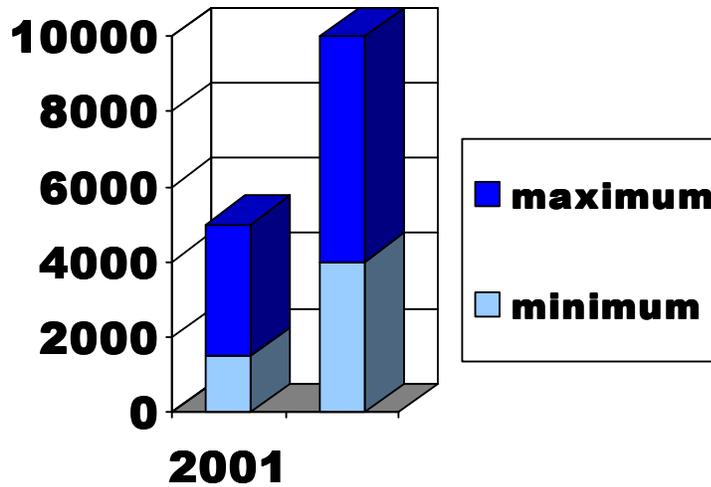
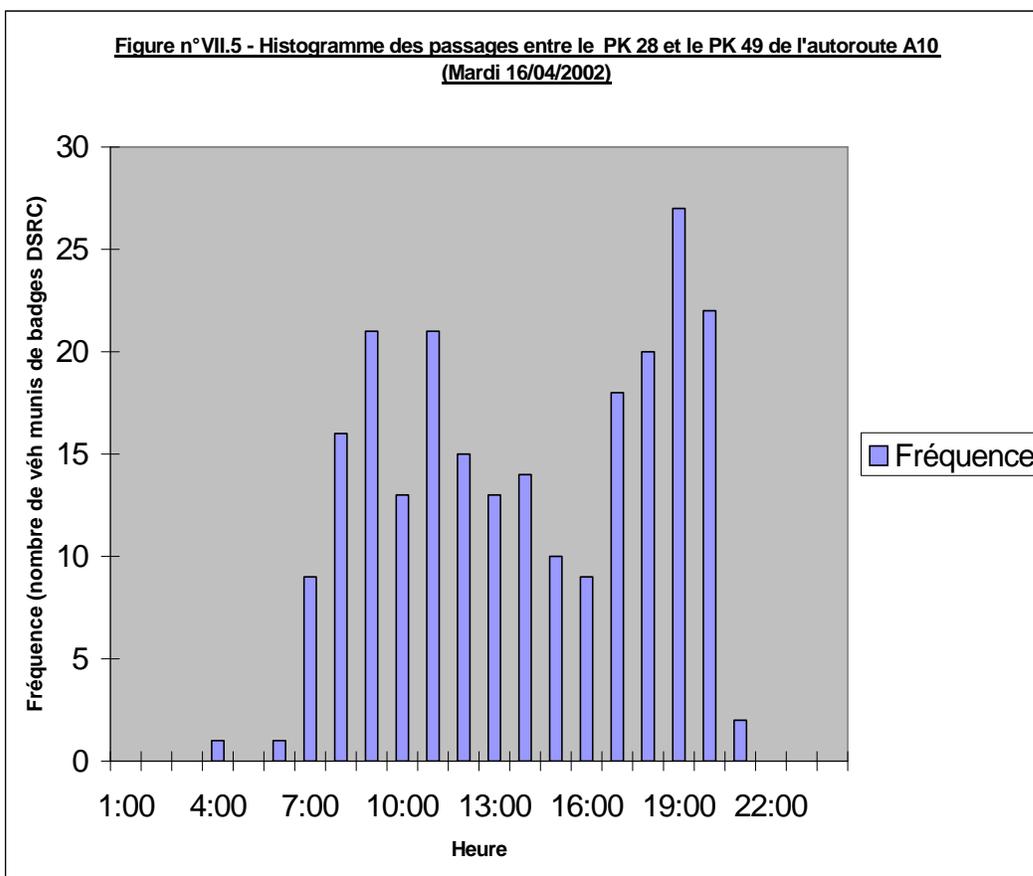


Figure n° VII.4 - Evolution du nombre de passages des véhicules munis de badges Liber-t entre les années 2001 et 2002 sur la section Ponthévrard – Orléans de l'autoroute A10

D'autre part, La figure VII.5 ci-après illustre un exemple de répartition temporelle des passages de véhicules traceurs pendant un jour ouvrable. On note la présence de deux pics principaux correspondant aux heures de déplacement Domicile – travail.



En revanche, pendant une journée de fin de semaine, la répartition des passages est plus étalée mais ces derniers sont moins importants que pour un jour ouvrable.

VII.3.5.3. Répartition des véhicules traceurs par voie

L'exercice a été effectué particulièrement sur la journée du 20 juillet 2001 comportant le plus grand nombre de passages. Le tableau ci après donne la répartition des passages par sens, par voie et par site de communication.

	Saint Arnoult → Orléans			Orléans → Saint Arnoult			
20/07/2001	Voie lente	Voie médiane	Voie rapide	Voie lente	Voie médiane	Voie rapide	TOTAL
PK 28	51	0	116	65	129	68	429
PK 49	43	173	4	16	194	16	446
PK 60	40	243	264	24	160	23	754
PK 73	70	248	245	75	214	115	967
PK 85	39	192	437	35	198	105	1006
PK 89	66	210	85	49	162	99	671
PK 94	1	311	459	101	30	100	1002
TOTAL	310	1377	1610	365	1087	526	5275

**Tableau n° VII.6 – Répartition des passages de véhicules traceurs AIDA par voie
(Journée du 20 juillet 2001)**

On constate que vers Orléans, la voie rapide est la plus utilisée par les véhicules équipés de badges Liber-t tandis qu'en direction de Paris, les passages s'effectuent essentiellement par la voie médiane.

D'une manière plus générale et sur la base des données recueillies en 2002, la répartition par voie des véhicules traceurs AIDA sur tout le réseau équipé est d'environ 15 % des passages sur la voie lente, 60 % sur la voie médiane et 25 % sur la voie rapide (cf. figure VII.6). L'observation des données trafic désagrégées par voie issues des boucles, conforte ce résultat pour l'ensemble des véhicules.

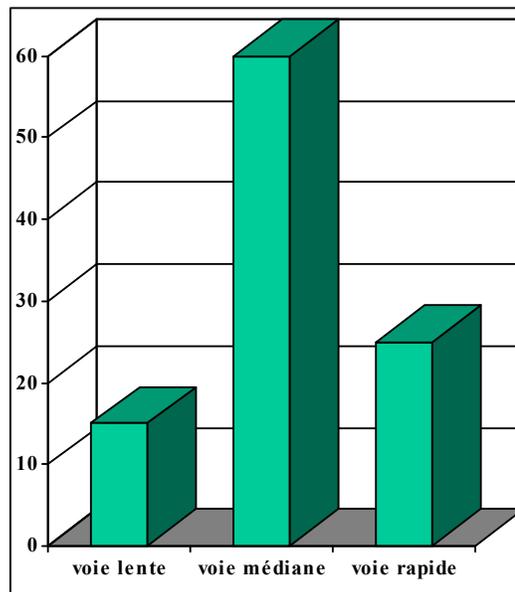


Figure VII.6 - Répartition (en %) des véhicules traceurs AIDA par voie sur la section Saint Arnoult – Orléans (Autoroute A10)

VII.3.6. Comparaison des données AIDA avec d'autres sources

Les données issues des véhicules traceurs AIDA sont confrontées à celles provenant d'autres sources, notamment les boucles de comptage, utilisées traditionnellement pour le recueil des variables de trafic fondamentales (débit, vitesse moyenne, taux d'occupation,..) et des données événementielles liées à la circulation (ralentissements, accidents, travaux,..).

Il convient de signaler que les boucles de comptage électromagnétiques sont localisées dans la chaussée en un point précis et que les données, étant liées à ce point, sont des moyennes dites temporelles c'est-à-dire des moyennes par intervalles de 6 minutes de données élémentaires. En revanche, les données fournies par les balises AIDA sont spatiales, c'est-à-dire des données correspondant à des moyennes sur un tronçon atomique (distance entre deux balises).

La méthode de calcul des temps de parcours issus des boucles est décrite ci-après.

VII.3.6.1. Méthode de calcul du temps de parcours par les boucles

Nous définissons un itinéraire comme une agrégation de sections trafic contiguës. Il est caractérisé par un point de départ (commune de départ) et un point d'arrivée (commune d'arrivée). Une section trafic est un tronçon d'autoroute déterminé par un trafic homogène (sans entrée ni sortie intermédiaire de véhicules, en conditions nominales d'exploitation), sur un sens de circulation déterminé. Elle est caractérisée par un nœud de type « Nœud Trafic » de début et un « Nœud Trafic » de fin. La section trafic est un ensemble de « Section Trafic Élémentaire ». Celle-ci est une portion de section de trafic déterminée par une capacité homogène (nombre de voies de circulation constant) sur un sens de circulation déterminé. Ses caractéristiques sont : un ensemble de voies, une longueur, un nœud de type « Nœud Trafic » début, un nœud de type « Nœud Trafic » fin, une « Section Trafic » d'appartenance (cf. figure n°VII.7).

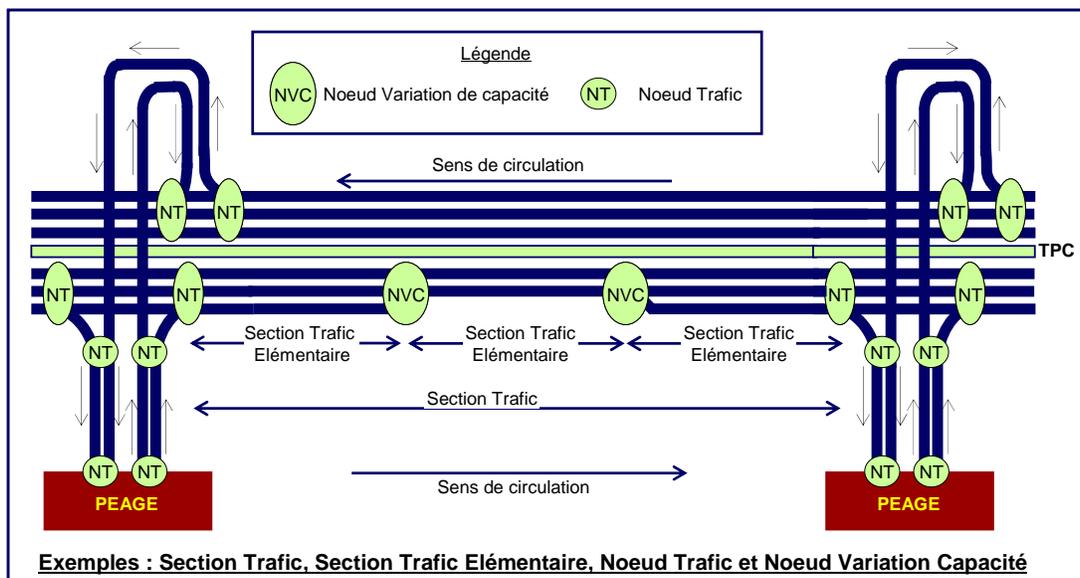


Figure n° VII.7 - Caractéristiques d'une section de trafic homogène

En raison de la densité des boucles de comptage sur les sections interurbaines étudiées à savoir une boucle en moyenne entre deux échangeurs consécutifs, la méthode de Stock n'était pas applicable. La méthode de calcul du temps de parcours moyen, décrite ci-dessous est basée sur des données empiriques.

La vitesse moyenne sur la section trafic notée VS (Km/h) est estimée par :

$$v_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$$

Où :

N : Nombre de boucles de comptage dans la section de trafic considérée

v_i = Vitesse moyenne mesurée et agrégée par 6 mn (en Km/h)

Le temps de parcours moyen sur une section de trafic noté **TPMS** est donné par l'expression ci-dessous :

$$TPMS (mn) = \left(\frac{LBB}{VBB} + \frac{LB}{VB} + \frac{LD}{VD} + \frac{LC}{VC} + \frac{LR}{VS} \right) * 60$$

Avec :

VS	Vitesse moyenne (Km/h) sur la section du trafic
LS	Longueur section
LBB	Longueur bouchon bloqué
VBB	Vitesse bouchon bloqué (5 Km/h par défaut).
LB	Longueur bouchon
VB	Vitesse bouchon (30 Km/h par défaut).
LD	Longueur 'trafic difficile'
VD	Vitesse 'trafic difficile' (60 Km/h par défaut).
LC	Longueur chantier.
VC	Vitesse chantier (90 Km/h par défaut).
LR	Longueur restante = LS-(LBB+LB+LD+LC)
Vmin	30 Km/h par défaut
Vmax	130 Km/h par défaut (vitesse à vide)

Nous noterons que les valeurs répertoriées ci-dessus sont des données d'observation du terrain issues des 'Fiches de main courante' (FMC). Le temps de parcours estimé ne concerne que les VL. En cas de délestage avec « sortie obligatoire », on ne calcule pas de temps de parcours sur la zone concernée.

Le temps de parcours sur un "itinéraire" est calculé en effectuant la somme de tous les temps de parcours de sections situées entre le localisant de début et le localisant de fin de l'itinéraire. Ce temps est arrondi à la minute supérieure.

VII.3.6.2. Conditions nominales

Les valeurs théoriques des temps de parcours sont données dans les deux tableaux ci après. Ils sont calculés en fonction de plusieurs paramètres tels que l'espacement entre balises, la vitesse du véhicule traceur et la localisation des balises.

Temps de parcours	Vitesse		
	30 km/h	80 km/h	130 km/h
Interdistance balises			
1 km	120	45	28
2 km	240	90	55
3 km	360	135	83
4 km	480	180	111
5 km	600	225	138
6 km	720	270	166
7 km	840	315	194
8 km	960	360	222
9 km	1080	405	249
10 km	1200	450	277

Tableau n°VII.7 – Temps de parcours (en secondes) en fonction de l'espacement entre les balises et la vitesse du véhicule

V = 130 km/h / PK	28.5	49.6	60.6	73.2	85.2	89.2	94.5
28.5		584	889	1238	1570	1681	1828
49.6			305	653	986	1097	1243
60.6				349	681	792	939
73.2					332	443	590
85.2						111	257
89.2							147
94.5							

Tableau n°VII.8 – Temps de parcours (en secondes) en fonction du point kilométrique des origines / destinations et de la vitesse libre

VII.3.6.2.1. Temps de parcours

Les données issues des boucles de comptages et des balises sur la section située entre le PK 85 et PK 96 sont comparées. Ce choix résulte de la localisation pertinente des balises AIDA (PK 85 et PK 94) et des boucles magnétiques (PK 85,2 et PK 96,1).

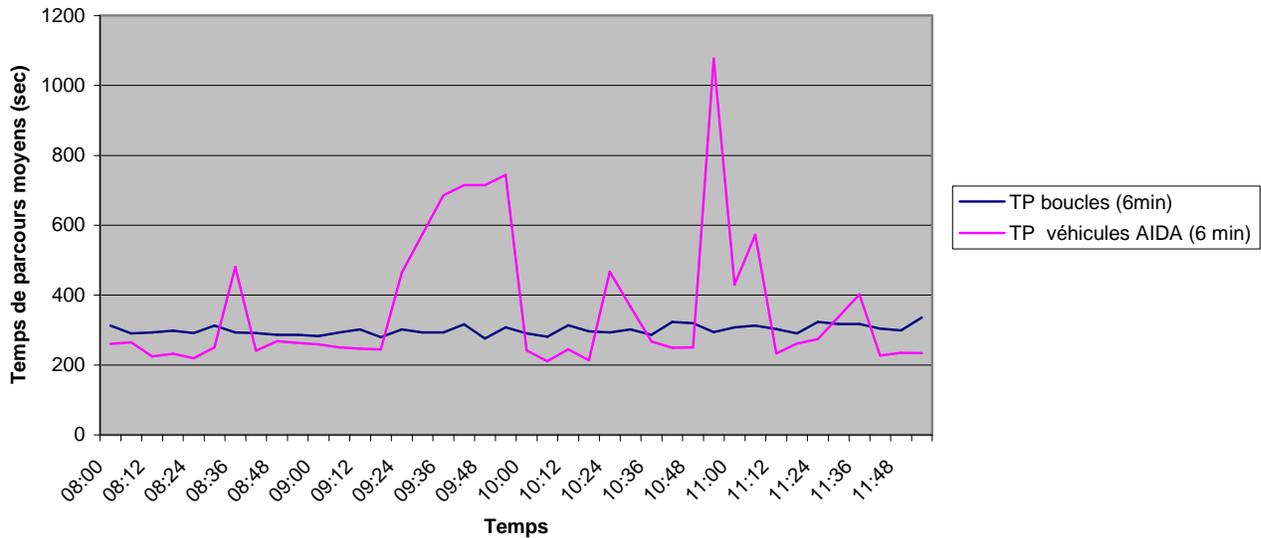
On constate qu'en conditions nominales (régime fluide), les valeurs moyennes de temps de parcours sont stables sur une section homogène d'autoroute durant toute une journée. Ce constat corrobore la faible dispersion des valeurs de temps de parcours en régime fluide de circulation. En revanche, l'écart type du temps de parcours augmente en trafic dense ou saturé.

Nous avons effectué des essais de modélisation de la répartition des temps de parcours, pour une période de temps et un tronçon donné. Leur but est de savoir si les temps de parcours sont répartis suivant une loi « classique » statistique. Différents tracés d'histogrammes montrant des répartitions de différents temps de parcours pour une même tranche horaire sur un même tronçon montrent que ces répartitions ne suivent pas une même loi et qu'elles varient fortement d'un échantillon à un autre.

Des tests du khi-deux sur les échantillons qui s'approchaient « graphiquement » des lois connues n'ont pas permis d'affirmer que les temps de parcours étaient répartis suivant une loi normale ou une loi log-normale.

Un exemple d'estimation des temps de parcours par les deux sources pour la journée du 18 mai 2001 est donné ci-dessous par tranche temporelle de 6 minutes.

Figure n°VII.8 - Comparaison entre les temps de parcours estimés par les boucles et par AIDA sur la section Artenay - Orléans de l'autoroute A10 (journée du 18 mai 2001)



VII.3.6.3. Situations perturbées

A partir d'un inventaire d'incidents survenus sur le réseau autoroutier de Cofiroute, nous avons identifié les situations pouvant être analysées à l'aide des données issues des deux sources de recueil de données (balises AIDA et boucles de comptage).

Les incidents choisis ont eu lieu pendant des heures de pointe bloquant au moins 1 voie sur 3 possibles sur une zone équipée à la fois de balises AIDA et de boucles de comptage. Dans notre cas, il s'agit de la section de l'autoroute A10 comprise entre le PK 28 (à proximité de la barrière de péage de Saint-Arnoult) et le PK 99 Sur la période des mois de mai, juin et juillet 2001. Quelques cas d'incidents remplissant ces critères sont examinés ci-après.

VII.3.6.3.1. Incident du 6 juillet 2001 :

Les caractéristiques associées à cet incident sont : début à 16h36 dans le sens Paris-province, Durée : 1h33 ; Localisation : entre les PK 85 et 99.

La perturbation est détectée à travers l'observation des vitesses remontées par les balises AIDA. On constate le passage d'un véhicule traceur sous la balise du PK 89 vers 16h38. Il a effectué le parcours entre les PK 85 et 89 avec une vitesse moyenne de 92 Km/h. A partir de 16h56 jusqu'à 17h14, un très fort ralentissement est détecté sur le même tronçon : 4 véhicules passent avec une vitesse moyenne de 20 Km/h suivis par trois véhicules entre 17h18 et 17h21 ayant des vitesses moyennes respectives de 45, 42 et 62 Km/h.

La situation commence à redevenir normale à partir de 17h28 (une vitesse moyenne excédant 100 Km/h).

La vitesse moyenne pendant la durée de l'incident sur le tronçon atomique PK85-PK89 est de l'ordre de 40 Km/h. Ceci coïncide avec une variation notable du débit des véhicules traceurs AIDA : 12 véh/h entre 15h et 16h ; 5 véh/h entre 16h et 17h puis 17 véh/h entre 17h et 18h.

Sur le tronçon compris entre les PK 89 et 94, les conséquences de l'incident sont observées vers 16h45 avec le passage de plusieurs véhicules pratiquant des vitesses de l'ordre de 35 Km/h et cela jusqu'à 17h55. Sur ce tronçon, les vitesses sont donc similaires à celles du tronçon précédent (PK 85-PK 89) lors de l'incident et le débit des véhicules équipés de badges DSRC subit aussi une forte dégradation, avec 15 véh/h entre 15h et 16h, 4 véh/h entre 16h et 17h puis 23 véh/h entre 17h et 18h.

Sur cette portion, l'incident est observé pendant plus longtemps, puisqu'il débute vers 16h45 et se termine vers 17h55. Ce qui correspond aux données fournies par la main courante du centre de gestion de trafic de Cofiroute.

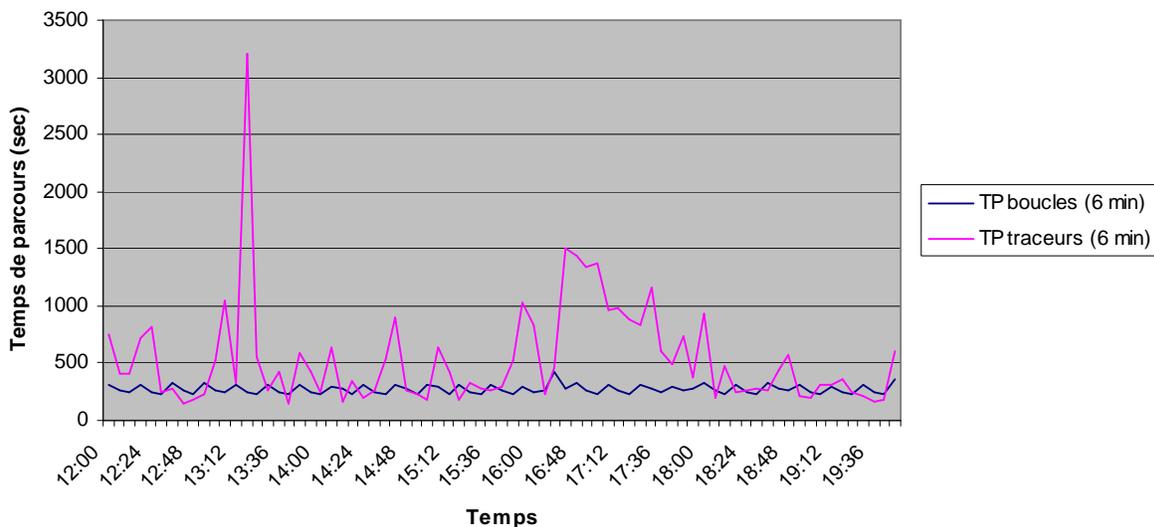
En examinant, par ailleurs, les sections plus en amont de l'incident étudié, on constate un léger ralentissement entre les PK 73 et PK 85 entre 17h et 17h30 (les vitesses pratiquées sont de l'ordre de 80 Km/h).

D'autre part, au niveau de la boucle localisée au PK 85, le ralentissement est visible entre 17h06 et 17h30 avec une vitesse moyenne pour cette période de l'ordre de 45 km/h, ce qui correspond aux vitesses remontées par les balises AIDA.

Au niveau de la boucle du PK 96, un ralentissement est visible entre 16h et 18h environ. La vitesse moyenne pendant cette période est de l'ordre de 60 km/h alors qu'elle égale 100 km/h avant et après l'incident. Par contre, les vitesses remontées par les boucles magnétiques sont plus faibles hors incident que celles des véhicules traceurs AIDA alors qu'elle sont plus élevées durant l'incident.

La répartition des temps de parcours moyens estimés par les deux sources est fournie dans le graphique suivant :

Figure n°VII.9 - Comparaison entre les temps de parcours estimés par les boucles et par les traceurs AIDA pendant l'incident du 06 juillet 2001 sur la section Artenay - Orléans de l'autoroute A10



VII.3.6.3.2. Incident du 14 juillet 2001 :

L'incident est localisé dans le sens Paris- province entre les PK 96 et 98 débutant à 7h15 et d'une durée de 3h31. Une seconde perturbation qui est une conséquence probable de la première survient entre les PK 75 et 96 à partir de 8h41 et dure 5h28.

Cet incident est donc particulièrement intéressant pour notre étude, puisqu'il est au voisinage des balises AIDA présentes aux PK 85, 89 et 94 et des boucles de comptage situées aux PK 85 et 96. De surcroît, il s'étale sur une durée importante permettant de suivre son évolution.

A partir des données issues des boucles, l'observation des vitesses moyennes par tranche de 6 minutes au PK 96 sur la voie de droite (voie lente) laisse apparaître un ralentissement entre 6h42 et 6h48, avec des vitesses passant de 80-90 km/h à environ 45-50 km/h. La voie de gauche fournit les mêmes informations, la vitesse passant de 100-120 km/h à 80 km/h sur la même tranche temporelle. Au PK 85, la circulation était ralentie dès 6h48 jusqu'à 9h18 (moyenne des vitesses entre 80 et 90 km/h), puis la situation s'est aggravée jusqu'à 13h24 (vitesse moyenne de 50 km/h). Le retour à une situation normale est constaté à 14h.

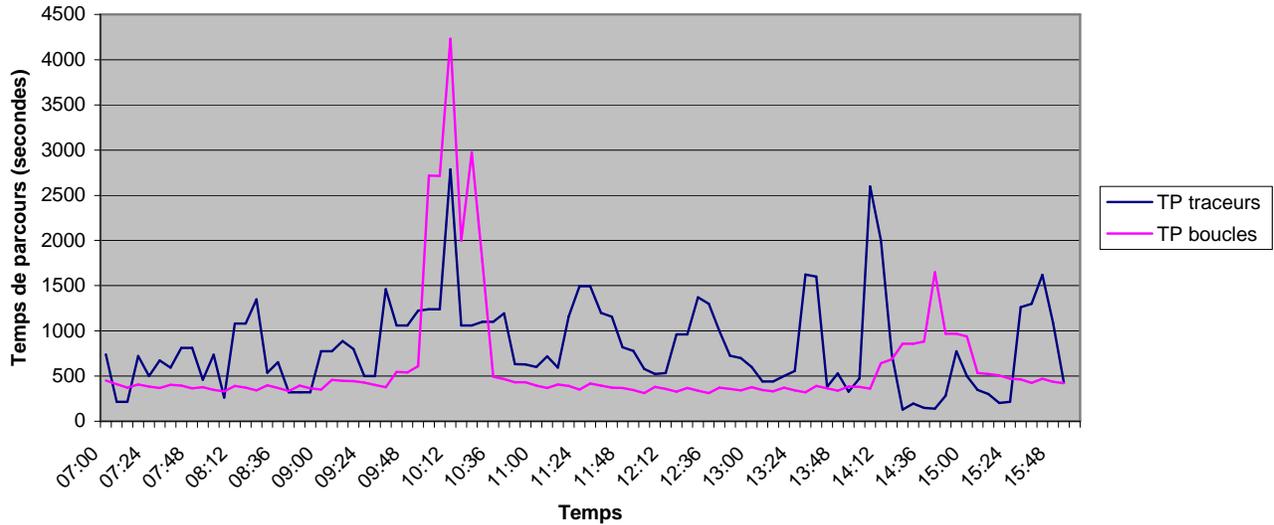
Les données provenant des véhicules traceurs laissent apparaître un ralentissement sur le tronçon situé entre les PK 89 et 94 débutant à 6h31. En effet, un véhicule a été enregistré au PK 94 à 6h31 avec une vitesse moyenne de 103 km/h alors que le véhicule suivant, enregistré à 6h56, avait une vitesse de 60 km/h. Celui-ci était suivi à partir de 7h05 par des véhicules ayant des vitesses de l'ordre de 20 à 40 km/h et cela jusqu'à 13h48.

Entre les PK 85 et 89, c'est vers 6h50 qu'apparaissent les premiers signes d'un ralentissement avec des vitesses de l'ordre de 80-90 km/h qui chutent pour atteindre une moyenne de 40 km/h entre 9h et 12h avant de revenir progressivement à la normale vers 13h30.

Les données AIDA montrent que l'incident a débuté avant l'heure indiquée sur le fichier des événements SATIR (Système d'Aide au Traitement de l'Information Routière). L'absence de données AIDA (taux relativement faible de véhicules équipés de badges Liber-t) entre 6h31 et 6h56 a vraisemblablement retardé la détection de l'incident.

Le graphique ci-dessous montre la répartition des temps de parcours moyens estimés, par tranche de temps de 6 minutes, respectivement par les boucles de comptage et les véhicules traceurs.

Figure n°VII.10 - Comparaison entre les temps de par cours basés sur les boucles et sur les traceurs AIDA pendant l'incident du 14 juillet sur la section Artenay - Orléans de l'autoroute A10



VII.3.7. Conclusions

La comparaison des données issues des deux sources (boucles et véhicules traceurs) apporte le constat suivant :

Les données issues des boucles de comptage couvrent la totalité des véhicules circulant sur le réseau autoroutier tandis que les balises AIDA remontent uniquement les informations provenant des véhicules équipés de badges Liber-t. Les ralentissements décrits précédemment ont eu lieu en présence d'un débit important de véhicules et donc lorsque la probabilité, d'avoir un échantillon suffisant de véhicules équipés de badges Liber-t, est la plus élevée.

L'implantation des boucles de comptage étant ponctuelle, les données qu'elles fournissent sont moins fiables que celles recueillies par les traceurs AIDA. Ceux-ci ont l'avantage de remonter les temps de parcours réellement effectués par les véhicules équipés de badges Liber-t.

En cas de fort espacement entre boucles magnétiques ou balises AIDA (10 km ou plus entre deux boucles ou deux balises consécutives), les données AIDA fournissent des informations plus précises sur l'état de la circulation. Lorsque l'espacement est plus faible (de l'ordre de 5 km) les deux sources fournissent des données sensiblement concordantes. Il faudrait donc une couverture du réseau par des boucles magnétiques faiblement espacées (5 km entre deux boucles consécutives) pour obtenir une précision comparable à celle du système AIDA.

VII.4. Définition d'un algorithme pour la prévision des temps de parcours

Dans cette partie, nous tentons de définir les premiers éléments d'un algorithme de prévision à court terme des temps de parcours sur autoroute.

Les analyses simultanées de la structure et de la quantité des données disponibles, de l'évolution des temps de parcours et la comparaison avec d'autres sources de données (notamment les boucles de comptage) ont permis d'effectuer les observations suivantes :

Le tronçon d'autoroute étudié fonctionne généralement sous des conditions nominales, c'est-à-dire en absence d'incidents ou d'événements gênant la circulation. Le trafic est généralement fluide. Ceci se traduit par le fait que la plupart des temps de parcours sont proches d'une valeur qui correspond à celle du temps de parcours réalisé avec une vitesse à vide.

L'évolution des temps de parcours se fait de manière continue et suit en général une tendance locale : lorsque les temps de parcours augmentent (correspondant à un ralentissement) sur une période de 6 minutes, on peut s'attendre à ce qu'ils augmentent encore par la suite et de même en cas de diminution.

A partir de ces observations, on a essayé de prévoir des temps de parcours à court terme à partir des données disponibles, en utilisant à chaque itération de l'algorithme les dernières données existantes (qui sont assez proches des données à venir) et les dernières évolutions des temps de parcours (qui ont de fortes chances d'être proches de l'évolution en cours).

Un algorithme, pour lequel le temps de parcours prévu pour une période est égal au temps de parcours de la période précédente auquel on ajoute la dernière évolution (la différence entre les temps de parcours moyens des deux périodes précédentes), manque de précision vu sa sensibilité aux dernières données. Sa tendance est de produire une estimation trop importante dans le cas d'une forte augmentation des temps de parcours ou au contraire une estimation trop faible dans le cas d'une diminution significative.

Une autre approche testée consiste à utiliser pour la prévision à court terme une moyenne mobile sur tous les véhicules passés dans l'heure précédent la période pour laquelle on cherche à produire une estimation du temps de parcours. Cet algorithme a l'avantage de regrouper plus de données et donc à produire une moyenne moins sensible aux valeurs particulières de l'échantillon, mais son principal inconvénient réside dans le fait que l'utilisation de valeurs remontées une heure plus tôt risque de biaiser les résultats en atténuant les effets des événements les plus récents.

VII.4.1. Principe de l'algorithme

Les tâches préliminaires de cet algorithme sont le remplacement des temps de parcours trop courts (correspondant à des vitesses supérieures à 150 km/h par exemple) par la valeur du temps de parcours d'un véhicule circulant à 150 km/h. Ceci permet de conserver les données de passage d'un véhicule, tout en se séparant des vitesses trop élevées.

Pour chaque tranche horaire de 6 minutes et sur chaque tronçon, on calcule la moyenne des temps de parcours remontés par les balises au cours de cette période de temps. Cette moyenne sera considérée comme étant le temps de parcours réel pour les véhicules ayant effectué leur parcours pendant cette tranche horaire.

En cas d'indisponibilité de données sur des intervalles de 6 minutes, on prendra comme valeur de temps de parcours la dernière moyenne calculée lors des tranches temporelles précédentes.

Ensuite, on peut calculer le temps de parcours pour la prochaine période comme étant la somme du dernier temps de parcours remonté (en réalité, la moyenne sur la tranche horaire de 6 minutes précédente) et de la moyenne des deux dernières évolutions. Cette nouvelle méthode de calcul permet de minimiser les effets d'évolutions locales brutales en les modérant. On conserve ainsi un caractère constant d'évolution locale des temps de parcours tout en diminuant l'impact d'une forte évolution.

Soit T_i le temps de parcours remonté effectivement au cours de la période i (moyenne des temps de parcours de tous les véhicules Liber-t passés entre la date t_{i-1} et la date t_i). On note E_i l'évolution entre la période $i-1$ et la période i : $E_i = T_i - T_{i-1}$.

L'estimation P_{i+1} pour la période $i+1$ est donnée par :

$$P_{i+1} = T_i + 0,5 \times (E_i + E_{i-1})$$

On compare la valeur P_{i+1} à la valeur notée 'N' calculée pour les conditions nominales sur ce tronçon. Si $P_{i+1} > N$, on garde la valeur P_{i+1} sinon on prend la valeur N comme estimation du temps de parcours T_{i+1} .

VII.4.2. Résultats des tests de l'algorithme de prévision des temps de parcours

L'algorithme défini ci-dessus fournit des résultats prometteurs de prévision des temps de parcours. Sous sa forme brute, il donne, sur des cas de perturbations pour lesquels les prévisions sont plus difficiles à effectuer, des erreurs de l'ordre de 2 à 3%.

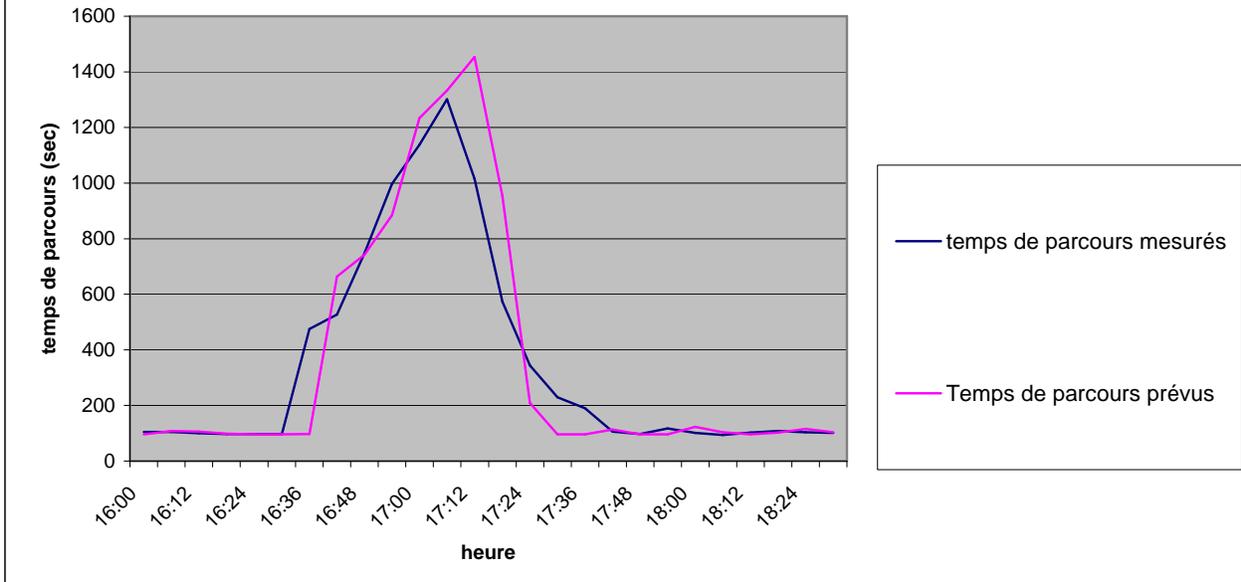
Lorsque les temps de parcours diminuent pour revenir vers des conditions normales, cet algorithme peut fournir des temps de parcours très faibles, voire négatifs (ce qui correspond à des vitesses aberrantes de plusieurs centaines de kilomètres par heures ou à des valeurs impossibles), on peut dans ce cas imposer comme prévision une valeur correspondant à la vitesse à vide équivalente à 130 Km / h sur autoroute.

VII.4.3. Validation de l'algorithme

La validation de l'algorithme de prévision est effectuée à travers une application à des journées types subissant des perturbations.

L'exemple ci-après illustre la distribution des temps de parcours mesurés par les véhicules traceurs AIDA et ceux estimés par l'algorithme de prévision court terme.

Figure n°VII.11 - Evolution des temps de parcours sur la section de contournement d'Orléans dans le sens Paris - province (incident du 16 mai 2002)



L'analyse de la précision de cet algorithme repose sur l'utilisation de mesures de référence issues des véhicules traceurs AIDA. La comparaison entre ces observations de référence et les temps de parcours estimés par l'algorithme de prévision permet de déterminer des indicateurs de précision. Ces derniers correspondent aux écarts quadratiques moyens absolu (EQMA) et relatif (EQMR) définis par :

$$EQMA = [(1/N) \sum (TPR - TP_{obs})^2]^{1/2}$$

$$EQMR = [\sum (TPR - TP_{obs})^2 / \sum TP_{obs}^2]^{1/2}$$

où dans notre cas, TPR représente le temps de parcours estimé par l'algorithme de prévision et TP_{obs} les valeurs mesurées par les véhicules traceurs AIDA.

L'application aux données collectées pendant la journée du 16 mai 2002 perturbée par un accident majeur (cf. graphique ci-dessus) montre que la précision est comprise entre 10 et 20%, soit une incertitude de 2 à 5 minutes pour un temps de traversée de la section affectée égal à 24 minutes.

La prévision effectuée par cet algorithme est considérée comme fiable en termes d'estimation des temps de parcours et d'appréciation de l'influence d'événements non récurrents sur les conditions de circulation.

VII.5. Dimensionnement des échantillons de véhicules traceurs

Dans les sections précédentes de ce chapitre, une comparaison des temps de parcours issus des véhicules traceurs AIDA et des boucles de comptage, a été effectuée. La question du nombre de véhicules équipés nécessaire pour obtenir une précision suffisante des temps de parcours n'a pas été

examinée. Cette partie présente le dimensionnement d'une flotte de véhicules traceurs sur le site équipé de balises AIDA.

Une base de données des temps de parcours de référence est constituée. Les états de trafic sont pris en compte à travers une classification préalable en niveaux de service de circulation.

VII.5.1. Taille des échantillons

Pour estimer avec une précision désirée, l'échantillon n des véhicules traceurs, un seuil de probabilité $(1 - \alpha)$ est fixé a priori. Nous supposons que l'échantillon est indépendant.

Si nous souhaitons que la précision relative de l'estimation soit au moins égale à $k\%$ de la moyenne m des temps de parcours reconstitués, il est démontré que la taille de l'échantillon n des véhicules traceurs est estimée par l'inéquation suivante :

$$n \geq (t_\alpha \sigma / km)^2 \quad (1)$$

Etant donné que le coefficient de variation CV est égal à : $CV = \sigma / m$

Où σ est l'écart type et m la moyenne.

Ainsi l'expression (1) devient : $n \geq (t_\alpha / k)^2 (CV)^2$

Avec : t_α : le facteur z de la loi normale

k : l'erreur relative

L'objectif recherché est de dimensionner des tailles optimales d'échantillons de véhicules traceurs permettant d'estimer le temps de parcours moyen avec un degré de précision fixé au préalable.

VII.5.2. Recueil de données

Les données pour le dimensionnement sont recueillies pendant les week-ends de l'été 2001, entre 7h et 20h sur l'itinéraire saint Arnoult – Orléans (76 km) de l'autoroute A10. Une typologie de jours a été établie. Pour chaque catégorie de jour vendredi ou samedi, les informations relevées, par intervalle de 6 min, sont : les débit (en véh/h) et taux d'occupation moyens (en %) au droit des différentes stations de comptage du tronçon, les temps de parcours reconstitués par les valeurs individuelles de la population véhicules traceurs (équipés de badges).

Les indicateurs statistiques servant au dimensionnement sont la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation. Ils sont calculés à partir de la base de données des temps de parcours de référence.

VII.5.3. Classification par niveau de service

Il existe une sensibilité notable de la dispersion du temps de parcours par rapport aux conditions de circulation. En régime fluide, l'écart type est faible. En trafic dense et saturé, la dispersion du temps de parcours est plus importante. Par conséquent, nous proposons de regrouper les temps de parcours mesurés par niveau de service. La classification des niveaux de service sur les réseaux autoroutiers est basée sur la concentration ou le taux d'occupation (HCM, 2000) et particulièrement sur sa relation avec le débit. Les niveaux de service définis sont :

- un régime fluide correspondant à un taux d'occupation inférieur au taux critique et un débit équivalent à 70 % de la capacité ;
- un régime dense atteignant la capacité ;
- une congestion traduite par un ralentissement et un taux d'occupation supérieur au taux critique ;
- un trafic saturé correspondant aux taux d'occupation les plus élevés.

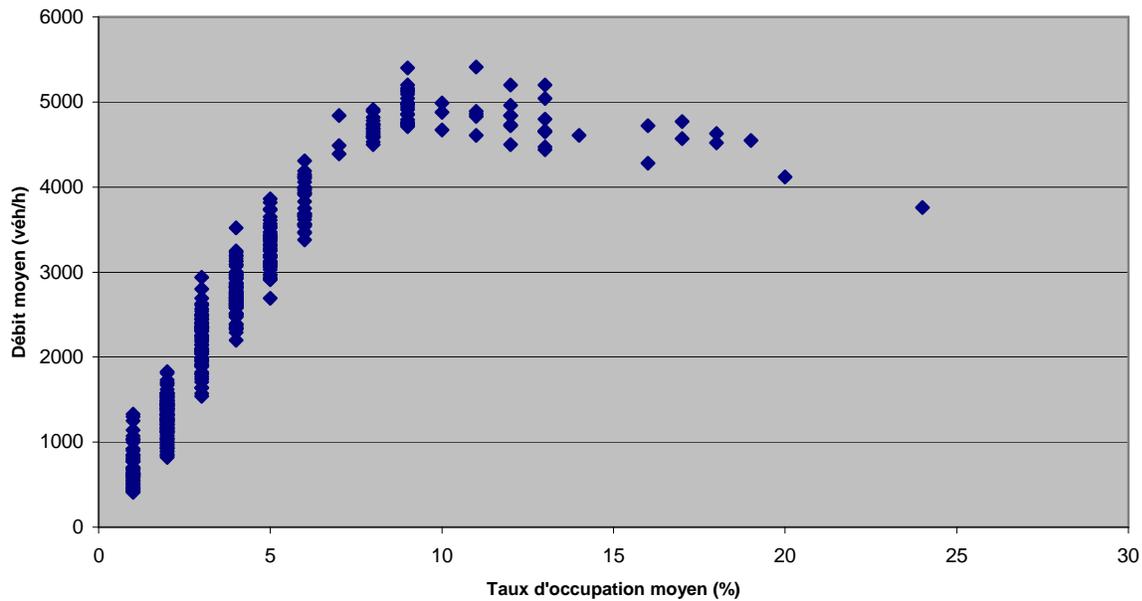
Un calibrage du taux d'occupation critique peut être effectué pour chaque itinéraire.

VII.5.4. Application à l'itinéraire saint Arnoult – Orléans

Le calibrage du diagramme fondamental Débit – Taux d'occupation, est effectué d'une manière expérimentale sur le tronçon saint Arnoult – Orléans équipé de balises AIDA et faisant 76 Km de longueur.

La figure ci-dessous représente le diagramme liant les valeurs de « débit moyen » et « taux d'occupation moyen » relevés sur cette portion d'autoroute.

Figure n°VII.12 - Relation débit moyen - taux d'occupation moyen sur la section expérimentale Saint Arnoult - Orléans de l'autoroute A10 (76 km)



Le seuil critique du taux d'occupation est de 9 % et la capacité de cet itinéraire est de l'ordre de 5100 véh/h. Ainsi, les niveaux de services sont classés comme suit :

- Régime fluide correspond à : $\text{taux moyen} \leq 5\%$
- Régime dense : $5\% \leq \text{taux moyen} < 9\%$
- Congestion : $\text{taux moyen} \geq 9\%$

A la base de l'expression (1), le dimensionnement de la taille des échantillons des véhicules traceurs est donné, pour chacun des niveaux de service définis, dans le tableau suivant :

Niveau de service	Fluide	Dense	Congestionné
Taux critique	$TO \leq 5\%$	$5\% < TO \leq 9\%$	$TO > 9\%$
Nombre de mesures	151	174	236
Moyenne TP (min)	26	29	41
Ecart type (min)	1.1	2.4	7.3
Coefficient de variation	0.04	0.08	0.18
Erreur relative k (%)	15	15	15
Taille de l'échantillon des véhicules traceurs	1	2	5

Tableau n°VII.9 - Dimensionnement de la taille de l'échantillon des véhicules traceurs sur la section saint Arnoult – Orléans (76 km)

Par tranche de temps de 6 min, l'échantillon minimal de véhicules traceurs nécessaire pour estimer le temps de parcours moyen à 15 % près et avec un intervalle de confiance de 95 %, varie entre 1 et 5, selon les niveaux de service définis. Le nombre de véhicules traceurs augmente avec la densité de trafic.

La sensibilité du dimensionnement de la taille des échantillons a été examinée par rapport à la précision relative k de la moyenne des temps de parcours reconstitués. Nous avons considéré des niveaux d'erreurs plus faibles que l'exemple décrit ci-dessus. Le tableau qui suit détaille le nombre de véhicules traceurs par niveau de circulation et en affectant à l'erreur relative k les valeurs de 5%, 10% et 15 %.

Erreur relative k (% de la moyenne)	Niveau de service		
	Fluide	Dense	Congestion
5	3	8	48
10	1	3	12
15	1	2	5

Tableau n° VII.10 - Nombre de véhicules traceurs en fonction de l'erreur relative k

Nous constatons que plus l'erreur k sur la moyenne des temps de parcours est faible, plus la taille de l'échantillon des véhicules traceurs est importante. Ce résultat est valable particulièrement pour des niveaux de trafic dense et congestionné. Pour ce dernier, il faut 4 fois plus de traceurs pour améliorer de 5% la précision sur la moyenne des temps de parcours et environ 10 fois plus afin de passer d'une erreur de 15% à 5% de la moyenne du temps de parcours.

VII.5.5. Taille des échantillons par rapport au débit total

Le dimensionnement décrit précédemment a été effectué sur des échantillons indépendants. Le paramètre qui nous semble pertinent est la proportion de véhicules traceurs par rapport au débit total des véhicules circulant sur la section expérimentale équipée de balises AIDA. L'examen des niveaux de service pour différents types de jours de la semaine a révélé l'intérêt de traiter cette problématique sur l'exemple des Samedis dans le sens Paris – province. Il s'agit d'estimer, par pas de 6 min, le ratio du nombre minimal de véhicules traceurs au débit moyen correspondant à chaque de niveau de circulation. Le tableau suivant donne le pourcentage de véhicules traceurs par rapport au flot total de tous les véhicules circulant sur la section expérimentale saint Arnoult – Orléans.

Itinéraire	Niveau de trafic		
	Fluide	Dense	Saturé
Saint Arnoult – Orléans	0,38	0,68	2,55

Tableau n° VII.11 - Proportion des véhicules traceurs par rapport au débit total

VII.5.6. Eléments de réponse

Les résultats obtenus confortent, en termes d'ordres de grandeur, les conclusions d'études effectuées aux Etats-Unis sur les sites de San Antonio et de Houston.

VII.6. Conclusions

A la base des différents calculs effectués ci-dessus, nous avons montré la faisabilité de l'utilisation des badges de télépéage pour la collecte des temps de parcours. Cette méthode ne présente aucune contrainte d'ordre technique ou opérationnel.

Les essais de dimensionnement des tailles d'échantillons de véhicules traceurs illustrent qu'en dehors de certaines périodes journalières (ex : entre minuit et 7 heures), le nombre de mesures individuelles recueillies est amplement suffisant pour déterminer précisément le temps de parcours en sortie d'un tronçon ou d'un trajet complet.

Le nombre de mesures obtenu dépend du nombre de véhicules munis de badges Liber-t et de l'état de circulation. La qualité des mesures est tributaire de la précision des horloges des balises hyperfréquence et du taux de lecture des badges.

CHAPITRE VIII

CONTRIBUTION AUX FONCTIONS D'ALERTE

VIII.1. Introduction

Dans ce chapitre, la fonction de pré alerte du système AIDA est examinée. Celle-ci a pour objectif de diminuer les risques d'accidents secondaires qui représentent aujourd'hui une des catégories principales d'accidents sur les réseaux autoroutiers.

Le but de la démarche est de vérifier si la pré alerte assurée par le système AIDA améliore chez les conducteurs des comportement de précautions par rapport à une situation de référence, où les incidents sont annoncés par des panneaux de signalisation dynamique ou la radio autoroutière.

VIII.2. Analyse par simulation

Afin de tester la fonction de pré alerte du système AIDA, nous utilisons l'outil ARCHISIM décrit précédemment (cf. § VII.2.1).

VIII.2.1. Objectifs

Ces essais de simulation visent à étudier, en cas d'incident, l'impact d'un message d'alerte AIDA sur la vitesse moyenne d'une flotte composée de véhicules équipés et non équipés du système.

Les objectifs de cette évaluation par simulation sont décrits dans le tableau suivant :

Type d'évaluation	Classe générique "Objectif"	Instance de classe "Objectif"	Instance de classe "Stratégie"	Tactique ou moyen
Impacts	Sécurité	Réduction du nombre d'accidents par collisions en queue de bouchon	Affichage spontané pour le conducteur équipé du système embarqué "AIDA"	Informations en temps réel sur la présence d'un incident par affichage sur un écran embarqué dans le véhicule

Tableau n°VIII.1 – Objectifs assignés à l'évaluation par simulation

VIII.2.2. Hypothèses

Les hypothèses prises en compte lors de la modélisation sont essentiellement liées à l'utilisation du système AIDA et aux comportements attendus de la part des conducteurs équipés d'un tel dispositif.

Le tableau ci-dessous résume ces hypothèses.

Types de services	Comportements attendus
Incident trafic (travaux, accident, bouchon) ET/OU	- Ralentissement et respect de la limitation de vitesse. En cas de pluie et/ou brouillard (max 110 Km/h),
Incident météo (pluie, brouillard)	- Augmentation des temps 'inter véhiculaires' et rabattement sur la voie lente
Signalisation de sortie	- rabattement du véhicule sur la voie lente
Service saint-Bernard	- signalement de l'événement par le conducteur dès qu'il a passé la balise suivante

Tableau n°VIII.2 – Hypothèses de comportement

Nous supposons que les conducteurs équipés obéissent aux messages affichés sur les terminaux. Ils seront toujours concernés et bien couverts par l'information affichée. De plus, les utilisateurs du système AIDA modifient leur vitesse en fonction de l'incident annoncé à partir d'une distance maximale de 2500m avant l'événement. Ces modifications sont régies par des lois prenant en compte le type d'incident, la distance à l'événement et la vitesse instantanée du véhicule.

VIII.2.3. Indicateurs de Mesure des modifications de comportement

Les différences de comportement entre les conducteurs équipés et non équipés du système AIDA sont examinées selon les paramètres de modification des vitesses, des intervalles entre véhicules et du nombre de changements de voie.

Les indicateurs obtenus par la simulation sont :

1. vitesse moyenne du flot total des véhicules
2. répartition (en pourcentage) des vitesses individuelles sur le réseau
3. répartition par classe des Temps Inter Véhiculaires (TIV) sur un tronçon
4. débit total
5. débit/voie
6. débit des bretelles de sortie
7. nombre de changements de voie
8. proportion des véhicules AIDA au droit de chaque capteur "boucle"
9. temps de parcours moyen entre deux boucles de tous les véhicules
10. temps de parcours moyen entre deux balises des véhicules équipés du système AIDA

Ils sont représentés par leurs numéros respectifs dans le tableau suivant :

SERVICES AIDA	DONNEES OBSERVEES		SITUATIONS TRAITEES
	Sécurité	Gestion de trafic	
Alerte sur évènement trafic (aléatoire ou récurrent)	1, 2, 3, 7		Bouchon, accident, travaux, forte pluie, brouillard
Signalisation de sortie	7	4, 5, 6	Sélection de la sortie désirée par le conducteur
Recueil de temps de parcours par les véhicules traceurs AIDA		8, 9, 10	Prévision de temps de parcours avec un nombre minimal de véhicules AIDA sur une section homogène et dans un trafic mixte 'équipé - non équipé'

Tableau n° VIII.3 – Indicateurs de mesure des modifications de comportement

VIII.2.4. Scénarii de simulation

Le réseau étudié représente une autoroute à 3 voies d'une longueur de 21 km. Une section homogène est définie comme étant comprise entre deux échangeurs consécutifs.

La simulation est basée sur une répartition maximale de 0,2 veh/m/voie. Ce qui implique, au regard de la longueur du site, un nombre équivalant à 12 600 véhicules simulés dans le cas le plus extrême. La capacité par voie est de 1700 veh/h. Chaque section couvre généralement un tronçon entre deux échangeurs. Sur ces tronçons, viennent s'insérer des petits segments correspondant à tous les événements présents sur le réseau : bouchons, travaux, météo...

A chaque segment caractérisé par l'étendue d'un événement, sont associées une vitesse et une position de début et de fin. Les vitesses fixées par défaut sont les suivantes : 130 Km/h pour la vitesse à vide, selon le type de bouchon : bloqué à 0 km/h, bouché à 30 km/h, difficile à 60 km/h, sur chantiers en fonction des basculements : 60 km/h pour le sens du basculement et 80 km/h pour le sens inverse; des coupures de voies (80 km/h) ou de BAU (100 km/h). Les vitesses par temps de pluie et de brouillard sont égales respectivement à 110 km/h et 50 km/h.

En cas de recoupement spatial de plusieurs événements, la vitesse la plus défavorable est prise sur la section commune.

Trois conséquences d'incidents sont envisagées : 1 voie bloquée sur 3 ; 2 sur 3 et 3 voies bloquées sur 3 (correspondant au cas d'une autoroute coupée). Le nombre d'incidents simulés varie entre 1 et 10. Cinq durées d'incidents sont examinées : 30 mn, 45 mn, 60 mn, 90 mn et 120 mn.

Les paramètres de simulation du scénario étudié sont :

- durée de simulation : 60 min,
- durée d'incident : 30 min,
- début d'incident : 20 min après le début de la simulation,
- localisation d'incident : pk 8000 m,
- position des deux boucles de comptage : pk 3000m et pk 20000m
- position des trois balises AIDA: pk 4000m, pk 12000m et pk 20000m
- intervalle de temps : 6 min.

Cet incident affecte une zone de 1 Km où la vitesse pratiquée est de 50 Km/h. Deux niveaux de trafic sont pris en compte avec un taux de PL égal à 10% avec trois taux d'équipement des

véhicules par le système AIDA (10, 20 et 30%) sachant que seuls les VL sont équipés du dispositif embarqué. On obtient ainsi six scénarii avec l'incident décrit.

Afin d'avoir une meilleure connaissance sur les distributions temporelles et spatiales des vitesses moyennes pratiquées par toute la population de véhicules, cinq boucles virtuelles espacées de 300 mètres sont rajoutées aux données d'entrée décrites précédemment. Elles sont localisées respectivement aux pk 6700 m, 7000m, 7350 m, 7700 m et 8000 m. Cette dernière position coïncide avec celle de l'incident.

VIII.2.5. Résultats

La situation de référence correspond à une flotte de véhicules non équipés (0% de véhicules équipés par le système AIDA). Les données les plus pertinentes sont celles recueillies au niveau des boucles situées à 1000m, 650m et 300m en amont de l'incident. Les figures 2,3 et 4 ci-dessous montrent la distribution de la vitesse moyenne de la population totale de véhicules au droit de ces trois boucles.

Figure n°VIII.1 - Vitesse moyenne du flot, 1000 m e n amont de l'incident (2550 veh/h)

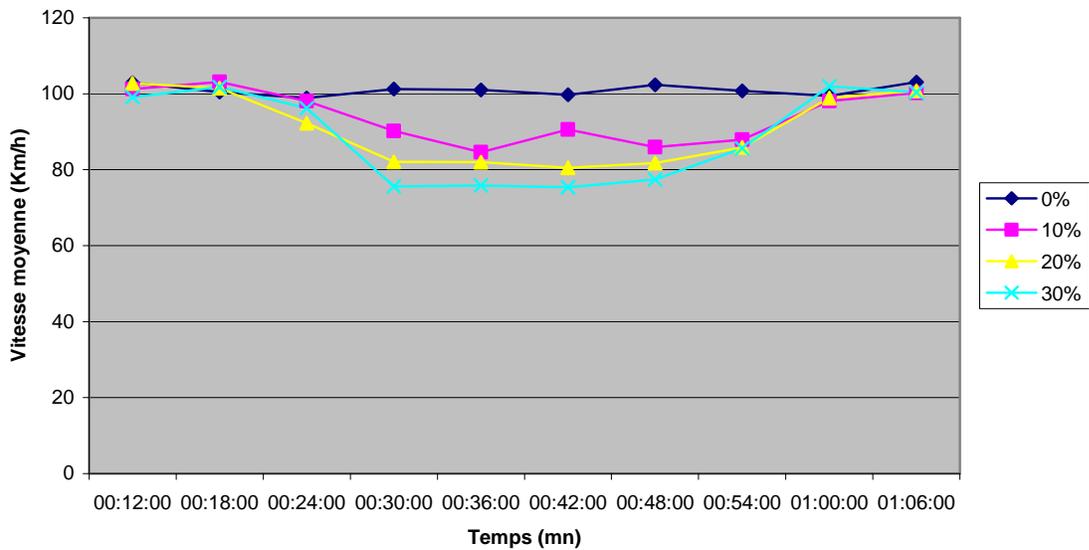


Figure n°VIII.2 - Vitesse moyenne du flot, 650m en a mont de l'incident (2550 veh/h)

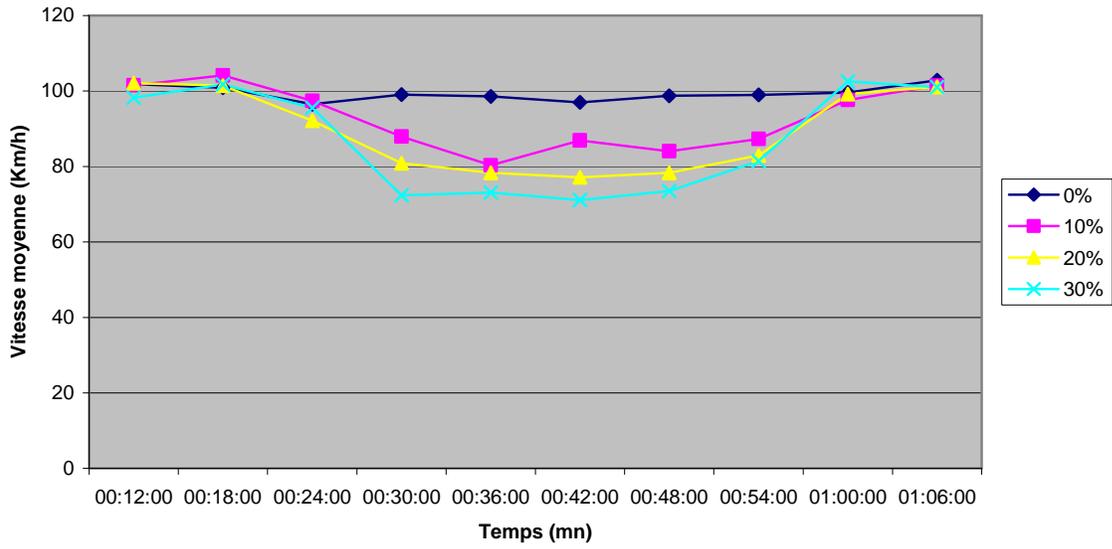
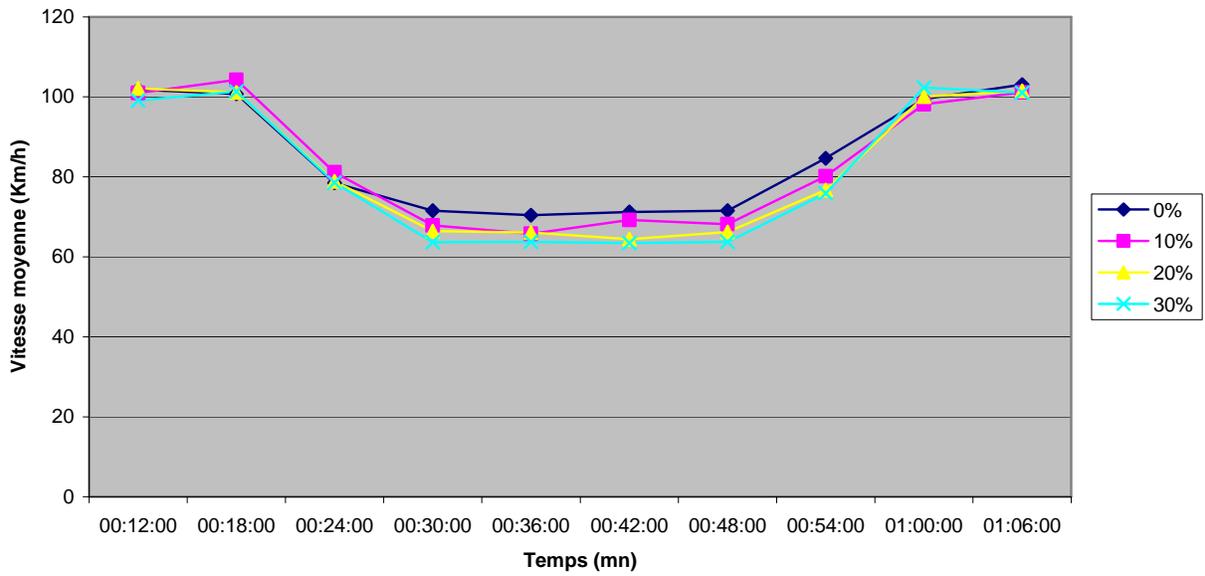


Figure n°VIII.3 - Vitesse moyenne du flot, 300m en a mont de l'incident (2550 veh/h)



VIII.2.6. Observations

On observe un effet notable du taux d'équipement des véhicules sur la distribution de la vitesse moyenne de 1000m jusqu'à 300m en amont de l'incident. Dans le cas de référence (avant l'introduction du système AIDA), la vitesse moyenne du flot est relativement constante (écart type de 1,3 km/h) tandis que dans les situations correspondantes aux taux d'équipement 10%, 20% et 30%, la vitesse moyenne de la flotte mixte (équipés et non équipés) diminue sur les sections comprises entre 1000m et 300m avant l'incident.

Sur la dernière section (300m avant la position de l'incident), il n'y a pas de différence significative des distributions de vitesses relatives aux 4 situations (0%, 10%, 20%, 30%).

VIII.2.7. Evaluation de la performance d'algorithmes de DAI par simulation

Cet exercice a consisté à évaluer, par l'outil ARCHISIM, la performance des algorithmes de Parkany et Bernstein décrits précédemment (cf. § III.6.6) avec un taux d'équipement des véhicules inférieur ou égal à 30% et pour des niveaux de trafic faibles.

VIII.2.7.1. Recueil de données

Un extrait d'un fichier résultat pour les balises 2 et 4 avec un niveau de trafic de 3000 véh/h et un taux d'équipement de 20%.

NumVh	LongVh(dm)	VoieVh(dm)	VitVh(km/h)	VitDesirVh(km/h)	DateCreation	DatePassage	temps de présence	Tiv(s)
0	40	85	125,28	125,28	00:00:01:50	00:01:27:89	87	
4	43	51	129,95	129,96	00:00:07:19	00:01:31:99	91	9
2	50	85	121,69	123,48	00:00:04:39	00:01:33:09	93	8
3	50	51	125,27	125,28	00:00:05:79	00:01:33:19	93	1
5	43	17	128,87	128,88	00:00:08:79	00:01:34:59	94	2
6	43	17	128,83	132,48	00:00:10:30	00:01:36:79	96	1
7	40	85	120,23	120,24	00:00:11:90	00:01:41:89	101	9
8	50	51	119,51	119,52	00:00:13:50	00:01:44:59	104	1
12	50	17	126,71	126,72	00:00:18:90	00:01:45:29	105	0
1	160	85	105,12	105,12	00:00:02:99	00:01:45:89	105	3
10	43	18	126,83	127,8	00:00:16:10	00:01:47:19	107	1

Tableau n°VIII.4 - Fichier capteur N° 2 Route A1 pk(m) 4000 sens (3000 véh/h)

NumVh	LongVh(dm)	VoieVh(dm)	VitVh(km/h)	VitDesirVh(km/h)	DateCreation	DatePassage	temps de présence	Tiv(s)
4	43	85	129,95	129,96	00:00:07:19	00:02:50:70	170	
6	43	51	129,99	132,48	00:00:10:30	00:02:56:10	176	10
5	43	85	128,87	128,88	00:00:08:79	00:02:57:40	177	12
0	40	85	125,27	125,28	00:00:01:50	00:03:05:19	185	18
3	50	85	125,27	125,28	00:00:05:79	00:03:10:49	190	2
16	50	51	129,99	131,04	00:00:24:50	00:03:12:69	192	6
10	43	51	127,79	127,8	00:00:16:10	00:03:16:19	196	6
9	43	17	129,59	129,6	00:00:14:80	00:03:17:69	197	4
2	50	85	123,47	123,48	00:00:04:39	00:03:18:19	198	2
12	50	85	123,76	126,72	00:00:18:90	00:03:19:79	199	2
24	43	51	129,95	129,96	00:00:35:50	00:03:21:99	201	1

Tableau n°VIII.5 - Fichier capteur N° 4 Route A1 pk(m) 6000 sens 1 (3000 véh/h)

A partir de ces deux fichiers, on déduit par pas de temps de 1 minute :

- Le Tiv Moyen à la balise amont
- Le Tiv Moyen à la balise aval
- Le temps de traversée des balises amont et aval.

Pas de Temps (mn)	Tiv_moyen_c2 (s)	Tiv_moyen_c4 (s)	TP_moyen_c2_c4 (s)
6	3	3	65
7	3	3	71
8	3	3	67
9	3	4	70
10	4	3	69
11	3	2	70
12	4	2	65
13	4	3	64
14	2	4	65
15	2	3	72
16	3	3	69

Tableau n°VIII.6 – Valeurs de Temps inter véhiculaire et de Temps de trajet fournies par ARCHISIM

Les données de trafic produites par l'outil ARCHISIM, permettent l'élaboration d'une base de données incluant des situations sans incident et avec incident. Après un calibrage préalable, une évaluation des algorithmes peut être effectuée grâce à cette base de données.

VIII.2.7.2. Description du scénario

L'évaluation porte sur une section d'autoroute à 3 voies de circulation ayant une longueur de 5 km. Deux balises virtuelles espacées de 1000 m sont placées au bord de l'autoroute pour recueillir les informations des véhicules équipés.

On prend en compte 4 niveaux de trafic et 3 taux d'équipements des véhicules. Le taux de PL est de 10% pour tous les scénarii de trafic. La combinaison de ces deux facteurs (trafic et taux d'équipement) présente 12 scénarii sans incident.

On utilise les paramètres suivants pour la simulation :

- Durée de simulation : 60 min,
- Durée d'incident : 20 min,
- Début d'incident : 20 min après le début de la simulation,
- Localisation d'incident : pk 5000 m,
- Intervalle de temps : 1 min.

Avec des niveaux de trafic et des taux d'équipement similaires, les différents scénarii d'incidents sont simulés sur la voie médiane. Il y a au total 24 scénarii avec incident et sans incident.

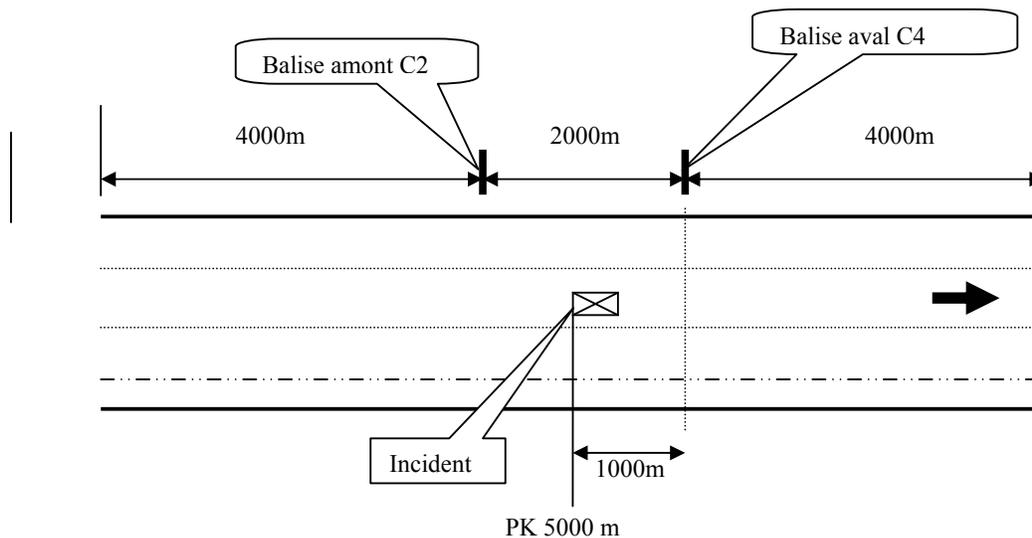


Figure n°VIII.5 - Evaluation des algorithmes de DAI sur une section d'autoroute de 1 Km

VIII.2.7.3. Observations

Des variations brusques des variables TP et TIV ne sont pas globalement observées par opposition à ce qu'on observe dans la plupart des cas avec les variables macroscopiques traditionnelles de trafic (débit, taux d'occupation et vitesse) caractérisant des situations d'incidents. La variation des temps de parcours entre deux pas de temps d'une minute ne dépasse pas généralement 7 secondes.

Pour un même taux d'équipement et une même charge de trafic sur le réseau, les TIV relevés avant et après l'incident sur les balises amont et aval ne montrent pas de différences significatives (écart de 1 à 7 %).

Le meilleur taux de détection observé est d'environ 30 %. Il est obtenu pendant des scénarii caractérisés par un trafic faible ou peu chargé (500 et 750 véh/h/voie) avec un taux d'équipement de 10 %. Ceci représente des premiers éléments de réponse compte tenu des fluctuations des TIV et d'un taux d'équipement faible.

VIII.2.8. Eléments de conclusion

L'alerte rapide se caractérise généralement par les exigences suivantes : la diffusion aux conducteurs d'un signal d'alerte dans un délai limité, la pertinence de ce message par rapport à la situation géographique des conducteurs et un signalement différencié uniquement aux conducteurs se situant à proximité de l'événement ou s'en rapprochant.

En effet, un automobiliste averti rapidement (avec un message/conseil accompagnant l'alerte pour les véhicules dotés d'un terminal de bord) pourra adapter son comportement afin d'éviter un danger.

Par cette approche en simulation, nous montrons qu'avec un échantillon réduit de véhicules équipés (de l'ordre de 10%), la mise en place d'un système d'alerte embarquée rapide s'appuyant sur une chaîne optimisée de circulation de l'information (détection – traitement – diffusion) permettrait de réduire les accidents secondaires sur autoroute. L'amélioration du niveau de sécurité présente un intérêt élevé compte tenu des conséquences lourdes que peuvent avoir des collisions en chaîne sur autoroute. Un dispositif embarqué de type AIDA peut être mieux adapté, par exemple lors de conditions météorologiques dégradées (brouillard et forte pluie), que des équipements traditionnels de signalisation statique et dynamique.

VIII.3. Analyse de données réelles

Dans cette partie, Les potentialités de signalement volontaire d'un incident par le système AIDA (le service saint Bernard) sont explorées à travers une analyse empirique de données réelles. L'approche retenue est une évaluation -a priori – dont les étapes sont décrites ci-dessous :

VIII.3.1. Définition du type de comparaison

Nous avons retenu la comparaison de type "avant - après" de deux situations : l'une avant mise en place du système AIDA et l'autre, en examinant les effets potentiels de ce dispositif.

VIII.3.2. Définition des impacts et des objectifs attendus

Type d'évaluation	Classe générique "Objectif"	Instance de classe "Objectif"	Instance de classe "Stratégie"	Tactique ou moyen
Impacts	Sécurité	Réduction du délai d'alerte en cas d'accident	Signalement au gestionnaire du réseau, d'un incident, par un ou plusieurs automobilistes	Remontée d'informations du véhicule vers le poste central d'information

Tableau n°VIII.6 - Objectifs assignés à l'évaluation des impacts d'AIDA en matière de détection et d'alerte

VIII.3.3. Choix du site de test et description

Le site de test devait répondre aux caractéristiques suivantes : une longueur suffisante pour être représentatif et une possibilité de sélectionner un nombre suffisant de clients réguliers.

Le site choisi, d'une longueur de 72,6 Km est situé entre Ponthévrard et Orléans du réseau concédé à la société COFIROUTE. C'est une section d'autoroute à 2 × 3 voies composée de cinq tronçons homogènes (compris entre deux échangeurs consécutifs) : Ponthévrard / Allainville (10 Km) ; Allainville / Allaines (28.6 Km) ; Allaines / Artenay (13.4 Km) ; Artenay / Orléans-Nord (15.3 Km) ; Orléans-Nord / Orléans-centre (5.3 Km).

La vitesse libre (à vide) sur l'autoroute est en moyenne de 130 Km/h et la capacité des voies est de 1700 véh/h/voie.

VIII.3.4. Recueil de données et hypothèses

La situation de référence correspond à celle précédant l'implantation du système AIDA. La période d'analyse choisie est l'année 1996 sur le tronçon saint Arnoult - Orléans de l'autoroute A10. L'unité géographique de base est la section d'autoroute, dans un sens donné, comprise entre deux échangeurs consécutifs et de longueur connue.

En cas d'incident, nous n'avons pas pris en compte le trafic induit ou celui détourné des autres itinéraires. Nous ne considérons que le trafic de la section étudiée dans le cas d'une absence de délestage.

A partir d'une main courante, répertoriant les accidents, élaborée par les agents d'exploitation de COFIROUTE, une base de données a été constituée. Ses attributs sont : le numéro de l'accident, le sens de déplacement (code 1 pour Paris -province et code 2 pour province -Paris), la position de l'accident, la date, le nom de la section, le moyen de signalement de l'accident (RAU, patrouilleurs de Cofiroute), l'heure de signalement de l'accident, l'heure d'arrivée des secours, l'heure de retour à la normale, le nombre de voies de la section circulée, le nombre de voies bloquées par l'incident.

Les durées des accidents sont obtenues en effectuant à chaque fois la différence entre l'heure présumée 'd'occurrence de l'accident' et l'heure de retour à la normale. Afin de tenir compte du délai de signalement, cette valeur est majorée d'une durée de 5 minutes.

Les données relatives aux débits horaires, vitesses et distances 'intervéhiculaires' sont recueillies par six stations de comptage installées sur le site de test aux Points Kilométriques : Pk 28 pour la section Ponthévrard / Allainville, Pk 38 et Pk 60 pour la section Allainville / Allaines, Pk 73 pour la section Allaines / Artenay, Pk 85 pour la section Artenay / Orléans-Nord et Pk 96 pour la section Orléans-Nord / Orléans-centre.

Chaque accident est associé au débit en amont qui lui est correspondant, pour construire une base de données ayant la structure suivante :

- Numéro de l'accident
- Type d'accident
- Sens
- PK Accident
- Nom section
- Date Accident
- Heure d'occurrence de l'accident
- Heure d'arrivée des services d'intervention
- Fin de déblaiement
- Durée
- Moyen de détection (origine de l'alerte)
- Nombre de voies de la section affectée par l'accident
- Nombre de voies bloquées par l'accident
- Capacité résiduelle suite à l'accident
- Débit en amont du point au droit de l'accident
- Le nombre de véhicules - kilomètres parcourus en 1996 pour chaque section du site de test.

VIII.3.5. Calcul des temps perdus en situation d'accidents

VIII.3.5.1. Démarche proposée

L'objectif de cette approche est de montrer que la mise en relation des données ci-dessus, contribue à améliorer l'état des connaissances des enjeux d'une diminution de la durée des accidents par un système embarqué de type AIDA et son impact sur les temps de parcours.

Tout type d'incident peut dégrader la capacité d'une autoroute en engendrant un ralentissement de la circulation et donc une perte de temps par rapport à la situation nominale sans incident.

VIII.3.5.1.1. Retard dû à un incident

Le graphique ci-dessous détaille le calcul du retard dû à un incident :

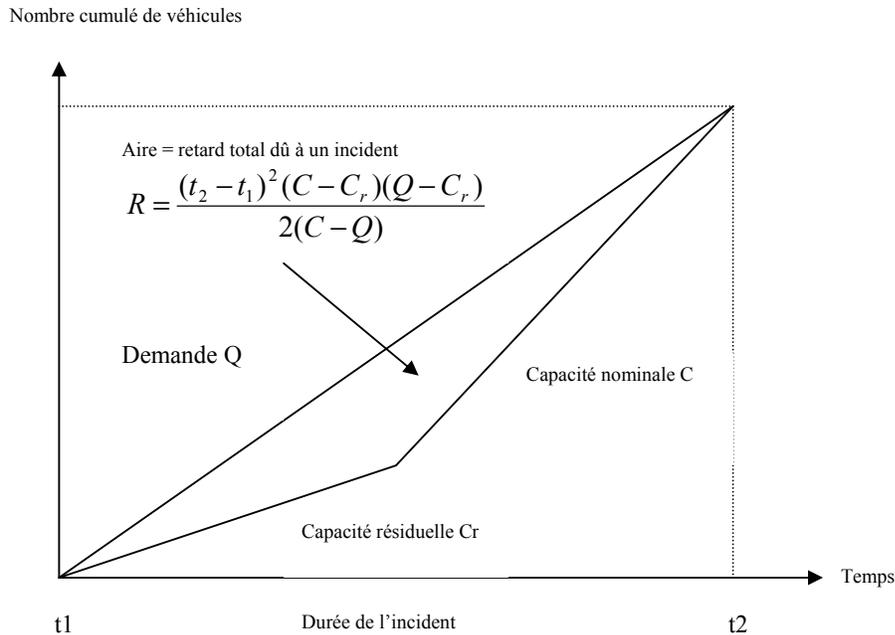


Figure n°VIII.6 – Calcul du retard dû à un incident

Nous pouvons estimer le retard total dû à un incident à partir de l'expression suivante :

$$R = \frac{(t_2 - t_1)^2 (C - C_r)(Q - C_r)}{2(C - Q)} \quad (1)$$

Où :

R est le retard ou le temps perdu (véh × h) ;

C : la capacité nominale de la section (véh/h) ;

C_r : la capacité réduite ou résiduelle au droit de l'incident (véh/h) ;

Q : le débit en amont de l'incident (véh/h) ;

t₁ : l'instant de début de l'incident ;

t₂ : l'instant de fin d'incident (déblaiement de la chaussée) ;

T = t₂ - t₁, est une durée exprimée en heures.

On constate que la capacité nominale C est le seul paramètre constant dans le temps parmi toutes les variables décrites dans la formulation (1). La capacité résiduelle Cr varie selon la nature de l'incident.

Le calcul du retard dû à un incident n'est justifié que si le débit en amont est supérieur à la capacité résiduelle déterminée en fonction du nombre de voies bloquées.

VIII.3.5.1.2. Cumul Kilométrique par classe de débit

Afin de calculer le nombre total de kilomètres parcourus par an, il faut disposer d'une base de débits horaires sur une année complète. Cette estimation est effectuée par niveau de trafic. Les débits horaires sont répartis en k classes. Les bornes de chaque classe correspondent aux valeurs des capacités résiduelles connues au préalable.

Pour chaque classe de débit i appartenant à l'ensemble $\{1,2,\dots,k\}$, on détermine le débit horaire moyen Q_i , le nombre d'heures h_i de la classe et de l'année concernées.

Le nombre total annuel de véh \times km parcourus noté KA_i sera égal à :

$$KA_i = h_i Q_i s \quad (2)$$

's' étant la longueur de la section autoroutière étudiée.

VIII.3.5.1.3. Répartition des accidents selon le nombre de voies bloquées

Le compte rendu d'exploitation d'une société concessionnaire d'autoroute donne le taux annuel d'accidents t correspondant au nombre annuel d'accidents par million de véh \times km.

Les données recueillies par une main courante permettent d'effectuer une répartition des incidents en classes j appartenant à l'ensemble $\{1,2,\dots,p\}$ en fonction du nombre de voies bloquées par l'accident.

Soit α_j la proportion d'incidents de type $[j]$ dans la répartition des incidents selon le nombre de voies bloquées.

VIII.3.5.1.4. Nombre annuel d'accidents

Nous calculons le nombre annuel d'incidents à partir des paramètres d'entrée suivants : le taux annuel d'incidents t , la répartition des accidents par type et du nombre KA_i de véh \times km parcourus par classe de débit $[i]$.

Les nombres annuels N_i d'incidents par classe de débit $[i]$ et les nombres annuels n_{ij} d'incidents de type $[j]$ et de classe de débit $[i]$ sont calculés respectivement par les expressions :

$$N_i = t \times KA_i, \text{ d'où : } n_{ij} = \alpha_j N_i \quad (3)$$

VIII.3.5.1.5. Retard par catégorie d'accidents et par niveau de trafic

Pour chaque couple constitué par une classe de débit $[i]$ et un type d'incident $[j]$, nous pouvons estimer le temps perdu R_{ij} par incident en se basant sur la formule (1) du calcul du retard citée précédemment.

Dans ce cas, le calcul s'effectue avec les données de capacité C aux conditions nominales, la valeur de capacité résiduelle C_r^j selon le nombre de voies bloquées ; soit par rapport à la classe $[j]$ d'accident considérée et le débit horaire moyen Q_i de la classe de débit $[i]$.

VIII.3.5.1.6. Extrapolation à l'année

L'extrapolation du retard à une année complète, est effectuée en multipliant Le temps moyen perdu R_{ij} (par classe de débit [i] et par catégorie [j] d'incident) par le nombre d'incidents n_{ij} .

Une valeur de durée moyenne d'incident notée d_j est affectée à chaque retard R_{ij} calculé. Ces durées moyennes d'incidents sont extraites de la main courante de l'exploitation.

Nous obtenons le retard annuel R_A en effectuant la somme sur la totalité des (classes \times catégories) :

$$R_A = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^k n_{ij} R_{ij} \quad (4)$$

VIII.3.5.2. Une application sur un tronçon autoroutier

L'approche décrite ci-dessus est appliquée aux cinq sections qui constituent le site de test équipé de balises AIDA.

La capacité aux conditions normales est de 5100 véh/h.

Les sources donnant les coefficients de réduction de la capacité nominale d'une section autoroutière sont souvent divergentes. Par conséquent, on a privilégié la pratique empirique afin de quantifier les valeurs de la capacité réduite. Le tableau suivant résume ces éléments.

Réduction de la capacité de l'autoroute A10 entre saint Arnoult et Orléans (5100 veh/h/sens)				
Nombre de voies bloquées	BU (Bande d'Urgence)	1 voie	2 voies	3 voies
Coefficient de réduction	10%	40%	80%	100%
Capacité réduite (véhicules par heure et par sens)	4590	3060	1020	0

Tableau n°VIII.7 - Valeurs de la capacité réduite selon le nombre de voies bloquées

Dans le tableau VIII.7, le coefficient de 10 %, correspondant au cas de la BU, représente d'avantage une dégradation du niveau de sécurité qu'une diminution de la capacité en elle-même.

Les valeurs de capacité résiduelle permettent de définir 4 classes de débits horaires :

[0, 1020], [1021, 3060], [3061, 4590] et [4591, ∞[.

La procédure de calcul du retard annuel est appliquée à une population de 377 accidents survenus pendant l'année 1996 sur l'axe de l'autoroute A10 saint Arnoult – Orléans. Elle est détaillée ci-dessous pour chaque section homogène constituant ce tronçon expérimental de A10.

VIII.3.5.2.1. Section saint Arnoult - Allainville

Kilométrage annuel par niveau de débit

Cette section a une longueur de 10 km. Les nombres des véh × km calculés sont résumés dans le tableau ci-après :

	1	2	3	4
Limites de classe				
Inférieure	0	1021	3061	4591
Supérieure	1020	3060	4590	/
Nombre d'heures	7037	1715	8	/
Débit horaire moyen (véh / h)	500	1551	3233	/
Véhicules × km / an (millions)	35,185	26,599	0,258	/

Tableau n° VIII.8 – Kilométrage annuel par classe de débit

Taux d'accidents

Les données du compte rendu d'exploitation de l'année 1996 indiquent un taux annuel $t = 0,012$ accidents / 10^6 véh × km.

Répartition des accidents par nombre de voies bloquées

La ventilation des incidents par type est donnée dans le tableau ci-dessous :

Nombre de voies bloquées	Proportion α_i des incidents
BU	0,63
1 voie	0,28
2 voies	0,10
Ensemble	1,00

Tableau n°VIII.9 – Répartition des accidents par type

Nombre annuel d'accidents

L'application de la formule (3) décrite précédemment permet de calculer les nombres annuels d'incident par classe de débit [i] et par type d'incident [j].

Nombre de voies bloquées	Nombre annuel d'accidents			Total
	Classe de débit [i]			
	1	2	3	
BU	0,26	0,20	0,0019	0,46
1 voie	0,12	0,09	0,0008	0,21
2 voies	0,04	0,03	0,0003	0,07
Total	0,42	0,32	0,003	0,74

Tableau n° VIII.10 – Nombre annuel d'accidents

Extrapolation à l'année

Les pertes de temps annuelles R_A sont obtenues par un calcul numérique basé sur l'expression (4) décrite précédemment.

Prenons comme exemple, le retard annuel correspondant aux accidents bloquant 2 voies et dont le débit moyen est $Q_2 = 1551$ véh/h. Nous obtiendrons :

$$R_{22} = (t_2 - t_1)^2 [(5100-1020)(1551-1020)]/2(5100-1551) = 305,22 (t_2 - t_1)^2 \quad (\text{véh} \times \text{h})$$

Et :

$$n_{22} R_{22} = 0,03 \times 305,22 (t_2 - t_1)^2 = 9,15 (t_2 - t_1)^2$$

Le tableau VIII.11 décrit tous les coefficients par type d'incidents et par classe de débit.

Types d'incidents		Classes de débit			
		1	2	3	Total
Nombre de voies bloquées	BU	0	0	0	0
	1	0	0	0,07	0,07
	2	0	9,15	0,7	9,85

Tableau n°VIII.11 – Valeurs des coefficients (en véh / h) servant pour le calcul du retard annuel

En notant (d_j) comme étant la durée moyenne d'accidents de type j exprimée en heures, La somme R_A des retards annuels est déduite par :

$$R_A = \mathbf{0,07} (d_1)^2 + \mathbf{9,85} (d_2)^2 \quad (\text{en véh} \times \text{h})$$

L'exploitation des données initiales donne les durées d_1 et d_2 pour la section examinée.

$d_1 = 1,17$ h (avec un écart type = 0,45 h)

$d_2 = 2,066$ h (avec un écart type = 0,616 h)

D'où : $R_A = 41,90$ véh \times h

VIII.3.5.2.2. Section Allainville – Allaines

Kilométrage annuel par niveau de débit

La section Allainville – Allaines est la plus longue du site de test AIDA avec 28,6 km de longueur. Les résultats de la répartition du cumul kilométrique annuel sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

	1	2	3	4
Limites de classe	0	1021	3061	4591

Inférieure Supérieure	1020	3060	4590	/
Nombre d'heures	6357	2349	54	/
Débit horaire moyen (véh / h)	515	1563	3306	/
Véhicules × km / an (millions)	93,63	105	5	/

Tableau n° VIII.12 – Kilométrage annuel par classe de débit

Taux d'accidents

Les données du compte rendu d'exploitation de l'année 1996 indiquent un taux annuel $t = 0,04$ accidents / 10^6 véh × km.

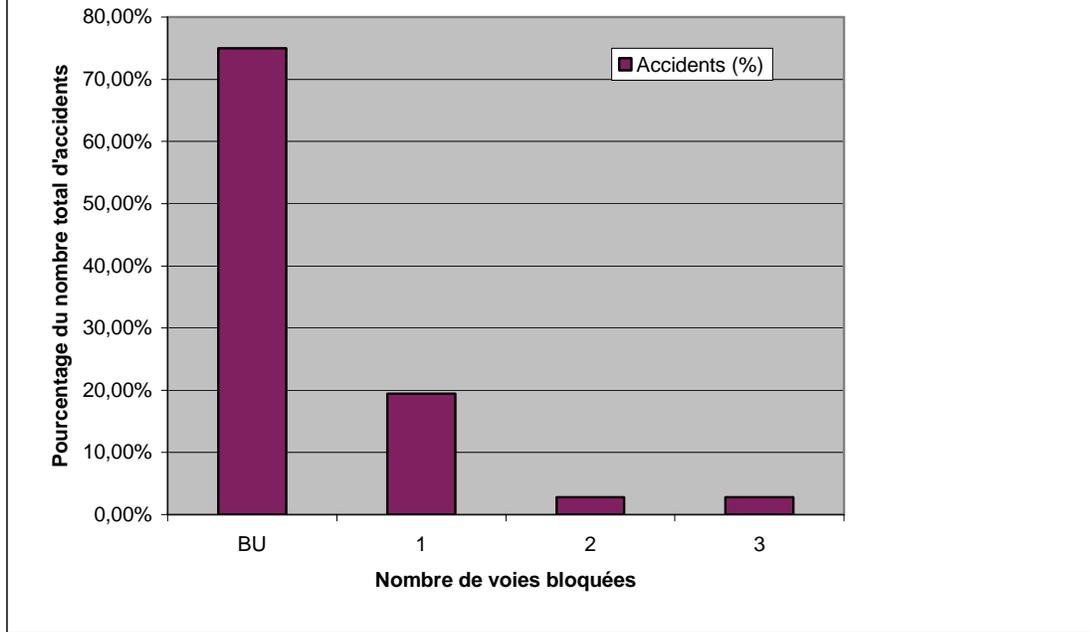
Répartition des accidents par nombre de voies bloquées

La ventilation des incidents par type est donnée dans les tableau et graphique ci-dessous :

Nombre de voies bloquées	Proportion α_i des incidents
BU	0,75
1 voie	0,19
2 voies	0,03
3 voies	0,03
Ensemble	1,00

Tableau n°VIII.12 – Répartition des accidents par type

Figure n° VIII.7 - Répartition des accidents en fonction du nombre de voies bloquées sur la section Allainville - Allaines de l'autoroute A10



Nombre annuel d'accidents

L'application de la formule (3) décrite précédemment permet de calculer le nombre annuel d'incident par classe de débit [i] et par type d'incident [j]. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-après :

Nombre de voies bloquées	Nombre annuel d'accidents			Total
	Classe de débit [i]			
	1	2	3	
BU	2,81	3,15	0,15	6,11
1 voie	0,71	0,8	0,04	1,55
2 voies	0,11	0,13	0,01	0,25
3 voies	0,11	0,13	0,01	0,25
Total	3,74	4,21	0,21	8,16

Tableau n°VIII.12 – Nombre annuel d'accidents par débit et par type d'accident

Retard total extrapolé à l'année

Les pertes de temps annuelles R_A sont obtenues par un calcul numérique basé sur l'expression (4). Pour les incidents bloquant la bande d'urgence, les coefficients servant pour le calcul du retard annuel sont nuls quel que soit le niveau de débit car dans ce cas, la capacité réduite au droit de l'accident est supérieure à la demande correspondant au débit horaire moyen.

Les résultats correspondants sont décrits dans le tableau VIII.13 :

Types d'incidents		Classes de débit			
		1	2	3	Total
Nombre de voies bloquées	BU	0	0	0	0
	1	0	0	5,59	5,59
	2	0	40,71	25,99	66,71
	3	31,51	146,49	46,99	224,99

Tableau n° VIII.13 – Valeurs des coefficients (en véh / h) servant pour l'estimation du retard annuel

Soit d_j la durée moyenne (exprimée en h) de la catégorie j d'incidents.

$$\text{On aura : } R_A = 5,59 (d_1)^2 + 66,71 (d_2)^2 + 224,99 (d_3)^2 \quad (\text{en véh} \times \text{h})$$

Les durées moyennes sur la section examinée étant :

$$d_1 = 1,5 \text{ h}$$

$$d_2 = 3,12 \text{ h}$$

$$d_3 = 2,3 \text{ h}$$

Le retard annuel dû aux accidents survenus sur la section Allainville – Allaines est égal à :

$$R_A = 1852,16 \text{ véh} \times \text{h.}$$

VIII.3.5.2.3. Section Allaines - Artenay

Kilométrage annuel par niveau de débit

Les nombres des véh × km sont préalablement calculés sur cette section faisant 13,4 km de longueur. Les résultats de la répartition du kilométrage annuel sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	1	2	3	4
Limites de classe				
Inférieure	0	1021	3061	4591
Supérieure	1020	3060	4590	/
Nombre d'heures	6607	2080	73	/
Débit horaire moyen (véh / h)	445	1563	3369	/
Véhicules × km / an (millions)	39,40	43,56	3,30	/

Tableau n° VIII.14 – Kilométrage annuel par classe de débit

Taux d'accidents

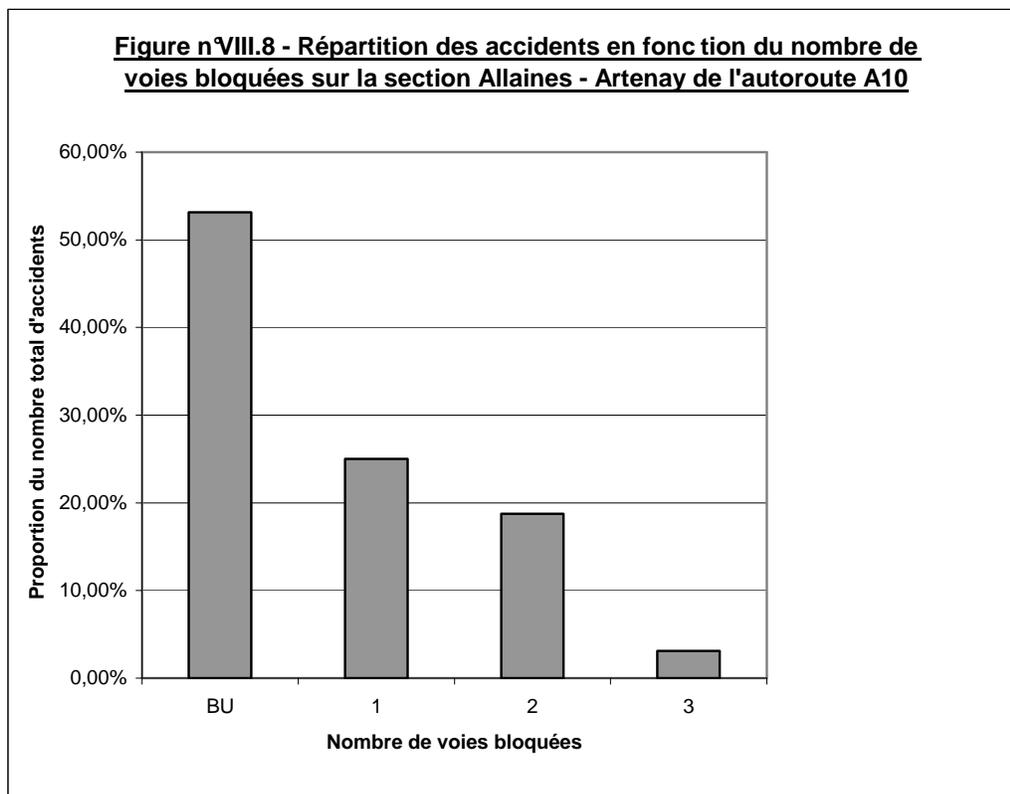
Les données du compte rendu d'exploitation de l'année 1996 indiquent un taux annuel $t = 0,02 \text{ accidents} / 10^6 \text{ véh} \times \text{km}$.

Répartition des accidents par nombre de voies bloquées

La ventilation des incidents par type est donnée dans les tableau et graphique ci-dessous :

Nombre de voies bloquées	Proportion α_i des incidents
BU	0,53
1 voie	0,25
2 voies	0,19
3 voies	0,03
Ensemble	1,00

Tableau n°VIII.15 – Répartition des accidents par type



Nombre annuel d'accidents

Les résultats sont fournis dans le tableau ci-après :

Nombre de voies bloquées	Nombre annuel d'accidents			Total
	Classe de débit [i]			
	1	2	3	
BU	0,42	0,46	0,03	0,91
1 voie	0,20	0,22	0,02	0,44
2 voies	0,15	0,17	0,01	0,33
3 voies	0,02	0,03	0,002	0,052
Total	0,79	0,88	0,062	1,732

Tableau n°VIII.16 – Nombre annuel d'accidents par classe de débit et par type d'accident

Retard total extrapolé à l'année

Les coefficients, préalables au calcul du retard annuel, sont fournis dans le tableau ci-dessous :

Types d'incidents		Classes de débit			
		1	2	3	Total
Nombre de voies bloquées	BU	0	0	0	0
	1	0	0	3,64	3,64
	2	0	53,24	27,68	80,92
	3	4,88	33,81	9,93	48,61

Tableau n°VIII.17 – Coefficients (en véh / h) servant pour le calcul du retard annuel

Les durées moyennes pour chaque catégorie d'incidents sont :

$$d_1 = 1,93 \text{ h}$$

$$d_2 = 2,53 \text{ h}$$

$$d_3 = 3,05 \text{ h}$$

On déduit que :

$$R_A = 3,64 (d_1)^2 + 80,92 (d_2)^2 + 48,61 (d_3)^2 \quad (\text{en véh} \times \text{h})$$

$$R_A = 983,71 \text{ véh} \times \text{h}$$

VIII.3.5.2.4. Section Artenay – Orléans nord

Kilométrage annuel par niveau de débit

la répartition du volume kilométrique annuel pour cette section de 15,3 km de longueur, est décrite dans le tableau ci-dessous :

	1	2	3	4
Limites de classe				
Inférieure	0	1021	3061	4591
Supérieure	1020	3060	4590	/
Nombre d'heures	5036	3479	245	/
Débit horaire moyen (véh / h)	486	1537	3568	/
Véhicules × km / an (millions)	37,45	81,81	13,37	/

Tableau n°VIII.18 – Kilométrage annuel par classe de débit

Taux d'accidents

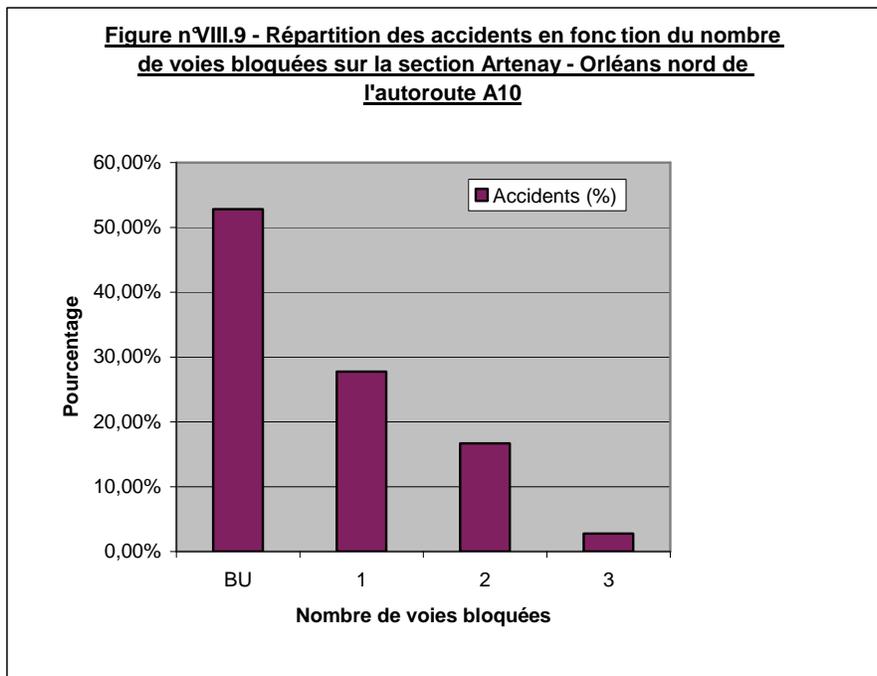
Les données du compte rendu d'exploitation de l'année 1996 indiquent un taux annuel $t = 0,03$ accidents / 10^6 véh × km.

Répartition des accidents par nombre de voies bloquées

La répartition des incidents par type est donnée dans les tableau et graphique ci-dessous :

Nombre de voies bloquées	Proportion a_i des incidents
BU	0,528
1 voie	0,278
2 voies	0,166
3 voies	0,028
Ensemble	1,00

Tableau n°VIII.19- Ventilation des accidents par type



Nombre annuel d'accidents

Les résultats sont fournis dans le tableau VIII.20 :

Nombre de voies bloquées	Nombre annuel d'accidents			Total
	Classe de débit [i]			
	1	2	3	
BU	0,59	1,29	0,20	2,08
1 voie	0,37	0,82	0,13	1,32
2 voies	0,19	0,41	0,07	0,67
3 voies	0,03	0,07	0,01	0,11
Total	1,18	2,59	0,41	4,18

Tableau n°VIII.20 – Nombre annuel d'accidents

Retard total extrapolé à l'année

Les coefficients, préalables au calcul des pertes de temps annuelles, sont présentés dans le tableau suivant :

Types d'incidents		Classes de débit			
		1	2	3	Total
Nombre de voies bloquées	BU	0	0	0	0
	1	0	0	43,97	43,97
	2	0	121,36	237,50	358,87
	3	8,06	77,00	59,39	144,45

Tableau n°VIII.21 – Coefficients (en véh / h) pour le calcul des pertes de temps annuelles

Les durées moyennes pour chaque type d'incidents sont :

$$d_1 = 1,05 \text{ h}$$

$$d_2 = 1,42 \text{ h}$$

$$d_3 = 2,13 \text{ h}$$

Donc :

$$R_A = 43,97 (d_1)^2 + 358,87 (d_2)^2 + 144,45 (d_3)^2 \quad (\text{en véh} \times \text{h})$$

$$R_A = 1427,46 \text{ véh} \times \text{h}$$

VIII.3.5.2.5. Section Orléans nord – Orléans centre

Les caractéristiques de la section Orléans nord – Orléans centre sont différentes de celles abordées précédemment. C'est un cas typique d'une traversée périurbaine de la ville d'Orléans. Sa longueur est de 5.3 Km.

Kilométrage annuel par niveau de débit

Les résultats annuels chiffrant les nombres de véhicules \times km parcourus par classe de débit sont présentés dans le tableau ci-dessous.

	1	2	3	4
Limites de classe				
Inférieure	0	1021	3061	4591
Supérieure	1020	3060	4590	/
Nombre d'heures	4250	4160	320	30
Débit horaire moyen (véh / h)	464	1603	3664	4790
Véhicules \times km / an (millions)	10,45	35,34	6,21	0,76

Tableau n°VIII.22 – Kilométrage annuel par classe de débit

Taux d'accidents

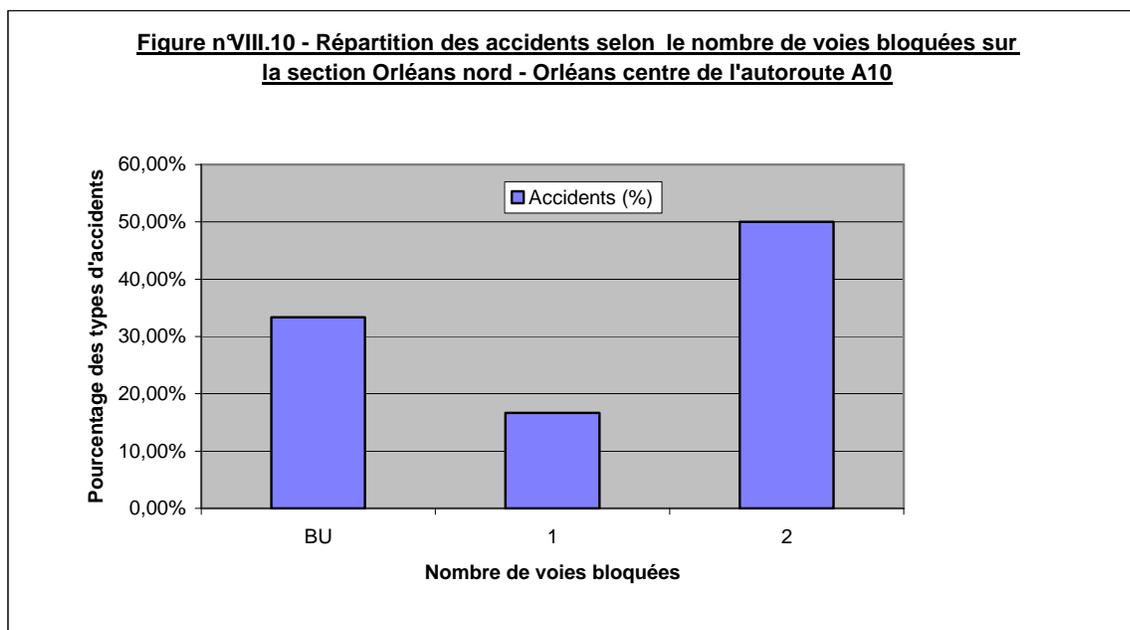
La main courante d'exploitation fournit un taux annuel équivalant à : $t = 0,01 \text{ accidents} / 10^6 \text{ véh} \times \text{km}$.

Répartition des accidents par nombre de voies bloquées

La répartition des accidents par type est donnée dans les tableau et graphique ci-dessous :

Nombre de voies bloquées	Proportion α_i des incidents
BU	0,33
1 voie	0,17
2 voies	0,5
Ensemble	1,00

Tableau n°VIII.23 – Distribution des accidents selon le nombre de voies bloquées



Nombre annuel d'accidents

Les résultats sont fournis dans le tableau ci-après :

Nombre de voies bloquées	Nombre annuel d'accidents				Total
	Classe de débit [i]				
	1	2	3	4	
BU	0,03	0,12	0,02	0,0025	0,1725
1 voie	0,02	0,06	0,01	0,001	0,091
2 voies	0,1	0,35	0,06	0,01	0,52
Total	0,15	0,53	0,09	0,0135	0,7835

Tableau n°VIII.23 – Répartition du nombre annuel d'accidents par classe de débit [i] et par type d'incidents [ij]

Extrapolation à l'année

Les pertes de temps annuelles R_A sont calculées à travers une application numérique de l'expression (3).

Pour les types d'incidents bloquant la Bande d'urgence, les retards annuels notés R_{BU} sont généralement nuls car le débit moyen Q_i est généralement inférieur à la capacité réduite C_r excepté, pour le cas de la section étudiée, du débit de classe [4].

Tous les coefficients, servant à l'estimation des retards annuels sur la section Orléans nord - Orléans centre, sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Types d'incidents		Classes de débit				Total
		1	2	3	4	
Nombre de voies bloquées	BU	0	0	0	0,41	0,41
	1	0	0	39,26	5,69	44,95
	2	0	139,44	262,93	248,09	650,46

Tableau n°VIII.24 – Coefficients (en véh / h) pour le calcul des retards annuels

Les durées moyennes pour chaque catégorie d'incidents sur la section étudiée sont :

$$d_{BU} = 0,9 \text{ h}$$

$$d_1 = 1,02 \text{ h}$$

$$d_2 = 1,38 \text{ h}$$

Ainsi :

$$R_A = 0,41 (d_{BU})^2 + 44,95 (d_1)^2 + 650,46 (d_2)^2$$

$$R_A = 1285,83 \text{ véh} \times \text{h.}$$

Le retard annuel sur le site étudié est égal à la somme des valeurs calculées pour chacune des sections. L'application numérique donne environ 5591 véh × h (cf. tableau n°VIII.25).

Section	Pertes de temps annuelles (véh × h)
Saint Arnoult / Allainville	41,90
Allainville / Allaines	1852,16
Allaines / Artenay	983,71
Artenay / Orléans nord	1427,46
Orléans nord / Orléans centre	1285,83
Total	5591,06

Tableau n°VIII.25 – Total des pertes de temps annuelles sur le site de l'autoroute A10 saint Arnoult – Orléans (en véh × h)

La perte de temps annuelle correspondante à un accident équivaut au ratio du retard global par le nombre total des accidents (377 accidents relevés pendant l'année 1996). Ceci donne une valeur numérique de l'ordre de 15 véh × h perdues par accident.

La valorisation du retard annuel total sera effectuée dans le chapitre intitulé « éléments d'évaluation socio- économique ».

VIII.3.6. Délai d'alerte

VIII.3.6.1. Description de l'existant

Sur le site autoroutier étudié, les moyens de détection d'incidents sont de deux types :

- les postes d'appel d'urgence implantés en moyenne tous les deux Km pour chaque sens et qui sont reliés aux pelotons de gendarmerie ;
- les patrouilleurs de l'exploitant qui effectuent des rondes de surveillance du réseau.

Dans le premier cas, l'appel d'un témoin de l'incident est acheminé au peloton de gendarmerie soit par le réseau d'appel d'urgence, soit par le réseau de téléphonie cellulaire. Les gendarmes transmettent l'alerte au centre d'exploitation concerné par l'événement. A son tour, ce dernier informe le poste central d'information qui est chargé de diffuser l'information aux usagers à travers la radio et des panneaux à messages variables.

Le fonctionnement actuel de l'alerte en cas d'incidents est décrit dans la figure ci-dessous :

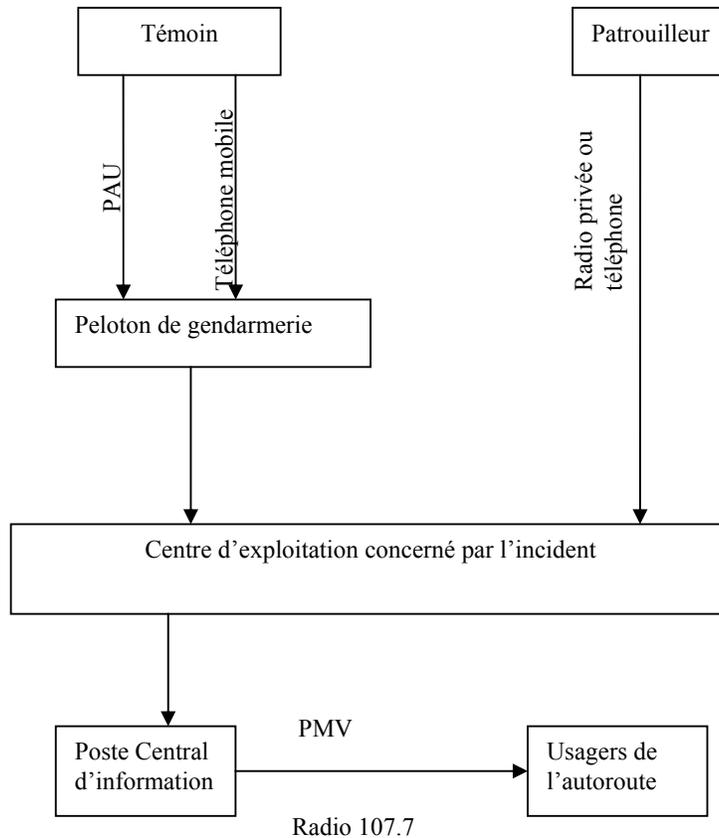


Figure n° VIII.11 – Principe actuel de remontée d’alerte pour l’exploitant de la section saint Arnould – Orléans de l’autoroute A10

Une perturbation due à un incident est constituée par une suite chronologique d’intervalles de temps :

- Le temps de détection T_1 , correspondant à l’intervalle entre le moment où se produit l’incident et l’instant où celui ci est signalé à l’exploitant ;
- Le temps de réponse (transmission, traitement et diagnostic) T_2 qui est le temps écoulé entre le signalement à l’exploitant et l’arrivée des services d’intervention sur les lieux de l’incident ;
- Le temps d’intervention T_3 nécessaire au déblaiement de la chaussée ;
- Le temps de retour à la normale T_4 qui représente le temps de rétablissement des conditions de circulation à leur état normal d’avant l’incident ou à celui qui prévaudrait normalement s’il n’y avait pas eu d’incident (cf. section III.6.4).

Sur les années 2001 et 2002, le temps moyen de détection T_1 des incidents survenus sur le réseau COFIROUTE est de l’ordre de 4 minutes. Cette valeur nous servira de référence pour estimer la contribution du système AIDA à la réduction de ce délai d’alerte.

VIII.3.6.2. Apport du système AIDA au délai d'alerte

Le service saint Bernard du système AIDA permet au conducteur équipé de signaler, en tant que témoin, un incident au centre d'exploitation et au poste central. La diffusion de l'information s'effectuera en amont de l'incident soit par des moyens classiques tels que la radio et les PMV pour les véhicules non équipés d'un dispositif embarqué ; soit à travers le système AIDA pour les conducteurs possédant cet équipement.

Dans le cas d'un déploiement du système AIDA, le schéma suivant illustre la remontée de l'alerte en cas d'incidents.

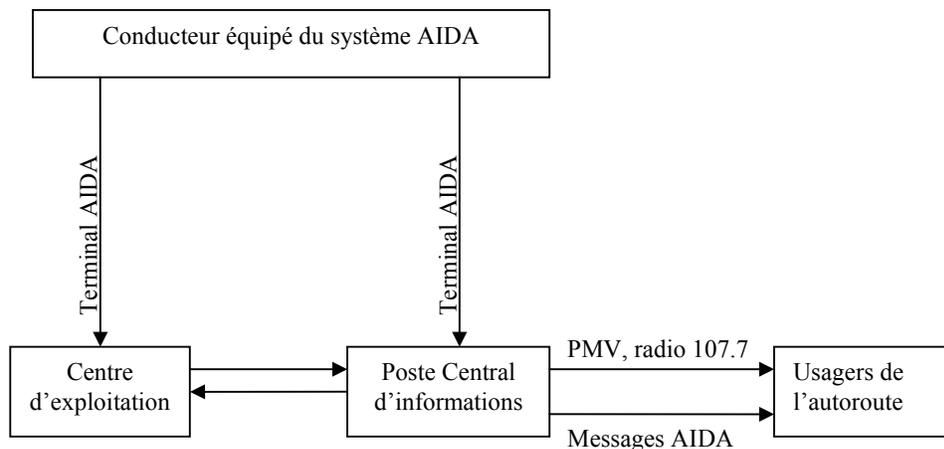


Figure n° VIII.12 – Fonctionnement de l'alerte avec l'utilisation du système AIDA

En supposant que l'organisation de la chaîne de gestion d'incidents reste constante, le déploiement du système AIDA n'aura aucun impact sur les temps de réponse T_2 et d'intervention T_3 . En revanche, l'apport de ce dispositif embarqué portera essentiellement sur la réduction potentielle du temps de détection T_1 correspondant à l'intervalle entre le moment où se produit l'incident et l'instant où celui-ci est signalé à l'exploitant autoroutier.

Le temps de détection d'un incident par le système AIDA dépend de trois paramètres : le débit des véhicules circulant sur la section concernée, le taux de pénétration du système AIDA et la proportion des conducteurs équipés de ce dispositif à vouloir signaler un incident.

En supposant une distribution exponentielle des TIV et en absence de fausses alarmes, le temps de détection T_{di} par le dispositif AIDA est exprimé en minutes par la formule suivante :

$$T_{di} = 1/\alpha\beta q \quad (5) ; \text{ à condition que : } T_{di} = \mathbf{Min} (T_{dr} ; 1/\alpha\beta q)$$

Où :

T_{dr} : Temps de détection en minutes (en moyenne égal à 4 min) pendant la situation de référence (avant le déploiement du système AIDA)

α : taux d'équipement des véhicules par le système AIDA durant la période d'occurrence de l'incident (sans dimension)

β : Proportion des conducteurs équipés du dispositif ayant la démarche active de prévenir l'exploitant (sans dimension)

q : débit moyen par sens de circulation (en véh / h)

Nous pouvons déduire de l'expression (5) ci-dessus que le temps de détection T_{di} par le système AIDA est équivalent au TIV moyen (Temps Inter Véhiculaire) entre deux véhicules équipés dont les conducteurs signalent un incident au gestionnaire d'infrastructures (Klein, 2002).

Afin de quantifier la contribution du système AIDA à la réduction du délai d'alerte, nous avons examiné la variation du temps de détection d'un incident en fonction du taux de pénétration α du système AIDA et du niveau de débit.

Nous avons supposé que la demande de trafic (en termes de volume total et de distribution temporelle) reste inchangée dans les deux cas : avant et après l'introduction du système AIDA. Nous utiliserons les mêmes classes de débit que celles ayant servi au calcul des retard annuels dus aux accidents : [0,1020], [1021,3060], [3061,4590], [4591,5100] véh/ h (cf. § VIII.3.5).

En termes de comportement des conducteurs équipés, quatre hypothèses sont examinées :

- Le cas où 25 % des conducteurs équipés signalent l'incident ($\beta = 0,25$) ;
- 50 % des véhicules équipés du dispositif AIDA remontent l'incident au gestionnaire de l'infrastructure ($\beta = 0,5$) ;
- 75 % des utilisateurs de AIDA signalent l'incident ($\beta = 0,75$)
- Tous les conducteurs équipés du système AIDA font la démarche active de prévenir l'exploitant ($\beta = 1$).

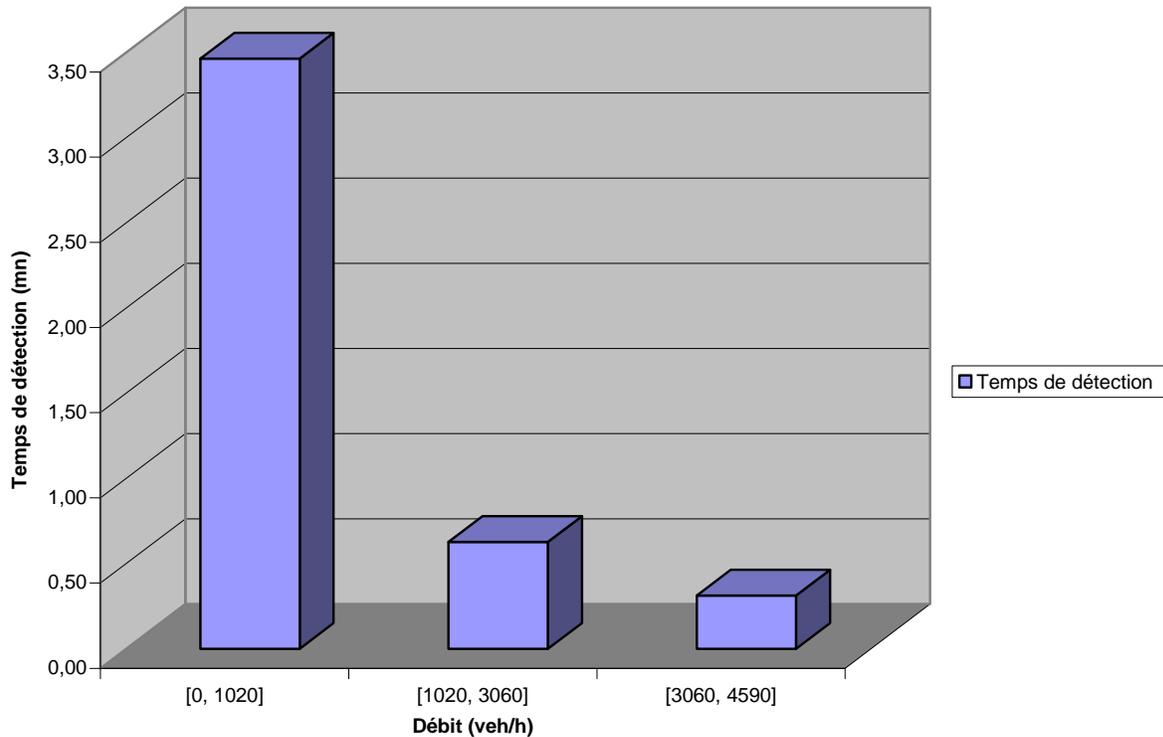
Pour chacune de ces quatre situations, le temps de détection d'un incident par AIDA est estimé par la formule (5) en fonction du taux de pénétration du dispositif embarqué et des différents niveaux de débits.

Par exemple, dans le cas où 25 % des conducteurs équipés signalent l'incident à l'exploitant ($\beta = 0,25$) et avec un taux de pénétration α équivalent à 20 %, les temps de détection moyens pour les différentes classes de débit sont égaux à :

$T_d = 3,47$ mn pour la classe $[0, 1020]$ (en véh/h)
 $T_d = 0,63$ mn pour la classe $[1021, 3060]$ (en véh/h)
 $T_d = 0,31$ mn pour la classe $[3061, 4590]$ (en véh/h)

La figure suivante illustre, pour cet exemple la distribution du temps de détection en fonction des classes de débits.

Figure n°VIII.13- Distribution des temps de détection d'un incident par le système AIDA sur la section saint-Arnoult - Allainville de l'autoroute A10 (alpha = 0,2 ; beta = 0,25)



Les temps de détection obtenus (en minutes), pour différents taux de pénétration de AIDA et pour chaque hypothèse relative au comportement des conducteurs, sont détaillées dans les tableaux ci-après.

Taux de pénétration AIDA (α)	10%	20%	30%
Classes de débit (véh/h)			
[0,1020]	4	3,47	2,31
[1021,3060]	1,26	0,63	0,42
[3061,4590]	0,63	0,31	0,21

Tableau n°VIII.26 - Temps de détection d'un incident par classe de débit sur la section saint Arnoult – Allainville de l'autoroute A10 (en minutes et pour $\beta = 0,25$)

Taux de pénétration AIDA (α)	10%	20%	30%
Classes de débit (véh/h)			
[0,1020]	3,47	1,73	1,16
[1021,3060]	0,63	0,31	0,21
[3061,4590]	0,31	0,16	0,10

Tableau n°VIII.27 - Temps de détection d'un incident par classe de débit sur la section saint Arnoult – Allainville de l'autoroute A10 (en minutes et pour $\beta = 0,5$)

Taux de pénétration AIDA (α)	10%	20%	30%
Classes de débit (véh/h)			
[0,1020]	2,31	1,16	0,77
[1021,3060]	0,42	0,21	0,14
[3061,4590]	0,21	0,10	0,07

Tableau n°VIII.28 - Temps de détection d'un incident par classe de débit sur la section saint Arnoult – Allainville de l'autoroute A10 (en minutes et pour $\beta = 0,75$)

Taux de pénétration AIDA (α)	10%	20%	30%
Classes de débit (véh/h)			
[0,1020]	1,73	0,87	0,58
[1021,3060]	0,31	0,16	0,10
[3061,4590]	0,16	0,08	0,05

Tableau n°VIII.29 - Temps de détection d'un incident par classe de débit sur la section saint Arnoult – Allainville de l'autoroute A10 (en minutes et pour $\beta = 1$)

VIII.3.6.3. Estimation des gains apportés par le système AIDA

A partir des valeurs des temps de détection T_{di} par classes de débit résumées dans les tableaux VIII.25, VIII.26 et VIII.27, nous avons calculé les gains élémentaires pouvant être générés par le déploiement du système AIDA. La formule appliquée est :

$$G_i = T_{dr} - T_{di} \quad (6)$$

Où :

G_i : gain de temps élémentaire sur le délai d'alerte en cas d'accidents (exprimé en minutes)

T_{dr} : temps de détection moyen d'un accident pendant la situation de référence (sans le système AIDA) qui est égal à 4 mn

T_{di} : temps de détection d'un accident en utilisant le système AIDA (en minutes)

Pae exemple, En reprenant le cas précédent : 25 % des conducteurs équipés signalent l'accident à l'exploitant ($\beta = 0,25$) et un taux de pénétration α équivalent à 20 %,

Pour la section Saint Arnoult-Allainville, on aura :

$T_{d1} = 3,47$ mn pour la classe $[0, 1020]$ (en véh/h) pendant 7037 heures de l'année

$T_{d2} = 0,63$ mn pour la classe $[1021, 3060]$ (en véh/h) pendant 1715 heures de l'année

$T_{d3} = 0,31$ mn pour la classe $[3061, 4590]$ (en véh/h) pendant 8 heures de l'année

Les gains de temps élémentaires sont égaux à :

$$G_1 = T_{dr} - T_{d1} = 4 - 3,47 = 0,53 \text{ mn}$$

$$G_2 = 4 - 0,63 = 3,37 \text{ mn}$$

$$G_3 = 4 - 0,31 = 3,69 \text{ mn}$$

Ainsi, le gain total pour cet exemple équivaut à :

$$G = [(0,53 \times 7037) + (3,37 \times 1715) + (3,69 \times 8)] / 8760 = 1,09 \text{ mn}$$

Les tableaux ci-dessous résument, pour chaque section du site expérimental Saint Arnoult – Orléans, les gains (en minutes) sur le temps de détection d'accidents en fonction du taux de pénétration α du système AIDA et de la proportion β des conducteurs équipés qui signalent l'accident au gestionnaire d'infrastructures.

VIII.3.6.3.1. Section saint Arnoult - Allainville

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	0,54	1,09	2,06	2,55
20	1,09	2,55	3,03	3,27
30	2,06	3,03	3,35	3,52

Tableau n°VIII.30 - Gains sur le temps de détection d'accidents pour la section Saint Arnoult – Allainville (en minutes)

Pour cette section, le retard annuel, correspondant à la situation de référence, est égal à :

$$RA = 0,07 (d_1)^2 + 9,85 (d_2)^2 = 41,90 \text{ véh} \times \text{h avec des durées d'accidents } d_1 = 1,17 \text{ h (type d'incidents bloquant 1 voie de circulation) et } d_2 = 2,06 \text{ h (type d'incidents bloquant 2 voies) (cf. § VIII.3.5.2.1).}$$

Pour la situation correspondante à l'utilisation du système AIDA, nous avons obtenu, pour chaque couple (α, β) les nouvelles durées moyennes d'accidents d_1 et d_2 en retranchant les gains annuels répertoriés dans le tableau VIII.25.

En appliquant la formule ci-dessus, nous avons estimé les valeurs des gains annuels (en véh \times h) sur les retards causés par des accidents. Elles sont décrites dans le tableau suivant :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	0,37	0,74	1,39	1,72
20	0,74	1,72	2,04	2,20
30	1,39	2,04	2,25	2,36

Tableau n°VIII.31 – Gains sur les retards annuels dus aux accidents pour la section Saint Arnoult - Allainville (en véh × h)

En raison d'une fréquence faible d'accidents et un état de trafic souvent fluide, l'apport du système AIDA ne génère pas un gain substantiel sur cette section.

VIII.3.6.3.2. Section Allainville - Allaines

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	0,76	1,31	2,21	2,66
20	1,31	2,66	3,1	3,33
30	2,21	3,10	3,4	3,55

Tableau n°VIII.32 - Gains sur le temps de détection d'accidents pour la section Allainville – Allaines (en minutes)

Les durées moyennes d'incidents étant : $d_1 = 1,5$ h ; $d_2 = 3,12$ h ; $d_3 = 2,3$ h, les gains annuels sont résumés dans ce qui suit.

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	18,47	32,01	53,66	64,43
20	32,01	64,43	75,17	80,53
30	53,66	75,17	82,31	85,88

Tableau n°VIII.33 – Gains sur les retards annuels dus aux accidents pour la section Allainville – Allaines (en véh × h)

VIII.3.6.3.3. Section Allaines - Artenay

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	0,68	1,23	2,16	2,62
20	1,23	2,62	3,08	3,31
30	2,16	3,08	3,40	3,54

Tableau n°VIII.34 - Gains sur le temps de détection d'accidents pour la section Allaines – Artenay (en minutes)

Sans l'utilisation du système AIDA, les durées moyennes de chaque type d'incidents sont :
 $d_1 = 1,93$ h ; $d_2 = 2,53$ h ; $d_3 = 3,05$ h

Les valeurs des gains de temps annuels générés par le système AIDA sont calculées ci-dessous :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	8,14	14,75	25,70	31,15
20	14,75	31,15	36,58	39,29
30	25,70	36,58	40,20	42,00

Tableau n°VIII.35 – Gains sur les retards annuels dus aux incidents pour la section Allaines – Artenay (en véh × h)

VIII.3.6.3.4. Section Artenay – Orléans nord

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	1,18	1,75	2,50	2,87
20	1,75	2,87	3,25	3,44
30	2,50	3,25	3,50	3,62

Tableau n°VIII.36 - Gains sur le temps de détection d'incidents pour la section Artenay – Orléans Nord (en minutes)

Les durées moyennes pour chaque catégorie d'incidents sont :
 $d_1 = 1,05$ h ; $d_2 = 1,42$ h ; $d_3 = 2,13$ h

Le retard annuel R_A , pour la situation de référence, est de l'ordre de $1427,46 \text{ véh} \times \text{h}$.

Les gains annuels dus à l'utilisation du système AIDA pour la détection d'incidents, sont chiffrés dans le tableau ci-après.

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	33,88	49,88	70,99	81,48
20	49,88	81,48	91,93	97,14
30	70,99	91,93	98,87	102,33

**Tableau n°VIII.37 – Gains sur les retards annuels dus aux incidents pour la section Artenay – Orléans Nord
(en véh × h)**

VIII.3.6.3.5. Orléans nord – Orléans centre

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	1,44	2,01	2,67	3
20	2,01	3	3,34	3,50
30	2,67	3,34	3,56	3,67

**Tableau n°VIII.38 - Gains sur le temps de détection d'incidents pour la section Orléans Nord – Orléans Centre
(en minutes)**

Les durées moyennes de chaque type d'incidents, pendant la période de référence, sont :
 $d_{BU} = 0,9 \text{ h}$; $d_1 = 1,02 \text{ h}$; $d_2 = 1,38 \text{ h}$

Pour cette section, les gains sur les retards annuels causés par les accidents sont égaux à :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	44,86	62,39	82,68	92,76
20	62,39	92,76	102,80	107,80
30	82,68	102,80	109,47	112,80

Tableau n°VIII.39 –Gains sur les retards annuels dus aux accidents pour la section OrléansNord–Orléans Centre (en véh × h)

Le gain de temps total correspond à la somme des gains estimés ci-dessus sur les cinq sections constituant la portion équipée du système AIDA. Les valeurs numériques sont exposées dans le tableau ci-après.

Proportion β de conducteurs signalant des accidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	105,74	159,62	234,42	271,40
20	159,62	271,40	308,52	326,79
30	234,64	308,66	333,10	345,42

Tableau n°VIII.40 –Gain total sur les retards annuels dus aux accidents pour le site saint Arnoult – Orléans de l'autoroute A10 (en véh × h)

Etant donné que la perte annuelle globale (due aux accidents) est égale à 5591 véh × h avant le déploiement du système AIDA (cf. tableau n°VIII.25) ; le gain de temps généré par l'utilisation de AIDA, en cas d'accidents, représente environ 5 à 7% en supposant que tous les conducteurs équipés fassent la démarche de prévenir l'exploitant autoroutier.

La valorisation monétaire globale, des gains de temps calculés ci-dessus, est détaillée dans le chapitre X intitulé « éléments d'évaluation socio-économique ».

VIII.3.6.3. Impact du système AIDA sur les accidents secondaires

La fonction de pré-alerte du système AIDA a été évaluée précédemment en simulation (cf. § VIII.2.8). Elle pourrait contribuer à la diminution des accidents secondaires.

L'analyse de la base d'accidents sur le réseau de Cofiroute durant les 10 dernières années (de 1993 à 2003) donne le chiffre de 5 accidents secondaires survenus pendant cette période sur la totalité du réseau.

Nous considérons ainsi que le risque d'occurrence de ce type d'accidents est faible sur autoroute excepté pour les gros événements. L'impact du système AIDA sera a priori négligeable sur la diminution de la fréquence des accidents secondaires.

Cette observation conforte les conclusions relatives à des études antérieures effectuées sur d'autres tronçons autoroutiers (Morin, 1994).

CHAPITRE IX

ELEMENTS D'EVALUATION ERGONOMIQUE DU SYSTEME AIDA

IX.1. Introduction

L'évaluation ergonomique du système AIDA ne fait pas partie du périmètre de notre recherche. Elle est décrite à titre complémentaire dans ce chapitre, d'une manière très succincte, uniquement pour montrer l'importance des résultats d'une évaluation relative à l'utilisation d'un dispositif embarqué dans le cadre d'une approche multicritère.

IX.1.1. Analyse de l'existant

Au niveau européen, des recommandations sont élaborées en vue de la conception des systèmes d'aide à la conduite à travers le guide des principes ergonomiques d'installation des systèmes d'information et le manuel HARDIE de présentation des informations réalisé dans le cadre du programme DRIVE II (Pauzié & al, 1998).

Des méthodes d'évaluation ergonomique ont fait l'objet de recherches dans le cadre de plusieurs programmes européens : GEM et DRIVE II. Leurs résultats montrent que la démarche s'effectue généralement en deux phases chronologiques : laboratoire ou site protégé afin de déceler un quelconque facteur accidentogène et ensuite en situation réelle de conduite.

Au niveau international, des standards sont en cours d'élaboration dans le cadre de l'instance de normalisation ISO (International Standard Organisation). Ils concernent la présentation des informations auditives, visuelles et les principes de dialogue.

IX.1.2. Description de l'évaluation ergonomique du système AIDA

L'évaluation ergonomique du système AIDA a été effectuée par l'INRETS / LESCO à la demande de la DSCR et de COFIROUTE. Un véhicule équipé comprenait les instruments de tests suivants :

- Cinq caméras pour enregistrer les mouvements des yeux du conducteur, la scène routière avant, le terminal AIDA, le compteur de vitesse et les mouvements des pieds sur les pédales ;
- Une table de mixage pour coupler la caméra du compteur de vitesse avec celle des pédales ;
- Un magnétoscope ;
- Un micro cravate pour enregistrer les verbalisations du sujet ;
- Un PC portable pour le recueil du temps, des points kilométriques (qui donnent la localisation du véhicule), de la vitesse, de la nature des messages spontanés qui s'affichent sur le terminal, des écrans de consultation utilisés par le conducteur, de la fréquence d'utilisation des différentes touches du clavier.

Les données enregistrées sont de type numérique liées à l'utilisation du terminal et aussi au véhicule (sa localisation sur le parcours, sa vitesse..), de type sonore recueillies sur la voie phonique du matériel vidéo (commentaires des utilisateurs, informations radio concernant les incidents..), de type vidéo à partir de caméras (informations sur le comportement des conducteurs et sur les facteurs liés au contexte). A partir de ces données, des indicateurs d'impact sont calculés tels que le temps d'utilisation des fonctions, les erreurs de manipulation du système, la distraction visuelle, le freinage ou la décélération, l'intention de changement de voie et l'intrusion dans la tâche de conduite sous forme d'une déviation de trajectoire ou d'une distance inter- véhiculaire critique.

L'expérimentation a porté sur 32 sujets, hommes et femmes de 25 à 65 ans. Les services AIDA testés sont d'une part des services de sécurité tels qu'un accident simulé et signalé sur la Bande d'Urgence (BU), des travaux et le signalement par un conducteur d'un véhicule arrêté sur la BU et d'autre part des services de confort comme la recherche et la sélection d'une station de carburant et la programmation d'une sortie d'autoroute.

IX.1.3. Résultats

En annonçant par le système AIDA, la nature et la distance à l'événement 1000 mètres avant, il s'avère que les vitesses moyennes et aussi maximales à l'approche d'incidents, diminuent. Ceci constitue un impact positif sur la réduction des accidents secondaires et de leur gravité. Par ailleurs, le système AIDA contribue à alléger la charge mentale en diminuant le stress et l'attention visuelle que nécessite la recherche d'informations à l'extérieur du véhicule.

IX.1.4. Prolongements

Une étude plus détaillée devrait être effectuée sur l'éventuelle distraction visuelle provoquée par la lecture des informations sur écran et les requêtes par clavier. La vérification pourrait porter sur la compatibilité entre la tâche de conduite et les rares fixations visuelles supérieures à 2 secondes, les quelques déviations de trajectoire n'étant pas dues à des défauts d'implantation ou de conception du système AIDA et enfin la clarification des fonctions du service "St Bernard" pour les utilisateurs afin d'éviter toute ambiguïté sur les objectifs de l'application, traduite notamment par une confusion avec un système d'appel d'urgence.

CHAPITRE X

ELEMENTS D'EVALUATION SOCIO-ECONOMIQUE

X.1. Introduction

Cette section présente une démarche d'évaluation socio économique basée sur une analyse coûts bénéfiques. Cette approche s'avère la plus adaptée dans un processus d'aide à la décision en terme d'investissement dans des systèmes visant à améliorer la sécurité des usagers et les pratiques d'exploitation routière.

Une approche de type coûts bénéfiques sera appliquée au cas du système AIDA. Nous suivrons les étapes suivantes : la détermination d'un horizon temporel, l'identification des critères et des acteurs, une quantification des coûts, une estimation des bénéfiques et enfin un calcul du ratio bénéfiques/coûts.

X.2. Horizon temporel

Un horizon temporel de 10 ans est retenu pour le calcul des coûts et des bénéfiques actualisés. Ceux-ci dépendent du taux de pénétration des dispositifs embarqués dans les véhicules et du comportement des conducteurs équipés à signaler des incidents à l'exploitant d'infrastructures.

X.3. Critères d'évaluation

Les impacts du système AIDA sont appréciés pour la collectivité.

Les principaux effets de détection des incidents par le système AIDA concernent :

- Le temps perdu
- La sécurité
- Le confort des conducteurs
- La consommation de carburant
- La pollution de l'air

X.3.1. Temps perdu

C'est le principal critère d'évaluation pris en compte dans cette analyse. Les coûts des pertes de temps annuelles en cas d'accidents et les gains apportés par l'introduction du système AIDA seront calculés.

X.3.2. Sécurité

Le seul élément pouvant être évalué est le gain de sécurité traduit par la diminution du nombre d'accidents secondaires. En raison de la faible fréquence de ce type d'accidents sur autoroute, ce critère ne sera pas retenu dans l'élaboration du bilan socio-économique.

X.3.3. Confort des conducteurs

Il n'est pas pris en compte en raison de l'absence de valeurs tutélaires adaptées pour l'évaluation du confort des conducteurs.

Les effets sur la consommation de carburant et les émissions de polluants sont négligeables en milieu périurbain (Cohen, 2000). Nous déduisons qu'ils sont encore plus faibles en milieu

interurbain. Ainsi, ces critères ne seront pas pris en compte dans le calcul des coûts et des bénéfices.

X.4. Calcul des coûts

X.4.1. Coûts du système AIDA

Les éléments constitutifs du système AIDA sont : des balises installées au dessus de chaque voie de circulation, un serveur central; des équipements de connexion (supports de transmission, modems,..) et des terminaux embarqués dans les véhicules.

Les balises AIDA sont déployées sur une section autoroutière à 2×3 voies faisant environ 80 Km de longueur. L'espace moyen est de 5 Km entre les sites de communication avec les véhicules.

Les coûts d'investissements CI_n , d'exploitation CE_n pour l'exploitant et les coûts CC_n pour un conducteur sont consolidés dans le *tableau n°X.1*.

L'année 0 est celle de la mise en service du système AIDA. Pour le calcul du bilan socio-économique, elle correspondra à l'année 2007.

Coût	Description	Détail	Année 0	Année 1	Année 2	Année n	Année 9
Coûts pour les exploitants			(Milliers Euros)			.....
Investissement (CI_n)	Equipements au sol (installation, transmission, génie civil compris)	16 sites de communication à 60 K€ l'unité	960	0	0	.....	0
	Serveur central hébergé au Poste central d'informations	Comprend les coûts du matériel, du logiciel et du développement de l'application de traitement et de diffusion des données	100	0	0	.....	0
	Total investissement		CI₀= 1060	CI₁= 0	CI₂= 0	..... .....	CI₉= 0
Exploitation (CE_n)	Maintenance	1- Maintenance des sites de communication	0	86			
		2- Maintenance du serveur central	0	12			
	Total maintenance		CE₀= 0	CE₁= 98	CE₂= 98	..... .....	CE₉= 98
Coût unitaire pour un conducteur (CC _n)	Terminaux embarqués	1 Achat	0,2	0	0	.....	0
		2. Frais de gestion	0,02	0,02	0,02	.....	0,02
	Total pour un conducteur		CC₀= 0,22	CC₁= 0,02	CC₂= 0,02	..... .....	CC₉= 0,02

Tableau n°X.1 – Coûts du système AIDA

Dans le calcul des coûts décrits ci-dessus, nous précisons que les balises sont installées sur des ponts autoroutiers existants. Ceci représente une économie conséquente comparativement à des portiques dédiés synonymes d'un investissement plus lourd. De surcroît, l'utilisation de supports de balises rabattables sur des passages supérieurs autoroutiers permet aux équipes de maintenance de réparer ou remplacer les équipements sans fermeture ni perturbation des voies de circulation. Ce facteur est fondamental dans l'optimisation des coûts de fonctionnement du système AIDA.

X.4.2. Coûts des retards annuels en situation d'accidents

Sur la base des calculs effectués au chapitre VIII intitulé « contribution aux fonctions d'alerte », les coûts des pertes de temps annuelles pour la collectivité sont estimés pour les cinq sections autoroutières constituant le site de test.

La valeur du temps tutélaire VT utilisée dans cette estimation correspond à celle recommandée par le rapport Boiteux 2 (Boiteux, 2001) et exprimée par la formule : $VT = (d/10 + 50) \times 1 / 6,56$

Pour une distance d moyenne de 100 km parcourue sur autoroute (COFIROUTE, 2003) :

$$VT = 100/10 + 50 / 6,56 = 9,15 \text{ € / passager}$$

On a appliqué à cette valeur le taux d'occupation des véhicules circulant sur le réseau autoroutier de COFIROUTE. La pondération, par rapport aux véhicules kilomètres parcourus pendant les week-ends et jours ouvrés nous donne une valeur de 2,17 passagers par véhicule particulier (COFIROUTE, 1998).

Soit une valeur du temps moyenne ramenée au 'véhicule.heure compté' de :

$$9,15 \times 2,17 = 19,86 \text{ € / veh} \times \text{heure}$$

Les résultats pour chacune des sections étudiées sont présentés dans le tableau suivant :

Section	Pertes de temps annuelles (véh × h)	Coût du retard annuel pour la collectivité (K€)
Saint Arnoult / Allainville	41,90	0,83
Allainville / Allaines	1852,16	36,78
Allaines / Artenay	983,71	19,54
Artenay / Orléans nord	1427,46	28,35
Orléans nord / Orléans centre	1285,83	25,54
Total	5591,06	111,04

Tableau n° X.2 – Total des Coûts de pertes de temps annuelles en cas d'accidents sur le tronçon Saint Arnoult – Allainville de l'autoroute A10

Le coût total des retards annuels dus aux accidents s'élève à 111 K€ sur le site expérimental saint Arnoult / Orléans de l'autoroute A10.

X.4.3. Coût total des accidents

Le rapport annuel d'exploitation du réseau COFIROUTE donne pour l'année 1996, le nombre de tués, de blessés graves et de blessés légers sur les sections examinées de l'autoroute A10 (Cofiroute, 1996) :

Section	Tués	Blessés graves	Blessés légers
Saint Arnoult / Allainville	3	5	15
Allainville / Allaines	3	14	35
Allaines / Artenay	2	7	30
Artenay / Orléans nord	1	1	18
Orléans nord / Orléans centre	1	2	9
Total	10	29	107

Tableau n°X.3. Nombre de victimes par accidents sur le site saint Arnoult – Orléans de l'autoroute A10
(Source : Cofiroute, 1996)

Les équivalents monétaires correspondants à chaque type de victime ont été calculés en utilisant les valeurs tutélaires les plus récentes (Boiteux, 2001) :

- Tués : $10 \times 1\,000\,000 \text{ €} = 10\,000\,000 \text{ €}$
- Blessés graves : $29 \times 150\,000 \text{ €} = 4\,350\,000 \text{ €}$
- Blessés légers : $107 \times 22\,000 \text{ €} = 2\,354\,000 \text{ €}$

Ainsi, le coût total de l'insécurité routière, sur le site étudié, est de 16,704 M€.

Nous constatons que les coûts des retards annuels (calculés dans le paragraphe précédent) ne représentent que 0,66 % du coût de l'insécurité routière.

X.5. Estimation des avantages

X.5.1. Gains de temps annuels apportés par le système AIDA

A partir des résultats obtenus précédemment, nous avons noté une diminution des durées moyennes d'incidents grâce à l'utilisation du système AIDA comme moyen d'alerte du gestionnaire d'infrastructures (cf. § VIII.3.6.3).

La valorisation monétaire des gains de temps annuels est effectuée pour chaque couple (α , β) d'hypothèses liées au taux de pénétration α du système AIDA et à la proportion β de conducteurs équipés qui signalent l'incident à l'exploitant autoroutier.

L'estimation des bénéfices, pour l'ensemble des sections examinées, est exposée ci après.

X.5.1.1. Section Saint Arnoult - Allainville

La valeur du temps utilisée est la même que celle ayant servi au calcul des retards annuels. Elle est égale à 19,86 € / v.h. Les résultats correspondants à la section saint Arnoult – Allainville, sont fournis dans le tableau ci-dessous.

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	0,01	0,01	0,03	0,03
20	0,01	0,03	0,04	0,04
30	0,03	0,04	0,04	0,05

Tableau n°X.4 – Valorisation monétaire des gains de temps apportés par le système AIDA en cas d’accidents sur la section saint Arnoult – Allainville (en milliers d’€)

Comme nous l’avons constaté au chapitre VIII, les bénéfices générés par l’utilisation du système AIDA, sont négligeables sur cette section.

X.5.1.2. Section Allainville – Allaines

Pour cette section, les gains monétaires liés à la diminution des durées moyennes d’incidents sont résumés dans ce qui suit :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	0,37	0,64	1,07	1,28
20	0,64	1,28	1,49	1,60
30	1,07	1,49	1,63	1,71

Tableau n°X.5 – Valorisation monétaire des gains de temps apportés par le système AIDA en cas d’accidents sur la section Allainville – Allaines (en milliers d’€)

X.5.1.3. Section Allaines - Artenay

Le tableau suivant présente la synthèse des gains monétaires correspondant à la section Allaines – Artenay.

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	0,16	0,29	0,51	0,62
20	0,29	0,62	0,73	0,78
30	0,51	0,73	0,80	0,83

Tableau n°X.6 – Valorisation monétaire des bénéfices apportés par le système AIDA en cas d’accidents sur la section Allaines – Artenay (en milliers d’€)

X.5.1.4. Section Artenay - Orléans nord

L'estimation monétaire des gains de temps annuels est décrite dans le tableau ci-dessous.

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	0,67	0,99	1,41	1,62
20	0,99	1,62	1,83	1,93
30	1,41	1,83	1,96	2,03

Tableau n°X.7 – Valorisation monétaire des bénéfices apportés par le système AIDA en cas d'accidents sur la section Artenay – Orléans nord (en milliers d'€)

X.5.1.5. Section Orléans nord - Orléans centre

Les résultats sur cette section, sont résumés dans le tableau suivant.

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	0,89	1,24	1,64	1,84
20	1,24	1,84	2,04	2,14
30	1,64	2,04	2,17	2,24

Tableau n°X.8 – Valorisation monétaire des bénéfices apportés par le système AIDA en cas d'accidents sur la section Orléans nord – Orléans centre (en milliers d'€)

Le total des bénéfices liés aux gains de temps apportés par le système AIDA sur le site expérimental saint Arnoult – Orléans est équivalent à la somme des bénéfices élémentaires calculés ci-dessus. Nous obtiendrons pour chaque couple (α , β) les valeurs suivantes :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,25	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)				
10	2,1	3,17	4,66	5,39
20	3,17	5,39	6,13	6,49
30	4,66	6,13	6,60	6,86

Tableau n°X.9 – Evaluation monétaire du gain de temps total apporté par le système AIDA en cas d'accidents sur le tronçon saint Arnoult – Orléans de l'autoroute A10 (en milliers d'€)

Ainsi, les économies générées par l'utilisation du système AIDA en cas d'accidents représentent 4 à 6,2 % du coût initial des pertes de temps annuelles sur le site étudié saint Arnoult – Orléans de l'autoroute A10 (cf. § X.4.2).

Une analyse de sensibilité plus détaillée par rapport au taux de pénétration du système AIDA et aux hypothèses de comportement des conducteurs équipés, permet de fournir les gains de temps décrits ci-dessous :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)			
2	0,73	1,49	1,87
4	1,87	2,25	2,44
6	2,26	2,68	3,92
8	2,45	3,92	4,84
10	3,17	4,66	5,39
12	3,93	5,15	5,76
14	4,46	5,50	6,02
16	4,85	5,76	6,22
18	5,16	5,96	6,37
20	5,39	6,13	6,49
22	5,61	6,26	6,59

Tableau n°X.10 – Valorisation monétaire des gains de temps en cas d'accidents sur le tronçon saint Arnoult – Orléans de l'autoroute A10 (en milliers d'€)

Entre l'hypothèse qu'un conducteur équipé sur deux signale l'accident ($\beta = 0,5$) et celle où tous les conducteurs équipés préviennent l'exploitant ($\beta = 1$), nous constatons que la variation relative des valeurs monétaires correspondantes est décroissante à partir d'un taux de pénétration AIDA de 10%. Cette variation va de 70% dans le cas où le taux $\alpha = 10$ à un ratio de 17,52 % pour un taux de pénétration du système AIDA égal à 22%.

X.5.2. Gains annuels de sécurité

Les impacts sur la sécurité peuvent être traduits par la diminution de la gravité d'un accident corporel causé par un temps d'intervention plus court. La diminution du risque d'accident secondaire étant faible sur autoroute, ce facteur ne sera pas pris en compte dans l'estimation des gains annuels de sécurité.

Concernant l'impact de la réduction d'alerte sur la gravité des victimes d'accidents, nous sommes confrontés à une difficulté d'ajustement d'une formulation liant la variation relative du nombre de tués par accident de la route à la variation relative du délai d'alerte (intervalle entre l'instant d'occurrence de l'accident et le premier appel le signalant).

Une méthode définie aux Etats Unis sur 49 états (Evanco, 1996), a permis de calibrer un modèle qui exprime le nombre prévisible de décès par accident F en fonction de plusieurs variables : Vitesse Moyenne (VM), Véhicules Kilomètres parcourus (VK), Consommation d'Alcool (CA), répartition de l'Age des Conducteurs (AC), Délai d'Alerte (DA), revenu moyen par personne (IPC).

Cette relation est exprimée par :

$$\ln(F) = a_0 + a_1 * \ln(VK) + a_2 * \ln(VM) + a_3 * \ln(CA) + a_4 * \ln(AC) + a_5 * \ln(DA) + a_6 * \ln(IPC)$$

Où : $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ sont des coefficients estimés par une régression linéaire réalisée sur les valeurs moyennes par état.

La formulation ci-dessus utilise une loi de Poisson et l'application numérique donne la variation relative $\Delta F / F$ du nombre de tués en fonction de la variation relative $\Delta DA / DA$ du délai d'alerte :

$$\Delta F / F = 0,27 * \Delta DA / DA \quad (1)$$

Où :

$\Delta F / F$ représente la variation relative du nombre des décès par accident de la route ;

$\Delta DA / DA$ est la variation relative du délai d'alerte.

Nous avons admis que cette méthode pouvait être appliquée, en première approximation, à l'évaluation des gains annuels de sécurité sur le tronçon autoroutier considéré.

De même que pour les gains de temps, nous procéderons à la valorisation monétaire des gains de sécurité procurés par la réduction du délai d'alerte.

Les résultats obtenus, en fonction des différentes combinaisons du taux de pénétration α et des hypothèses β de comportement des conducteurs équipés, sont exposés ci-après pour chaque section du site saint Arnould – Orléans.

L'analyse est effectuée pour α variant de 2 à 22 % et pour β prenant trois valeurs : 0,5 ; 0,75 et 1.

X.5.2.1. Section Saint Arnoult - Allainville

Pour cette section, Les réductions sur le délai d’alerte en cas d’accidents sont résumées dans le tableau suivant :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)			
2	0,17	0,38	0,48
4	0,48	0,58	0,63
6	0,58	0,77	1,58
8	0,63	1,58	2,18
10	1,09	2,06	2,55
12	1,58	2,38	2,79
14	1,92	2,62	2,96
16	2,18	2,79	3,09
18	2,38	2,92	3,19
20	2,55	3,03	3,27
22	2,68	3,12	3,34

Tableau n°X.11 – Valeurs de la réduction d’alerte en cas d’accidents sur la section saint Arnoult – Allainville (en minutes)

On aura, par exemple, pour un taux d’équipement de 12 % et si un conducteur équipé sur deux signale l’accident ($\beta = 0,5$), une variation du délai d’alerte égale à 1,58 minutes.

En appliquant la formule (1) ci-dessus, on obtient :

$$\Delta DA / DA = (- 1,58) / 4 = - 0,4$$

(DA étant le délai moyen d’alerte pendant la situation de référence de l’ordre de 4 minutes)

$$D'où : \Delta F / F = 0,27 * (-0,4) = - 0,106$$

Le coût annuel des accidents étant égal à 4,08 M€ sur la section d’autoroute étudiée pendant la situation de référence, la variation de ce coût annuel est équivalente au produit :

$$4,08 \text{ M€} \times (-0,106) = - 435,13 \text{ K€}$$

Pour ce cas, le gain de sécurité représente 435,13 K€ par rapport à la situation de référence (avant le déploiement du système AIDA).

L'intégralité des calculs correspondants à cette section est donnée ci-dessous :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)			
2	46,82	104,65	132,19
4	132,19	159,73	173,50
6	159,73	212,06	435,13
8	173,50	435,13	600,37
10	300,19	567,32	702,27
12	435,13	655,45	768,37
14	528,77	721,55	815,18
16	600,37	768,37	850,99
18	655,45	804,17	878,53
20	702,27	834,46	900,56
22	738,07	859,25	919,84

Tableau n°X.11 – Valorisation monétaire des gains annuels de sécurité sur la section saint Arnoult – Allainville (en Milliers d'€)

X.5.2.2. Section Allainville - Allaines

Par une approche similaire à celle décrite précédemment, les gains annuels de sécurité pour cette section, sont décrits dans le tableau suivant :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)			
2	99,06	210,00	265,47
4	265,47	320,94	348,68
6	320,94	404,15	697,36
8	348,68	697,36	919,24
10	519,05	875,66	1053,96
12	697,36	994,52	1141,13
14	824,15	1077,73	1204,52
16	919,24	1141,13	1252,07
18	994,52	1192,64	1287,73
20	1053,96	1228,30	1319,43
22	1101,51	1263,96	1343,20

Tableau n°X.12 – Valorisation monétaire des gains annuels de sécurité sur la section Allainville - Allaines (en Milliers d'€)

Nous constatons qu'à partir de 20% de taux de pénétration du système AIDA et quelle que soit la proportion de conducteurs équipés signalant l'accident, le gain obtenu équivaut au coût d'une vie humaine selon la valeur tutélaire la plus récente (de l'ordre de 1 M€).

X.5.2.3. Section Allaines - Arténay

Pour cette section, nous obtenons les résultats suivants :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)			
2	57,60	120,20	150,26
4	150,26	182,81	197,84
6	182,81	232,90	423,22
8	197,84	423,22	568,46
10	308,02	540,92	656,11
12	423,22	616,05	713,71
14	505,86	671,14	753,78
16	568,46	713,71	786,33
18	616,05	746,27	808,87
20	656,11	771,31	828,91
22	686,16	791,34	843,93

Tableau n°X.13 – Valorisation monétaire des gains annuels de sécurité sur la section Allaines - Arténay (en Milliers d'€)

X.5.2.4. Section Arténay – Orléans nord

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)			
2	42,79	87,66	110,62
4	110,62	132,53	144,01
6	132,53	156,53	221,23
8	144,01	221,23	270,28
10	182,62	260,89	299,50
12	221,23	286,98	319,33
14	249,41	305,76	333,94
16	270,28	319,33	344,37
18	286,98	330,81	351,68
20	299,50	339,15	358,98
22	310,98	346,46	364,20

Tableau n°X.14 – Valorisation monétaire des gains annuels de sécurité sur la section Arténay – Orléans nord (en Milliers d'€)

X.5.2.5. Section Orléans nord – Orléans centre

Avant l'utilisation du système AIDA, le coût annuel des accidents, sur cette section de 5 Km, est estimé à 1,5 M€. Les économies générées par la réduction d'alerte en cas d'accidents sont exposées ci-dessous.

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)			
2	51,57	104,15	129,43
4	129,43	155,72	168,86
6	155,72	181,00	236,61
8	168,86	236,61	278,07
10	203,24	269,98	303,35
12	236,61	292,22	320,53
14	260,88	308,40	332,67
16	278,07	320,53	341,77
18	292,22	329,63	348,85
20	303,35	337,72	353,90
22	312,45	343,79	358,96

Tableau n°X.15 – Valorisation monétaire des gains annuels de sécurité sur la section Orléans nord – Orléans centre (en Milliers d'€)

Nous constatons que les gains annuels de sécurité sur cette section sont du même ordre de grandeur que ceux estimés pour la section Artenay – Orléans nord sachant que la longueur de celle-ci représente trois fois celle de la section étudiée.

X.5.2.6. Agrégation des gains de sécurité

Les gains annuels de sécurité correspondants à la totalité du site étudié sont égaux à la somme des valeurs calculées ci-dessus pour chacune des cinq sections précédentes.

L'estimation totale est fournie dans le tableau suivant :

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)			
2	0,30	0,63	0,79
4	0,79	0,95	1,03
6	0,95	1,19	2,01
8	1,03	2,01	2,64
10	1,51	2,51	3,02
12	2,01	2,85	3,26
14	2,37	3,08	3,44
16	2,64	3,26	3,58
18	2,85	3,40	3,68
20	3,02	3,51	3,76
22	3,15	3,60	3,83

Tableau n°X.16 – Total des gains annuels de sécurité sur le site Saint Arnoult – Orléans (en Millions d'€)

X.5.3. Estimation totale des gains

Le total des avantages procurés par le système AIDA se décomposent en gains de temps et en gains de sécurité. Pour chaque scénario étudié, nous obtenons les valeurs ci-après.

Proportion β de conducteurs équipés signalant les incidents	0,5	0,75	1
Taux de pénétration α (%)			
2	0,30	0,63	0,79
4	0,79	0,95	1,04
6	0,95	1,19	2,02
8	1,04	2,02	2,64
10	1,52	2,52	3,02
12	2,02	2,85	3,27
14	2,37	3,09	3,45
16	2,64	3,27	3,58
18	2,85	3,41	3,68
20	3,02	3,52	3,77
22	3,15	3,61	3,84

Tableau n°X.17 – Total des gains apportés par le système AIDA sur le site Saint Arnoult – Orléans (en Millions d'€)

X.6. Evaluation économique :

Pour juger de l'intérêt économique du déploiement du système AIDA, il faut prendre en compte d'une part les coûts d'investissement et d'exploitation du projet et d'autre part les avantages économiques qui en découlent et qui sont pour l'essentiel les gains de temps et de sécurité calculés précédemment. Les effets sur les émissions de polluants et la consommation de carburant nous paraissent secondaires par leur importance. Par conséquent, les gains correspondants ne sont pas pris en compte dans la présente analyse.

Nous proposons d'effectuer, dans ce paragraphe, une évaluation économique qui mesure les coûts et les bénéfices du projet pour la collectivité sans préjuger de la manière dont ces coûts et avantages seront distribués entre les gestionnaires d'infrastructures, les constructeurs automobiles, les équipementiers et les conducteurs puisque tous ces agents économiques appartiennent à la collectivité.

X.6.1. Hypothèses

Les hypothèses établies pour l'évaluation économique des impacts du système AIDA, sont détaillées ci-dessous :

Date du lancement du projet	2004
Durée de la construction en années	3
Date d'ouverture	2007
Horizon temporel	2017
Nombre total de véhicules pouvant être équipés de AIDA	400000
Proportion des véhicules équipés du système AIDA en 2007	2 % (8000 véh)
Proportion des véhicules équipés du système AIDA en 2017	22 % (88000 véh)
Longueur du projet (en Km)	80
Espacement entre balises AIDA (en Km)	5
Coût d'investissement exploitant au kilomètre (en K€ HT)	13,26
Coût d'exploitation pour l'exploitant au kilomètre (en K€ HT)	1,24
Coût d'investissement par conducteur (en K€ HT)	0,15
Coût d'exploitation par conducteur (en K€ HT)	0,02
Taux d'actualisation	8%

Nous supposons que le projet démarre en 2004, une construction qui s'étale sur trois années avec une mise en service prévue pour 2007. Le parc de véhicules susceptibles d'être équipés du dispositif AIDA sont ceux qui empruntent le réseau Cofiroute au moins une fois par mois. Il s'élève à 400 000 véhicules. Le coût d'investissement pour un conducteur correspond à l'acquisition de l'équipement embarqué (de l'ordre de 150 €) et le coût d'exploitation représente une redevance annuelle pour les services complémentaires basés sur le même dispositif embarqué tels que le télépéage.

Pour l'analyse économique, le taux de rentabilité interne (TRI) du projet et sa valeur actualisée nette (VAN) à l'année de début des travaux ont été calculés avec le taux d'actualisation du plan égal à 8%.

X.6.2. Résultats

Les scénarii ont été construits à partir des hypothèses de coûts des équipements décrits ci-dessus. Les principaux paramètres utilisés pour les tests de sensibilité sont : le taux d'équipement des véhicules par le système AIDA, la proportion des conducteurs équipés du dispositif qui signalent les accidents à l'exploitant autoroutier et le montant des bénéfices pour la collectivité.

Nous obtenons, pour chaque scénario, les valeurs suivantes de Taux de Rentabilité Interne et de Valeur Actuelle Nette du projet.

X.6.2.1. Scénario 1

C'est le cas où la proportion des véhicules équipés du système AIDA atteint 22% en 2017 avec une montée en charge égale à 2% par an à partir de l'année de mise en service (2007). La moitié des conducteurs équipés de AIDA signalent les accidents ($\beta = 0,5$).

Le bilan économique simplifié aura la structure détaillée ci-dessous :

Année	Coûts investissements gestionnaire d'autoroute (K€)	Coûts exploitation gestionnaire d'autoroute (K€)	Coûts investissements conducteurs (K€)	Coûts exploitation conducteurs (K€)	Bénéfices collectivité (K€)	Recette nette (K€ HT)
2004	-397,8					-397,80
2005	-397,8					-397,80
2006	-265,2					-265,20
2007	0	-98	-1200	-160	298,55	-1159,05
2008	0	-98	-1200	-320	789,84	-827,76
2009	0	-98	-1200	-480	953,99	-823,61
2010	0	-98	-1200	-640	1035,33	-902,27
2011	0	-98	-1200	-800	1516,30	-581,30
2012	0	-98	-1200	-960	2017,47	-240,13
2013	0	-98	-1200	-1120	2373,52	-44,08
2014	0	-98	-1200	-1280	2641,28	63,68
2015	0	-98	-1200	-1440	2850,38	112,78
2016	0	-98	-1200	-1600	3020,58	122,98
2017	0	-98	-1200	-1760	3154,78	97,18

Tableau n°X.18 – Bilan économique du système AIDA sur le site Saint Arnoult – Orléans de A10
(Scénario 1 : $\alpha = 22\%$, $\beta = 0,5$)

La valeur actuelle nette (VAN) est égale à la somme des bénéfices monétisés du projet diminuée de tous les coûts d'investissement et d'exploitation. L'application numérique, au taux d'actualisation du plan (8%), donne pour le scénario étudié, une VAN égale à -4,6 millions d'euros et un TRI négatif largement inférieur à 8%. Par conséquent, le déploiement du dispositif n'est pas rentable pour la collectivité.

X.6.2.2. Scénario 2

C'est la situation où 75% des conducteurs équipés préviennent le gestionnaire d'infrastructures de l'occurrence d'un accident ($\beta = 0,75$) en supposant que la proportion des véhicules équipés du système AIDA est de 2% à la mise en service en 2007 pour arriver à un ratio de 22% en 2017.

Pour ce cas, le bilan économique se présente comme suit :

Année	Coûts investissements gestionnaire d'autoroute (K€)	Coûts exploitation gestionnaire d'autoroute (K€)	Coûts investissements conducteurs (K€)	Coûts exploitation conducteurs (K€)	Bénéfices collectivité (K€)	Recette nette (K€ HT)
2004	-397,8					-397,80
2005	-397,8					-397,80
2006	-265,2					-265,20
2007	0	-98	-1200	-160	628,15	-829,45
2008	0	-98	-1200	-320	953,98	-663,62
2009	0	-98	-1200	-480	1189,31	-588,29
2010	0	-98	-1200	-640	2017,46	79,86
2011	0	-98	-1200	-800	2519,42	421,82
2012	0	-98	-1200	-960	2850,37	592,77
2013	0	-98	-1200	-1120	3090,08	672,48
2014	0	-98	-1200	-1280	3268,83	691,23
2015	0	-98	-1200	-1440	3409,48	671,88
2016	0	-98	-1200	-1600	3517,07	619,47
2017	0	-98	-1200	-1760	3611,06	553,46

**Tableau n°X.19 – Bilan économique du système AIDA sur le site Saint Arnoult – Orléans de A10
(Scénario 2 : $\alpha = 22\%$, $\beta = 0,75$)**

Pour ce scénario, Le TRI du projet est de l'ordre de 4,5 % et donc inférieur au taux d'actualisation du plan égal à 8%. La réalisation du système AIDA n'est pas justifiée dans ce cas.

X.6.2.3. Scénario 3

C'est le cas où tous les conducteurs équipés du dispositif, alertent systématiquement l'exploitant autoroutier ($\beta = 1$). Les hypothèses de pénétration de AIDA restent inchangées : 2% par an en atteignant la valeur de 22% en 2017. Les résultats obtenus sont décrits ci-après.

Année	Coûts investissements gestionnaire d'autoroute (K€)	Coûts exploitation gestionnaire d'autoroute (K€)	Coûts investissements conducteurs (K€)	Coûts exploitation conducteurs (K€)	Bénéfices collectivité (K€)	Recette nette (K€ HT)
2004	-397,8					-397,80
2005	-397,8					-397,80
2006	-265,2					-265,20
2007	0	-98	-1200	-160	789,83	-667,77
2008	0	-98	-1200	-320	1035,33	-582,27
2009	0	-98	-1200	-480	2017,46	239,86
2010	0	-98	-1200	-640	2641,26	703,66
2011	0	-98	-1200	-800	3020,58	922,98
2012	0	-98	-1200	-960	3268,83	1011,23
2013	0	-98	-1200	-1120	3446,11	1028,51
2014	0	-98	-1200	-1280	3581,75	1004,15
2015	0	-98	-1200	-1440	3682,02	944,42
2016	0	-98	-1200	-1600	3768,27	870,67
2017	0	-98	-1200	-1760	3836,72	779,12

**Tableau n°X.20 – Bilan économique du système AIDA sur le site Saint Arnoult – Orléans de A10
(Scénario 3 : $\alpha = 22\%$, $\beta = 1$)**

Les indicateurs de rentabilité sont :

- VAN économique est égale à 2,05 M€
- TRI : 18,85 % supérieur au taux d'actualisation du plan de 8%

Dans ce cas, Nous pouvons déduire que le déploiement du système AIDA est souhaitable économiquement au regard des gains collectifs procurés par son utilisation en cas d'accidents.

X.6.2.4. Scénario 4

Ce scénario correspond à une proportion de véhicules équipés du système AIDA égale à 1% à l'année d'ouverture (soit 4000 véhicules équipés en 2007). Avec une croissance annuelle de 1%, ce taux de pénétration α atteint 11% à l'issue de dix ans de fonctionnement (44000 véhicules équipés en 2017). D'autre part, nous supposons que tous les utilisateurs du système signalent les accidents au gestionnaire d'infrastructures ($\beta = 1$).

Le bilan économique de cette situation est présenté ci-dessous.

Année	Coûts investissements gestionnaire d'autoroute (K€)	Coûts exploitation gestionnaire d'autoroute (K€)	Coûts investissements conducteurs (K€)	Coûts exploitation conducteurs (K€)	Bénéfices collectivité (K€)	Recette nette (K€ HT)
2004	-397,8					-397,80
2005	-397,8					-397,80
2006	-265,2					-265,20
2007	0	-98	-600	-80	298,55	-479,05
2008	0	-98	-600	-160	789,83	-67,77
2009	0	-98	-600	-240	953,98	16,38
2010	0	-98	-600	-320	1035,33	17,73
2011	0	-98	-600	-400	1516,30	418,70
2012	0	-98	-600	-480	2017,46	839,86
2013	0	-98	-600	-560	2373,50	1115,90
2014	0	-98	-600	-640	2641,26	1303,66
2015	0	-98	-600	-720	2850,37	1432,77
2016	0	-98	-600	-800	3020,58	1522,98
2017	0	-98	-600	-880	3154,76	1577,16

Tableau n°X.21 – Bilan économique du système AIDA sur le site Saint Arnoult – Orléans de A10
(Scénario 4 : $\alpha = 11\%$, $\beta = 1$)

On obtient les résultats suivants :

- VAN égale à 2,6 M€
- TRI : 20,44 % supérieur à 8% (taux d'actualisation du plan)

Ainsi, la rentabilité du système AIDA est encore plus importante, au regard de la collectivité, que celle du scénario précédent (cf. scénario 3).

X.6.2.5. Scénario 5

Nous supposons que le taux de pénétration du système AIDA soit de 5% à la date d'ouverture (20 000 véhicules équipés en 2007) et devrait égaler la valeur de 55% après dix ans (soit 220 000 véhicules équipés en 2017).

Nous obtenons le bilan économique suivant :

Année	Coûts investissements gestionnaire d'autoroute (K€)	Coûts exploitation gestionnaire d'autoroute (K€)	Coûts investissements conducteurs (K€)	Coûts exploitation conducteurs (K€)	Bénéfices collectivité (K€)	Recette nette (K€ HT)
2004	-397,8					-397,80
2005	-397,8					-397,80
2006	-265,2					-265,20
2007	0	-98	-3000	-400	1516,30	-1981,30
2008	0	-98	-3000	-800	3020,58	-877,02
2009	0	-98	-3000	-1200	3517,07	-780,53
2010	0	-98	-3000	-1600	3768,27	-929,33
2011	0	-98	-3000	-2000	3917,96	-1179,64
2012	0	-98	-3000	-2400	4018,23	-1479,37
2013	0	-98	-3000	-2800	4088,93	-1808,67
2014	0	-98	-3000	-3200	4141,11	-2156,49
2015	0	-98	-3000	-3600	4184,22	-2513,38
2016	0	-98	-3000	-4000	4216,04	-2881,56
2017	0	-98	-3000	-4400	4248,89	-3248,71

Tableau n°X.22 – Bilan économique du système AIDA sur le site Saint Arnoult – Orléans de A10
(Scénario 5 : $\alpha = 55\%$; $\beta = 1$)

Les résultats correspondants sont :

- $TRI < 0$
- $VAN = - 12,98 \text{ M€}$

Sur la base des chiffres ci-dessus et en dépit d'une forte proportion de véhicules équipés du dispositif AIDA (220 000 véhicules en 2017), la fourniture des services AIDA sur le site saint Arnoult – Orléans sur l'autoroute A10 n'a pas d'intérêt économique pour la collectivité.

X.7. Evaluation financière :

La rentabilité financière est calculée sur la série des coûts et des avantages pour l'exploitant autoroutier pour la période d'étude (10 ans) en fonction du montant de l'investissement réalisé. La formule de calcul repose sur le taux de rentabilité interne.

Pour trois scénarii, parmi ceux décrits précédemment, nous avons estimé le TRI financier du projet et à titre indicatif sa VAN financière à l'année de début des travaux avec un taux d'actualisation de 6 % qui correspond au taux d'intérêts bancaires.

X.7.1. Hypothèses

Les hypothèses émises en vue d'effectuer l'évaluation financière du système AIDA pour l'exploitant autoroutier, sont décrites ci-dessous :

Date du lancement du projet	2004
Durée de la construction en année	3
Date d'ouverture	2007
Nombre total de véhicules pouvant être équipés de AIDA	400000
Longueur du projet (en Km)	80
Espacement entre balises (en Km)	5
Coût d'investissement exploitant au kilomètre (en K€ HT)	13,26
Coût d'exploitation pour l'exploitant au kilomètre (en K€ HT)	1,22
bénéfice exploitant par conducteur équipé (en K€ HT)	0,005
Tous les conducteurs équipés signalent les accidents	($\beta = 1$)
Taux d'actualisation	6%

Nous supposons que le projet démarre en 2004, une construction qui s'étale sur trois années avec une mise en service prévue pour 2007. Le parc de véhicules susceptibles d'être équipés du dispositif AIDA sont ceux qui empruntent le réseau Cofiroute au moins une fois par mois. Il s'élève à 400 000 véhicules. Le bénéfice de l'exploitant par conducteur représente le quart des frais de gestion acquittés par ce dernier (dans ce cas égal à 5€ par conducteur équipé).

Dans le cadre de cette analyse financière, le taux d'actualisation est de l'ordre de 6%. Il correspond au taux de financement global de l'entreprise appelé aussi coût moyen pondéré du capital.

X.7.2. Résultats

Trois scénarii sont étudiés :

- Scénario 1 : une pénétration de l'équipement AIDA de 1% par an sur dix ans de fonctionnement (44 000 véhicules équipés en 2017)
- Scénario 2 : une proportion de 2% de véhicules par an (88 000 véhicules équipés en 2017)
- Scénario 3 : Un taux d'équipement AIDA de 5% par an jusqu'à l'année 2017 (soit 220 000 véhicules équipés).

X.7.2.1. Scénario 1

Les résultats obtenus pour ce cas sont :

- TRI financier négatif (inférieur à 0%)
- VAN financière à 6 % égale à : -1,05 M€

Le bilan financier se présente comme suit :

Année	Coûts investissements gestionnaire d'autoroute (K€ HT)	Coûts exploitation gestionnaire d'autoroute (K€ HT)	Bénéfices pour l'exploitant (K€ HT)	Recette nette (K€ HT)
2004	-397,8			-397,80
2005	-397,8			-397,80
2006	-265,2			-265,20
2007	0	-98	20	-77,60
2008	0	-98	40	-57,60
2009	0	-98	60	-37,60
2010	0	-98	80	-17,60
2011	0	-98	100	2,40
2012	0	-98	120	22,40
2013	0	-98	140	42,40
2014	0	-98	160	62,40
2015	0	-98	180	82,40
2016	0	-98	200	102,40
2017	0	-98	220	122,40

Tableau n°X.23 – Bilan financier pour l'exploitant autoroutier sur le site saint Arnoult – Orléans de A10
(Scénario 1 : proportion α de véhicules équipés en 2017 égale à 11%)

Pour ce cas, nous déduisons que le projet sur le site saint Arnoult – Orléans de 80 Km de longueur, ne serait pas rentable pour l'exploitant autoroutier.

X.7.2.2. Scénario 2

Année	Coûts investissements gestionnaire d'autoroute (K€ HT)	Coûts exploitation gestionnaire d'autoroute (K€ HT)	Bénéfices pour l'exploitant (K€ HT)	Recette nette (K€ HT)
2004	-397,8			-397,80
2005	-397,8			-397,80
2006	-265,2			-265,20
2007	0	-98	40	-57,60
2008	0	-98	80	-17,60
2009	0	-98	120	22,40
2010	0	-98	160	62,40
2011	0	-98	200	102,40
2012	0	-98	240	142,40
2013	0	-98	280	182,40
2014	0	-98	320	222,40
2015	0	-98	360	262,40
2016	0	-98	400	302,40
2017	0	-98	440	342,40

Tableau n°X.24 – Bilan financier pour l'exploitant autoroutier sur le site saint Arnoult – Orléans de A10
(Scénario 2 : proportion α de véhicules équipés en 2017 égale à 22%)

On obtient les valeurs de TRI et VAN suivantes :

- TRI financier égal à 4%
- VAN = - 0,19 M€

Le TRI financier étant inférieur au taux d'actualisation de 6%, l'investissement sur le tronçon étudié ne paraît pas judicieux pour l'exploitant autoroutier.

X.7.2.2. Scénario 3

Cette situation prévoit l'équipement des véhicules par le dispositif AIDA à raison de 5% par an jusqu'à atteindre 55 % à l'année 2017 (soit 220 000 véhicules équipés).

L'analyse financière pour l'exploitant donne les résultats ci-après.

Année	Coûts investissements gestionnaire d'autoroute (K€ HT)	Coûts exploitation gestionnaire d'autoroute (K€ HT)	Bénéfices pour l'exploitant (K€ HT)	Recette nette (K€ HT)
2004	-397,8			-397,80
2005	-397,8			-397,80
2006	-265,2			-265,20
2007	0	-98	100	2,40
2008	0	-98	200	102,40
2009	0	-98	300	202,40
2010	0	-98	400	302,40
2011	0	-98	500	402,40
2012	0	-98	600	502,40
2013	0	-98	700	602,40
2014	0	-98	800	702,40
2015	0	-98	900	802,40
2016	0	-98	1000	902,40
2017	0	-98	1100	1002,40

Tableau n°X.25 – Bilan financier pour l'exploitant autoroutier sur le site saint Arnoult – Orléans de A10 (Scénario 3 : proportion α de véhicules équipés en 2017 égale à 55%)

On obtient les valeurs de TRI et VAN suivantes :

- TRI financier égal à 21%
- VAN financière au taux d'actualisation : 2,3 M€

Les indicateurs ci-dessus montrent qu'avec un taux d'équipement AIDA égal à 5% par an, le déploiement du système, à un horizon de dix ans, représente un bon retour sur investissement.

Le tableau ci-dessous résume les valeurs de TRI et de VAN économique (pour la collectivité) et financier (pour l'exploitant autoroutier) relatifs aux différents scénarii examinés dans le cadre de cette évaluation financière. Le taux α étant la proportion de véhicules munis du système AIDA à l'issue de dix années de fonctionnement.

Scénarii	Scénario 1 ($\alpha = 11\%$)	Scénario 2 ($\alpha = 22\%$)	Scénario 3 ($\alpha = 55\%$)
----------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

	(croissance 1% / an)	(croissance 2% / an)	(croissance 5% / an)
TRI économique (collectivité)	20,44 %	18,85 %	< 0 %
TRI financier (exploitant)	< 0 %	4 %	21 %
VAN économique	+ 2,6 M€	+ 2,05 M€	- 12,98 M€
VAN financière	- 1,05 M€	- 0,19 M€	+ 2,3 M€

Tableau n°X.26 – Résumé des résultats des scénarii étudiés

X.7.3. Observations

Compte tenu des indicateurs de rentabilité décrits ci-dessus, nous constatons qu'il n'y a pas une convergence entre la rentabilité financière et entre la rentabilité socio-économique du système AIDA quel que soit le scénario étudié. A partir d'un certain seuil d'équipement des véhicules par le dispositif AIDA et pour un service inchangé à l'utilisateur, la rentabilité socio-économique du projet se dégrade considérablement (*cf. scénario 3*). Néanmoins, pour l'exploitant autoroutier, le retour sur investissements n'est rentable que pour des taux élevés de pénétration du système AIDA (une moyenne de 5% par an).

X.8. Limites de l'exercice

Les limites de la méthode d'évaluation économique des bénéfices générés par les potentialités du système AIDA, se déclinent sur trois volets : les types de trafic concernés, l'incidence sur les temps de parcours et l'impact sur la sécurité.

X.8.1. Types de trafic

Plusieurs types de trafic ne sont pas pris en compte dans la démarche exposée ci-dessus : le trafic dans le sens opposé de la section affectée par l'accident. Ce flux de circulation peut être ralenti à cause de 'l'effet spectacle' au droit de l'accident. La seconde catégorie est le trafic reporté de l'autoroute vers le réseau secondaire à cause de l'accident. Enfin, le dernier type pas pris en compte est le trafic circulant habituellement sur les itinéraires secondaires avec ou sans la présence d'un accident sur l'autoroute.

X.8.2. Incidence sur les temps de parcours

Comme décrit précédemment, un signalement plus rapide de l'accident à l'aide du système AIDA diminue les pertes de temps pour les flux de circulation dans les deux sens au droit de la perturbation. Le report d'une partie du trafic sur le réseau secondaire permet de diminuer la demande en amont et donc d'améliorer les potentialités d'écoulement à travers la capacité résiduelle de la section d'autoroute affectée par l'accident. Par ailleurs, le temps de trajet sur les autres itinéraires risque d'augmenter à cause de ce report.

X.8.3. Impact sur la sécurité

Les gains de sécurité estimés dans le cadre de l'analyse économique du système AIDA présentent une double incertitude : les valeurs tutélaires utilisées pour évaluer les coûts de la vie humaine et l'utilisation du modèle calibré pour les autoroutes américaines qui lie la variation relative du nombre de décès par accidents à celle du délai d'alerte.

X.9. Perspectives de développement de services basés sur la technologie DSRC

Les perspectives de développement de services basés sur le lien hyperfréquence de communication à courte portée (DSRC) impliquent plusieurs enjeux de différents types : fonctionnels, technologiques, organisationnels et économiques.

X.9.1. Enjeux fonctionnels

Plusieurs applications de télépéage sont opérationnelles à travers une bonne partie de l'Europe : France, Espagne, Italie, Portugal et Autriche. De tels systèmes peuvent être valorisés à travers des services complémentaires pour les abonnés au télépéage et de nouvelles missions d'exploitation pour les gestionnaires d'infrastructures telles que : l'alerte en amont des accidents et des incidents grâce aux badges, le recueil de temps de parcours par les véhicules équipés de badges de télépéage, la détection d'incidents par modification des temps de parcours moyens entre deux balises, et des moyens d'affectation de la demande de déplacements en vue d'obtenir des matrices O/D.

X.9.2. Enjeux technologiques

Le DSRC est un standard ouvert à plusieurs applications. Le processus de normalisation des liaisons à courte portée par la technologie DSRC est aujourd'hui stabilisé pour le télépéage ou en voie de l'être pour les applications d'information et de recueil de données trafic. Pour ces dernières, Des essais d'harmonisation de protocoles de communication se sont avérés concluants particulièrement dans le cadre du projet MARTA où l'interopérabilité entre les systèmes AIDA en France et RTA au Royaume Uni a été démontrée.

Les équipements embarqués utilisant ce media sont généralement de deux sortes : un badge simple avec des fonctions sonores (bruiteur) ou visuel (voyant lumineux) et puis un terminal embarqué en seconde monte qui est composé d'un écran et d'un ordinateur de bord.

X.9.3. Enjeux organisationnels

Le déploiement d'un système de type AIDA est conditionné par l'établissement d'un partenariat entre des gestionnaires d'infrastructures routières, des fournisseurs de terminaux embarqués et d'équipements au sol. Il n'est pas nécessaire de faire appel à des opérateurs de service d'information trafic ou encore à des opérateurs de réseaux de télécommunications.

Ces systèmes sont en mesure de remplir les fonctions attendues sans pour autant utiliser directement un réseau cellulaire public ou privé.

X.9.4. Enjeux économiques

Les systèmes de télépéage peuvent être valorisés à travers le développement de services complémentaires. Chacun des éléments de base de ces systèmes est bien maîtrisé. La mise en œuvre de nouveaux services tels que l'alerte rapide ou le recueil de temps de parcours avec des composants existants, permettrait d'obtenir des applications à coût réduit. L'utilisation du lien de communication à courte portée pour d'autres services est naturellement très dépendant de la mise en œuvre du télépéage lui-même. Certaines applications potentielles du système AIDA demandent la mise en communication du badge de télépéage avec d'autres équipements à l'intérieur du véhicule.

Les services complémentaires au télépéage peuvent avoir un impact sur la durée de vie des piles et la consommation du badge. Cette contrainte peut être rapidement surmontée à travers la volonté actuelle de certains constructeurs automobiles à intégrer en première monte le badge DSRC dans les véhicules. Ceci va diminuer considérablement le coût marginal de l'équipement embarqué. De surcroît, des expérimentations récentes telles que le projet DELTA (Dsrc ELectionics implementation for Transportation and Automotive Applications) ont montré une compatibilité satisfaisante entre des services AIDA et l'application de télépéage sur le même support hyperfréquence.

Néanmoins, il apparaît difficile aujourd'hui de commercialiser à court terme le terminal AIDA tel qu'il a été décrit précédemment avec l'ensemble des fonctionnalités possibles. En revanche des fonctions telles que le recueil de données dynamiques ou l'alerte en amont des accidents à l'aide de badges de télépéage peuvent être rapidement déployés.

X.10. Recommandations

Les systèmes basés sur la technologie de communication à courte portée par essence adaptés au contexte autoroutier, devront être élargis aux axes non concédés et notamment pour un déploiement d'un service « basique » contribuant à l'alerte en cas d'accidents.

La définition d'une réglementation en termes de sécurité liée aux aspects ergonomiques de ces dispositifs est importante. Néanmoins, c'est une problématique qui touche tous les systèmes embarqués dans les véhicules.

D'autre part, le processus de normalisation des services complémentaires au télépéage par lien à courte portée est en cours de définition. La participation des organismes privés et publics concernés par le développement de telles applications est fortement souhaitée afin d'anticiper des exigences techniques en terme de transmissions disponibles, de formats de messages, de protocoles de communication, d'équipements et de moyens de traitement centralisé.

CONCLUSION GENERALE

Deux séries de conclusions peuvent être tirées. La première fournit des enseignements sur les aptitudes du système AIDA à remplir des fonctions d'exploitation routière. La seconde aborde les aspects relatifs à la rentabilité économique et financière de ce dispositif.

Les systèmes d'aide à l'exploitation routière se basent actuellement sur l'utilisation de capteurs fixes pour le recueil de données et la surveillance des réseaux d'infrastructures. Dans le domaine de la gestion de trafic, le développement des dispositifs embarqués dans les véhicules offre la possibilité de mettre en oeuvre de nouveaux modes d'exploitation de la route. Ces systèmes sont apparus grâce aux progrès des Technologies de l'Information et de la Communication. Ils tentent de répondre aux attentes permanentes d'amélioration des conditions de trafic, de sécurité et de confort des conducteurs. Nous nous sommes interrogé sur leur aptitude à réaliser, à moindre coût, des missions d'exploitation assurées jusqu'ici par des équipements classiques.

Notre travail a porté particulièrement sur l'évaluation des potentialités d'un système de communication entre les conducteurs et l'infrastructure dans le domaine de l'exploitation autoroutière. Nous nous sommes notamment intéressé à l'exploration des fonctions assurées par le système AIDA.

Dans ce contexte, la revue des diverses technologies possibles montre que la communication à courte portée (DSRC) est un support intéressant pour le déploiement d'applications utiles aux exploitants d'infrastructures et aux usagers.

Cette technologie, développée à l'origine pour répondre aux besoins de transactions financières électroniques, peut être employée pour d'autres services. Les véhicules simplement porteurs de badges de télépéage peuvent déjà constituer une source de recueil de certaines données concernant le trafic : recueil des temps de parcours et des vitesses moyennes par exemple. L'analyse de ces données ajoutées à celles qui sont recueillies de manière plus classique (par capteurs fixes, véhicules patrouilleurs, postes d'appel d'urgence,...) permet aux gestionnaires d'infrastructures autoroutières d'affiner leur connaissance du trafic de manière à répondre aux missions du Schéma Directeur d'Exploitation de la Route (SDER) : essentiellement gestion du trafic en temps réel, traitement des événements ponctuels, information des usagers.

Les systèmes embarqués établissent entre la route et le conducteur une communication bidirectionnelle capable d'assurer pour les exploitants d'infrastructures un recueil de données dynamiques en temps réel, et pour les usagers des fonctions d'alerte et d'information actualisées.

Par rapport à la problématique posée, notre recherche montre qu'un système de type AIDA affiche des potentialités certaines à remplir des missions fondamentales de gestion d'infrastructures autoroutières. Voici lesquelles :

- Le maintien de la viabilité et particulièrement le recueil de données. Un ratio régulier de véhicules équipés, compris entre 3 et 5%, serait suffisant pour recueillir avec une précision satisfaisante des temps de parcours en régime dense de trafic.

- La gestion de trafic et notamment la diffusion d'informations en temps réel. Un dispositif embarqué similaire à AIDA pourrait fournir une alerte en cas d'incidents. Les exercices de simulation par l'outil ARCHISIM ont montré qu'une proportion de 10 % de conducteurs avertis par un dispositif embarqué pourrait influencer considérablement la vitesse de l'ensemble des véhicules empruntant la section autoroutière affectée par l'incident. Ainsi, la fonction d'alerte couvrirait indirectement les conducteurs non équipés de ces nouveaux systèmes et aurait un impact positif sur la réduction des collisions en chaîne sur autoroute.

Les premiers enseignements tirés des analyses économiques et financières du système AIDA nous amènent à énoncer avec une quasi certitude le résultat suivant : en milieu autoroutier interurbain, le système AIDA n'est pas économiquement justifié au seul regard des gains de temps en cas d'accidents.

En termes de contribution à la réduction du délai d'alerte en cas d'accidents, nous avons estimé les gains de sécurité en utilisant une formulation liant la variation relative du nombre de décès par accident à celle du délai d'alerte. Ce facteur est un maillon fondamental de la chaîne de gestion d'incidents. Nous avons montré, dans le cadre du calcul a priori des bilans économiques, que le déploiement d'un tel dispositif était rentable pour la collectivité à condition de prendre en compte les gains de sécurité estimés pour le site étudié.

Les tests de sensibilité effectués dans le cadre des analyses économiques et financières ont montré que, pour des scénarii identiques, la rentabilité du système est négative pour l'exploitant autoroutier tandis qu'elle est économiquement vérifiée pour la collectivité. Il n'y a pas de convergence entre la rentabilité financière et la rentabilité socio-économique. Cela pose également une problématique de choix d'investissements et d'affectation de fonds publics. Toutefois, on gardera à l'esprit les limites de validité de ces travaux qui sont aussi autant de pistes à approfondir :

- Il persiste une double incertitude des gains de sécurité estimés qu'on utilise d'une part des valeurs tutélaires génériques et d'autre part un modèle calibré sur des autoroutes américaines et dont la transférabilité sur des infrastructures françaises mériterait une exploration plus poussée.
- La pénétration du marché et l'acceptabilité de ces systèmes demeurent encore sans réponse exhaustive aujourd'hui. Les services assurés font intervenir plusieurs acteurs, ce qui complexifie le modèle économique classique. Nul doute à ce propos que les constructeurs automobiles devraient se mobiliser pour l'intégration en première monte de ces dispositifs sur les véhicules afin de garantir un taux d'équipement optimal.

Du côté des conducteurs, le développement de tels systèmes peut poser la question de la confidentialité des données recueillies en conformité avec la loi « Informatique et Liberté ». L'étude du cas du système AIDA détaillée dans la troisième partie de cette thèse montre que l'identification réelle des véhicules équipés peut être techniquement contournée. Reste que pour être acceptables les systèmes embarqués doivent obéir à des règles de confort et de sécurité d'utilisation, donc présenter des qualités ergonomiques satisfaisantes. L'interface présente dans les véhicules devra délivrer des messages visuels et auditifs normalisés et demander une manipulation minimale, n'entamant pas la vigilance du conducteur.

Il ressort compte tenu des limites évoquées et des hypothèses d'impact émises, qu'il existe un potentiel socio-économique intéressant procuré par le système AIDA mais sans enjeu financier

pour l'exploitant autoroutier. Le gisement principal des avantages se situerait au niveau des gains de temps de parcours et de sécurité. Ces travaux mettent en exergue l'intérêt d'expérimenter le système AIDA en milieu périurbain dans un contexte de fort trafic et de perturbations importantes.

On peut s'attendre, dans le domaine de l'exploitation routière, à voir émerger des systèmes de supervision des conditions de circulation basés sur une source hybride de recueil de données : capteurs au sol traditionnels et dispositifs embarqués dans des véhicules traceurs. Ils seraient utilisés de concert pour améliorer la précision des informations recueillies et permettre une reconstitution des données manquantes.

Un champ d'investigations fondamental s'ouvre à la recherche en vue de pallier les insuffisances actuelles des différents outils de recueil de données. En raison de son caractère stratégique pour l'ensemble des fonctions de l'exploitation routière, l'utilisation conjointe de systèmes classiques et de véhicules traceurs, pourrait être une réponse adaptée aux besoins opérationnels des gestionnaires d'infrastructures afin de les aider à mieux remplir les missions qui leur sont dévolues.

BIBLIOGRAPHIE

ASFA, (1996), *Conception et évaluation des systèmes d'aide à l'exploitation routière*, Comité permanent d'exploitation, Rapport final, décembre 1996, 128 p.

Batz T., Newhouse R.(2001), *TRANSMIT – TRANSCOM'S system for managing incidents and traffic*, Proceedings of the ITS world congress of Sydney (Australia), October 2001.

Baumgartner J., Dellenback S. W.(2001), *Travel Time computation using vehicle probe tags*, Proceedings of the ITS world congress of Sydney (Australia), October 2001.

Belarbi F., Frémont G., Vernet M., (1997), *Evaluation framework of the on-board real time traffic information system : AIDA*, Proceedings of the ITS world congress of Berlin (Germany), October 1997.

Belarbi F., Vernet M., (1998), *Méthodologie d'évaluation d'un système embarqué d'information routière : étude du cas AIDA*, Recueils de communications du congrès ATEC, janvier 1998.

Belarbi F., Auberlet J. M., Espié S., (2001), *Impacts of a roadside – vehicle communication system on traffic management practises and road safety*, Proceedings of the ITS world congress of Sydney (Australia), October 2001.

Berthelot O., (1996), *Synthèse de l'évaluation CARMINAT*, Rapport DSCR / GIE CARMINAT, février 1996, 41 p.

Blosseville J.M., Cohen S., Aulard-Macler J.L.(1997), *Evaluation des bénéfices apportés par la gestion des incidents sur autoroute*, Rapport INRETS, avril 1997, 64 p.

Boiteux M., (2001), *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*, Rapport du Commissariat général du Plan, juin 2001, 323 p.

Brackstone M., Fisher G., McDonald M. (2001), *The use of probe vehicles on motorways, some empirical observations*, Proceedings of ITS world congress of Sydney (Australia), October 2001.

Campbell J L. , Kantowitz B H. , Hanowski R J., (1995), *Human factors design of in-vehicle traveller information systems*, Proceedings of ITS world congress of Yokohama (Japan), 1995, pp 1721-1726.

CERTU (1996), *Guide méthodologique, schéma directeur d'exploitation de la route, réseaux de niveau 1*, décembre 1996, 334 p.

CERTU (1997), *Télématique et sécurité routière : les dispositifs d'appel et d'alerte*, Rapport d'étude, juillet 1997, 36 p.

CERTU (1999), *DATA PLUS, Etude prospective dans le domaine du recueil de données de trafic*, Collections du CERTU, Décembre 1999.

Caubet C., Fournier P. (1997), *Des premières démarches vers une méthode globale d'évaluation de l'exploitation routière*, Revue TEC n°140, janvier - février 1997, pp 7 – 13.

Champion A., Espié S., Auberlet J.M. (2001), *Behavioral Road Traffic Simulation with ARCHISIM*, Proceedings of ITS world congress of Sydney (Australia), October 2001.

Chen M., Chien S. I. J. (2001), *Dynamic freeway travel time prediction using probe vehicle data : link-based vs path-based*, 80th annual Meeting Transportation Research Board (Washington - 2001), Paper n°01-2887.

Chevreuil M., Fabre P.(1996), *GECANTAURO: The evaluation of an integrated linear traffic control system*, Proceedings of ITS world congress (Orlando), October 1996, paper n°2075.

Cofiroute, (1996), *Compte rendu annuel d'exploitation*, rapport interne Cofiroute, 1996, 50 p

Cofiroute, (1998), *Etude de clientèle du réseau : 1997/1998*, rapport MV2 conseil, 1998, 45 p

Cofiroute, (2003), *Compte rendu annuel d'exploitation*, rapport interne Cofiroute, (2003), 47 p

Cohen S., (1993), *Ingénierie du trafic routier – Eléments de théorie du trafic et applications*. Presses de l'ENPC, Paris, 1993, 246 p.

Cohen S., Nouveliere C., (1996), *Gestion des incidents : nouvelles technologies, nouveaux enjeux*, Revue TEC n° 136, mai – juin 1996, pp 2-6.

Cohen S., (2000), *Exploitation et télématique routière : éléments d'évaluation socio-économique*, Convention DSCR-INRETS n°99 70013T, juin 2000, 164 p.

Cohen S., (2002), *Contribution des véhicules traceurs à l'exploitation de la route*, Convention DSCR-INRETS n° 01 70 018, octobre 2002, 104 p.

Cone R. , (1999), *Road Traffic Advisor*, Proceedings of ITS world congress (Toronto), October 1999, 8 p.

El Faouzi N.E., Lesort J.B., (2000), *Temps de parcours : analyse des pratiques et besoins des exploitants et des opérateurs*, Rapport LICIT n°2001, juillet 2000, 44 p.

EVA Manual, (1991), *Evaluation process for Road Transport Informatics*, EVA Drive Project V1036, Munich, 1991.

Evanco W. M., (1996), *The impact of rapid incident detection on freeway accident fatalities*, Mitretek / FHWA, Washigton D.C., 1996, 18 p.

Ewing T., Doss E., Hanebutte U., Tentner A., (1996), *Simulation Framework for Intelligent Transportation Systems*, Proceedings of ITS world congress (Orlando), October 1996.

FHWA, (1996), *Intelligent Transportation Infrastructure Benefits : expected and experienced*, Publication n° FHWA-JPO-96-008, janvier 1996, 17 p.

Frémont G., Belarbi F., Vernet M., Servignat C., (1998), *Traffic information with 5,8 GHz DSRC systems : First results of the AIDA test trial*, Proceedings of ITS world congress of Seoul (Korea), October 1998.

Frybourg M., Orselli J., (1996), *Evaluation technique, sociale et économique de SIRIUS*, Rapport DREIF – SIER, octobre 1996, 182p.

HCM (1994), *Highway Capacity Manual : Special Report 209*, Transportation Research Board, Washington D.C., 1994

Hellinga B. R., Fu L., (2002), *Reducing bias in probe-based arterial link travel time estimates for its applications*, University of Waterloo, Canada (2002), pp 1-22.

Henk R et al , (1996), *Before and After Analysis of the San Antonio Transguide*, Texas Transportation Institute, juillet 1996.

Hickman M., Ice R. (1995), *A Methodology for Systems Architecture Evaluation*, Proceedings of ITS world congress (Yokohama), 1995, pp 2168-2173.

Holdener D.J., Turner S.M., (1998), *Probe vehicle sample sizes for real time information : the Houston Experience*, the Texas A & M University System College Station, February 1998.

Hontgu Q., Ruey L. C., Der-Horng, L., (2002), *Freeway incident detection using kinematic data from probe vehicles*, Proceedings of ITS world congress of Chicago (USA), 2002.

Jochem A.J., De Hoog A., Zijderhand F, (2001), *Floating car data in the Netherlands*, Proceedings of ITS world congress of Sydney (Australia), October 2001.

Klein L.A., (2002), *Sensor technologies and data requirements for ITS*, Artech House, Boston, London, 2002, pp 140-142.

Kompfner. P., (1994), *Assessment of ATT Pilots Methodologies and results*, Proceedings of ITS world congress of Paris (France), 1994, Vol II, pp. 901-908.

Michler E., (2001), *Statistical analysis of floating car data systems*, Proceedings of ITS world congress of Sydney (Australia), October 2001.

Morello S., Maltby D., (1994), *Comparative assessment of Drive II Pilot Projects in the inter-urban Traffic management and information area*, Proceedings of ITS world congress of Paris (France), 1994, Vol II, pp. 893-900.

Morin J-M., (1994), *Détection automatique d'incidents, Expérimentation sur A43*, Rapport d'évaluation, ISIS, avril 1994.

Morita H., Nojima A., (1996), *Evaluation of VICS Real-Time Traffic Information Service after Initial Market Entry*, Proceeding of ITS world congress of Orlando (USA), October 1996.

OCDE, (1988), *Systèmes embarqués de guidage et de communication avec les conducteurs*, Recherche en matière de routes et de transports routiers, 1988, 115p.

Oliveiro P. (1997), *Proposition d'un plan d'expérience pour l'évaluation d'impact d'un PMV*, Rapport ZELT, juillet 1997.

Okamoto M., Yamamoto T., Sakamoto K., Tuge M., (1998); *Evolution of the VICS*, Proceedings of ITS world congress of Seoul (Korea), October 1998, 8 p.

Orselli J., (1996), *Difficultés de l'évaluation*, Revue TEC n°139, novembre – décembre 1996, pp 25-27.

Parkany E., Bernstein D., (1995), *Design of Incident Detection Algorithms using vehicle – to roadside communication sensors*, Transportation Research Record n°1494, pp 67-74, 1995.

Paulin S., (2001), *Programme des Autoroutes de l'Information : Projet AIDA Phase 2*, CS, COFIROUTE, PSA PEUGEOT CITROEN, RENAULT, ISIS, Rapport final, Octobre 2001.

Pauziè A., Vernet M., (1996), *Human Factor Design Guidelines for Road and Traffic Information, presentation to drivers*, HARDIE del 18, DRIVE III, 1996.

Peters J.I. , (1994), *Results of the TRAVTEK system evaluation*, Proceedings of ITS world congress of Paris (France), 1994, volume II, pp 839-846.

Philipps, (1994), *The Raphit field trial and evaluation of SOCRATES applications*, Proceedings of ITS world congress of Paris (France), 1994, Vol V, pp. 2297-2304.

Rogova G. L., Summers M. S., (1996), *ITS Architecture evaluation framework and deployment benefits analysis methodology*, Proceedings of ITS world congress of Orlando (USA), 1996.

Servignat C., Vernet M., Blanchet V., (1995), *Informations routières dans le véhicule : ergonomie des aides de proximité*, Rapport INRETS-LESCO n°9516, décembre 1995, 77p.

SETRA, (1993), *Schéma Directeur d'Exploitation de la Route : Premiers éléments pour l'organisation des services*, Rapport SETRA, 1993, 87 p

SETRA, (1992), *Traitement des perturbations de trafic*, SETRA, 1992, 156 p.

Shank D., Roberts D. (1996), *Assessment of ITS benefits – results from the field*, Proceedings of ITS America congress, 1996, pp 740-749.

Sodeikat H., (1995), *Dynamic Route Guidance and Driver Information Services with Infrared Beacon Communication*, Proceedings of ITS world congress of Yokohama (Japan), 1995, pp 622 – 627.

Tarry S., (1996), *A Framework for assessing the benefits of ITS*, Traffic Technology International, août – septembre 1996, pp 25-30.

TRL (1996), *Review of the potential benefits of road transport telematics*, TRL Report 220, Londres, 1996, 412 p.

Ullman G., (1996), *Benefits of real - time travel time information in Houston*, Proceedings of ITS America congress, 1996, pp 189-197.

Vivet A., (1989), *Prospective de l'Exploitation de la Route*, Revue UTH 2001, novembre 1989.

Voigt K. H., (1996), *Evaluation procedure for operational test benefits*, Proceedings of ITS world congress of Orlando (USA), 1996.

Walliser B., (1990), *Le calcul économique*, Collection Repères – Editions La découverte, Paris, 1990, 125 p.

Weyd J., (1994), *Télématique routière et normalisation*, Revue Générale des Routes et Autoroutes n°721, septembre 1994.

Westerman M., Litjens R., Linnartz J-P., (1996), *Integration of probe vehicle and induction loop data – Estimation of travel times and Automatic Incident Detection*, California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-96-13.

Whitney, (1994), *New modelling and simulation methods for the evaluation of Intelligent Transport Systems design*, Proceedings of ITS world congress (Paris), 1994, volume II, pp 855-862.

Zerguini S., (1998), *Contribution à l'analyse économique de l'exploitation de la route*, Thèse de Doctorat à l'Université Paris XII, Paris, 1998, 253 p.

Zhu F., (2000), *Locations of AVI system and travel time forecasting*, Master's Thesis, Virginia University (USA), June 2000, 71 p.

GLOSSAIRE

ADAMS : Automatic Debiting Application for new Motorway Services

ADEME : Agence De l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie

AIDA : Application pour l'Information Des Autoroutes

ALERT : Advice and Problem Location for European Road Traffic

ART : Agence de Régulation des Télécommunications

ASFA : Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes

AVL : Automatic Vehicle Location

AVI : Automatic Vehicle Identification

BSC : Base Station Controller

BTS : Base Tranceiver Station

BU : Bande d'Urgence

CALM : Continuous Air interface for Long and Medium communications

CEI : Centre d'Entretien et d'Intervention

CEN : Comité Européen de Normalisation

CEPT : Conférence Européenne des Postes et Télécommunications

CERTU : Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques

CGIT : Commission Générale d'Ingénierie du Trafic

CNIR : Centre National d'Information Routière

CRICR : Centre Régional d'Information et de Coordination Routière

CSA : Conseil Supérieur de l'Audiovisuel

CSSI : Compagnie des Signaux et Systèmes d'Information

DAB : Digital Audio Broadcasting

DAI : Détection Automatique d'Incidents

DDE : Direction Départementale de l'Équipement

DELTA : Dsrc ELectionics implementation for Transportation and Automotive applications

DETR : Department for Environment, Transport and Regions

DSCR : Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière

DSRC : Dedicated Short Range Communication

ERTICO : European Road Telematics Implementation Coordination Organisation

ETSI : European Technical Scientific Institute

FCC : Federal Commission for Communications

FMC : Fiche de Main Courante

FHWA : Federal Highway Administration

GLONASS : Global Orbitography Navigation Satellite System

GPRS : General Packet Radio Service

GPS : Global Positioning System

GSM : Global System for Mobile communications

GTC : Gestion Technique Centralisée

HAR : Highway Advisory Radio

HCM : Highway Capacity Manual

HSDS : High Speed Data System

IHM : Interface Homme Machine

INRETS : Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité

INMARSAT : International Maritime Satellite Organization, spécialisée dans les services mobiles par satellites

ISO : International Standard Organisation

MDI : Model Deployment Initiative

MSC : Mobile Switching Centre

MTBF : Mean Time Between Failure

MTTR : Mean Time To Repair

NFA : Number of False Alarms

NPAD : No Program Associated Data

O/D : Origine / Destination

PAD : Program Associated Data

PAU : Poste d'Appel d'Urgence

PCI : Poste Central d'Informations

PCRD : Programme Cadre de Recherche et Développement

PGT : Plan de Gestion de Trafic

PMV : Panneaux à Messages Variables

RATP : Régie Autonome des Transports Parisiens

RAU : Réseau d'Appel d'Urgence

RDS : Radio Data System

RN : Route Nationale

RTA : Road Traffic Advisor

SAMU : Service d'Aide Médicalisée d'Urgence

SATIR : Système d'Aide au Traitement de l'Information Autoroutière

SCA : Société Concessionnaire d'autoroutes

SDER : Schéma Directeur d'Exploitation de la Route

SDIR : Schéma Directeur d'Information de la Route

SERTI : South European Road Telematics Implementation

SETRA : Service d'Etudes Techniques Routières et Autoroutières

SFR : Société Française de Radiotéléphonie

SIRA : Serveur d'Informations Routières Aida

SMS : Short Message Service

SND : Standard Normal Deviate

STI : Systèmes de Transports Intelligents

STRIP : System for TRraffic Information and Positioning

TDMA : Time Division Multiple Access

TIS : Télépéage Inter Sociétés

TIV : Temps Inter Véhiculaire

TMC : Traffic Message Channel

TMJA : Trafic Moyen Journalier Annuel

TRL : Transport Research Laboratory

TTI : Texas Transportation Institute

UER : Union Européenne de Radiodiffusion

UIT : Union Internationale des Télécommunications

UMTS : Universal Mobile Telecommunication System

USAP : Union des Sociétés d'Autoroutes à Péage

VICS : Vehicle Information Communication System

WAP : Wireless Application Protocol

WiFi : Wireless Fidelity

WLAN : Wireless Local Area Network

ANNEXES

Annexe I

Procédure automatique de traitement des fichiers AIDA

Ces fonctions (ou macros) servent à automatiser l'analyse des fichiers Excel contenant les données remontées par les véhicules équipés par des badges Liber-t ou des terminaux AIDA. Le code de ces fonctions est programmé en langage Visual Basic.

La première macro nommée allege sert simplement à effacer les 16 premières lignes des fichiers Excel qui donnent des informations sur le contenu du fichier (nombre d'éléments, date de création,...) qui ne sont pas utiles pour notre analyse des données.

```
Sub allege()  
    Rows("1:16").Select  
    Selection.Delete Shift:=xlUp  
End Sub
```

La macro tri ordonne les données du fichier en les classant par sens de circulation (colonne F du fichier, indiquant si le déplacement se fait dans le sens Paris vers la Province ou Province vers Paris), puis par identifiant du véhicule (colonne I, afin de regrouper les données relatives à un même véhicule) et enfin par heure de passage (colonne H, ce qui nous donne l'ordre de passage sous les balises).

```
Sub tri()  
    Cells.Select  
    Selection.Sort Key1:=Range("F1"), Order1:=xlAscending, Key2:=Range("I1") _  
        , Order2:=xlAscending, Key3:=Range("H1"), Order3:=xlAscending, Header:= _  
        xlGuess, OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom  
End Sub
```

La macro elimine sert à effacer les lignes qui risquent de provoquer des erreurs (doublons ou informations transmises plusieurs fois) ou des données inexploitables pour l'estimation des temps de parcours.

```
Sub elimine()  
  
Dim i As Integer  
Dim n As Integer  
Dim colIndex As Integer  
Dim rwIndex As Integer  
Dim tot As Integer  
Dim tot2 As Integer  
  
i = 0 'compteur de lignes effacées  
n = 0 'marqueur d'enregistrement unique pour un véhicule  
tot = Application.CountA(ActiveSheet.Range("E:E")) 'nombre de lignes de la feuille active  
tot2 = tot  
'MsgBox "    lignes " & tot  
  
For rwIndex = tot To 2 Step -1
```

```
'premier cas: on a deux enregistrements pour le même véhicule
If Cells(rwIndex, 9).Value = Cells(rwIndex - 1, 9).Value Then
```

```
    'si on a un doublon, on elimine
    If Cells(rwIndex, 4).Value = Cells(rwIndex - 1, 4).Value Then
        i = i + 1
        Rows(rwIndex).Select
        Selection.Delete Shift:=xlUp
        tot = tot - 1
    'sinon on note qu'on va pouvoir exploiter
    Else
        n = 1
    End If
```

```
'deuxieme cas: on n'a qu'un seul enregistrement pour le véhicule (pas exploitable, on élimine)
ElseIf n = 0 Then
```

```
    i = i + 1
    Rows(rwIndex).Select
    Selection.Delete Shift:=xlUp
    tot = tot - 1
```

```
'troisieme cas: on a change d'identifiant véhicule. on remet le marqueur a zéro
Else
    n = 0
End If
```

```
Next rwIndex
```

```
'efface la première ligne si elle seule contient son identifiant conducteur
```

```
If Cells(1, 9).Value <> Cells(2, 9).Value Then
    i = i + 1
    Rows(1).Select
    Selection.Delete Shift:=xlUp
    tot = tot - 1
End If
```

```
'MsgBox "    total effacé" & i
'MsgBox "    ratio " & (Fix((i / tot2) * 10000) / 100) & " %"
'MsgBox "Fichier nettoyé"
```

```
End Sub
```

La macro *marquage* transforme les informations du fichier afin d'en faciliter l'exploitation informatique. Ainsi les points kilométriques PK sont recodés de 0 à 6 pour le remplissage des matrices à l'aide des macros suivantes, la tranche horaire de l'enregistrement est aussi codée de 0 à 23 et enfin les temps de parcours sont calculés à partir des heures d'enregistrement.

```
Sub marquage()
Dim rwIndex As Integer
Dim tot As Integer
tot = Application.CountA(ActiveSheet.Range("E:E"))
```

```
'recodage des balises 0=10028 _1=10049 _2=10060 _3=10073 _4=10085 _5=10089
```

```
If Cells(1, 4) = 10028 Then
    Cells(1, 15) = 0
```

```
ElseIf Cells(1, 4) = 10049 Then
    Cells(1, 15) = 1
ElseIf Cells(1, 4) = 10060 Then
    Cells(1, 15) = 2
ElseIf Cells(1, 4) = 10073 Then
    Cells(1, 15) = 3
ElseIf Cells(1, 4) = 10085 Then
    Cells(1, 15) = 4
ElseIf Cells(1, 4) = 10089 Then
    Cells(1, 15) = 5
ElseIf Cells(1, 4) = 10094 Then
    Cells(1, 15) = 6
End If
```

```
'indicateur de tranche horaire
Cells(1, 18) = Fix(Cells(1, 8) * 24)
```

```
    Cells(1, 15).Select    'initialisation premiere ligne
    Selection.Copy
    Cells(1, 16).Select
    ActiveSheet.Paste
```

```
For rwIndex = 2 To tot
```

```
'indicateur de tranche horaire
Cells(rwIndex, 18) = Fix(Cells(rwIndex, 8) * 24)
```

```
    If Cells(rwIndex, 4) = 10028 Then
        Cells(rwIndex, 15) = 0
    ElseIf Cells(rwIndex, 4) = 10049 Then
        Cells(rwIndex, 15) = 1
    ElseIf Cells(rwIndex, 4) = 10060 Then
        Cells(rwIndex, 15) = 2
    ElseIf Cells(rwIndex, 4) = 10073 Then
        Cells(rwIndex, 15) = 3
    ElseIf Cells(rwIndex, 4) = 10085 Then
        Cells(rwIndex, 15) = 4
    ElseIf Cells(rwIndex, 4) = 10089 Then
        Cells(rwIndex, 15) = 5
    ElseIf Cells(rwIndex, 4) = 10094 Then
        Cells(rwIndex, 15) = 6
    End If
```

```
    If Cells(rwIndex, 9) = Cells(rwIndex - 1, 9) Then
        Cells(rwIndex - 1, 15).Select
```

```
    'Pour recalculer les temps de parcours
```

```
Cells(rwIndex, 17) = (Cells(rwIndex, 8) - Cells(rwIndex - 1, 8)) * 24 * 60 * 60
```

```
    Else
        Cells(rwIndex, 15).Select
    End If
```

```
    Selection.Copy
    Cells(rwIndex, 16).Select
    ActiveSheet.Paste
```

```

Next rwIndex
  MsgBox "valeurs rajoutées"
End Sub

```

La macro *traitement* lance l'exécution des quatre macros précédentes. Lorsqu'elle est exécutée, elle affiche à l'écran un message indiquant que le fichier a été traité et qu'il peut désormais être exploité.

```

Sub traitement()
Application.ScreenUpdating = False
Application.Run "Feuil1.allege"
Application.Run "Feuil1.tri"
Application.Run "Feuil1.elimine"
Application.Run "Feuil1.marquage"
MsgBox "données traitées"
End Sub

```

La macro *moyenne* parcourt le fichier et remplit le tableau contenant, pour chaque couple de points, le nombre de véhicules dont ce couple de points est un trajet atomique (c'est-à-dire pour lesquels on n'a pas d'informations concernant les points intermédiaires) ainsi que la moyenne des temps mis pour effectuer ce trajet.

```

Sub moyennes()

Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim k As Integer
Dim a As Integer
Dim b As Integer
Dim c As Integer
Dim d As Integer
Dim e As Integer
Dim colIndex As Integer
Dim rwIndex As Integer
Dim tot As Integer

i = 0
j = 0
tot = Application.CountA(ActiveSheet.Range("E:E")) 'nombre de lignes de la feuille active

For rwIndex = 1 To tot

a = Cells(rwIndex, 16)
b = Cells(rwIndex, 15)
c = Cells(rwIndex, 18)
d = Cells(rwIndex, 17)

'parcours(a, b, c, 0) = parcours(a, b, c, 0) + 1
'parcours(a, b, c, 1) = parcours(a, b, c, 1) + d

Sheets("Feuil2").Cells(7 * a + b + 1 + 1, 2 * c + 2 + 1) = Sheets("Feuil2").Cells(7 * a + b + 1 + 1, 2 * c + 2 + 1) + 1
Sheets("Feuil2").Cells(7 * a + b + 1 + 1, 2 * c + 2 + 1 + 1) = Sheets("Feuil2").Cells(7 * a + b + 1 + 1, 2 * c + 2 + 1 + 1)
+ d

```

```

Next rwIndex

For i = 0 To 6
  For j = 0 To 6
    For k = 0 To 23

      MsgBox "temps total " & parcours(i, j, k, 1) & " " & i & " " & j & " " & k
      MsgBox parcours(0, 1, k, 0)
      MsgBox parcours(0, 1, k, 1)
      If Sheets("Feuil2").Cells(7 * a + b + 1 + 1, 2 * (c + 2 + 1)) > 1 Then
        If parcours(i, j, k, 1) > 1 Then
          Sheets("Feuil3").Cells(7 * a + b + 1 + 1, 2 * (c + 2 + 1) + 1) = Fix(Sheets("Feuil3").Cells(7 * a + b + 1 + 1, 2 *
(c + 2 + 1) + 1) / Sheets("Feuil2").Cells(7 * a + b + 1 + 1, 2 * (c + 2 + 1)))
          'e = parcours(0, 1, k, 1)/parcours(0, 1, k, 0)
          'Sheets("Feuil3").Cells(7 * i + j + 1 + 1, k + 2 + 1)=e
          MsgBox "temps moyen a " & k & "h entre " & i & " et " & j & " (" & parcours(i, j, k, 0) & " véhicules" & " ) :
" & e
        End If
      Next k
    Next j
  Next i

End Sub

```

La macro *compte* n'effectue pas un traitement du fichier avec modifications, il s'agit d'une fonction d'information permettant de déterminer le nombre total de lignes du fichier après utilisation de la macro *tri* et avant celle de la macro *elimine*. C'est une fonction permettant de déterminer la quantité d'informations exploitables et aussi de contrôler le bon fonctionnement de la macro *elimine*. En effet, les résultats fournis doivent correspondre au nombre de lignes restant après lancement de la macro *elimine*.

```

Sub compte()
Dim n As Integer
Dim i As Integer
Dim rwIndex As Integer
Dim tot As Integer
tot = Application.CountA(ActiveSheet.Range("E:E")) 'nombre de lignes de la feuille active
MsgBox "    lignes " & tot
n = 0
i = 0
  For rwIndex = 1 To tot
    If Cells(rwIndex, 9).Value <> Cells(rwIndex + 1, 9).Value Then
      n = n + 1
    Else
      i = i + 1
    End If
  Next rwIndex
  MsgBox "    total " & n
  MsgBox "    identiques " & i
  MsgBox "temps de parcours: " & i & " soit " & (Fix((i / tot) * 10000) / 100) & "%"
End Sub

```

La macro *voies* est une autre macro d'information destinée à connaître la répartition des véhicules au moment du passage sous les balises entre les trois voies de l'autoroute (voie lente, voie médiane ou voie rapide). Cette information est utile pour déterminer s'il est possible de ne considérer que

certaines voies (et donc de limiter l'équipement et les coûts d'exploitation), puisque l'on pourrait supposer par exemple que les utilisateurs du système AIDA, étant des utilisateurs réguliers de l'autoroute, roulent plus vite que la moyenne des usagers. En réalité, cette macro montre qu'environ 15% des utilisateurs équipés utilisent la voie de droite (et le pourcentage est plus élevé en général pour les autres voies).

```
Sub voies()  
Dim i As Integer  
Dim j As Integer  
Dim k As Integer  
  
tot = Application.CountA(ActiveSheet.Range("E:E"))  
For n = 1 To tot  
    If Cells(n, 5) = 1 Then  
        i = i + 1  
    ElseIf Cells(n, 5) = 2 Then  
        j = j + 1  
    ElseIf Cells(n, 5) = 3 Then  
        k = k + 1  
    End If  
Next n  
MsgBox "Voie 1: " & (Fix((i / tot) * 10000) / 100) & "  voie 2: " & (Fix((j / tot) * 10000) / 100) & "  voie 3: " &  
(Fix((k / tot) * 10000) / 100)  
End Sub
```

Format des fichiers de données AIDA brutes et traitées

Fichier AIDA avant traitement

Projet :	AIDA												
Type Fichier :	Recueil TP												
Version :	1												
N° Fichier :	45602												
Code Société :	25005												
Date Constit :	15/07/2001												
Heure Consti :	01:30:14												
Nb éléments :	2735												
OBU	D_PASS												
	SV	Point de passage				Horodate		Enregistrement de l'origine					
		CS	NG	NV	S	Date	Heure	@	TP	CS	NG	NV	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T	113	25005	10049		2	0	14/07/2001	00:01:18	4C.5E.20	557	25005	10028	3
T	113	25005	10073		2	0	14/07/2001	00:02:05	B8.04.7C	650	25005	10049	2
T	113	25005	10073		3	0	14/07/2001	00:01:57	B0.22.9E	311	25005	10060	3
T	113	25005	10073		1	1	14/07/2001	00:02:14	84.9C.F2	600	25005	10094	1
T	113	25005	10085		2	0	14/07/2001	00:01:03	38.8C.E8	0	25005	10085	2
T	113	25005	10085		2	0	14/07/2001	00:02:46	60.E6.9C	306	25005	10073	2
T	113	25005	10085		2	0	14/07/2001	00:02:53	98.9C.F8	1563	25005	10028	3
T	113	25005	10085		2	0	14/07/2001	00:02:53	98.9C.F8	1563	25005	10028	3
T	113	25005	10085		2	0	14/07/2001	00:03:30	72.24.98	2059	25005	10028	1
T	113	25005	10085		3	0	14/07/2001	00:00:46	3B.67.DF	0	25005	10085	3
T	113	25005	10089		2	0	14/07/2001	00:03:21	38.8C.E8	138	25005	10085	2
T	113	25005	10089		2	1	14/07/2001	00:02:56	28.86.42	0	25005	10089	2
T	113	25005	10094		3	0	14/07/2001	00:02:40	A6.10.3E	0	25005	10094	3
T	113	25005	10060		3	0	14/07/2001	00:06:16	4C.5E.20	855	25005	10028	3

Fichier AIDA après traitement

10028	1	0	14/07/2001	17:31:03	00.00.34	0	10028	1	0	0	0	0	17
10049	2	0	14/07/2001	17:40:22	00.00.34	559	10028	1	0	1	0	559	17
10060	2	0	14/07/2001	17:45:06	00.00.34	843	10028	1	0	2	1	284	17
10073	2	0	14/07/2001	17:50:41	00.00.34	1178	10028	1	0	3	2	335	17
10085	2	0	14/07/2001	17:55:51	00.00.34	1488	10028	1	0	4	3	310	17
10089	2	0	14/07/2001	17:57:42	00.00.34	1599	10028	1	0	5	4	111	17
10094	2	0	14/07/2001	18:00:05	00.00.34	1742	10028	1	0	6	5	143	18
10028	3	0	14/07/2001	08:26:19	00.9A.E6	0	10028	3	0	0	0	0	8
10060	3	0	14/07/2001	08:44:31	00.9A.E6	1092	10028	3	0	2	0	1092	8
10073	3	0	14/07/2001	08:51:33	00.9A.E6	1514	10028	3	0	3	2	422	8
10085	3	0	14/07/2001	09:06:32	00.9A.E6	2413	10028	3	0	4	3	899	9
10060	3	0	14/07/2001	00:21:06	00.DA.4E	1957	10028	3	0	2	2	0	0
10073	3	0	14/07/2001	00:26:38	00.DA.4E	2289	10028	3	0	3	2	332	0
10094	3	0	14/07/2001	00:36:00	00.DA.4E	-1	10028	3	0	6	3	562	0
10028	2	0	14/07/2001	14:29:38	01.F5.BF	0	10028	2	0	0	0	0	14
10049	2	0	14/07/2001	14:39:38	01.F5.BF	600	10028	2	0	1	0	600	14
10060	3	0	14/07/2001	14:44:47	01.F5.BF	909	10028	2	0	2	1	309	14
10073	2	0	14/07/2001	14:50:36	01.F5.BF	1258	10028	2	0	3	2	349	14
10085	2	0	14/07/2001	14:56:12	01.F5.BF	1594	10028	2	0	4	3	336	14
10089	2	0	14/07/2001	14:58:10	01.F5.BF	1712	10028	2	0	5	4	118	14
10094	2	0	14/07/2001	15:50:29	01.F5.BF	4851	10028	2	0	6	5	3139	15
10094	1	1	14/07/2001	12:04:39	02.06.74	0	10094	1	1	6	6	0	12
10073	2	1	14/07/2001	12:15:26	02.06.74	647	10094	1	1	3	6	647	12
10049	2	0	14/07/2001	14:35:37	02.DE.FA	0	10049	2	0	1	1	0	14
10060	2	0	14/07/2001	14:40:58	02.DE.FA	321	10049	2	0	2	1	321	14

Annexe III

Description des contrôleurs boucles et balises AIDA dans l'outil ARCHISIM

Contrôleur 'recueil de données' par boucles

Objectif : recueillir des données individuelles de chaque véhicule passant sur le capteur.

Moyens: Les capteurs sont disposés le long du réseau. Chaque capteur est identifié par une route et un PK donnés. Il est nécessaire de connaître la (ou les) voie(s) sur laquelle (lesquelles) il « agit ».

Commentaires : ce contrôleur est qualifié de passif car il consomme des informations fournies par des capteurs mais en aucun cas, il n'agit sur son environnement. C'est pourquoi la période d'action est fixée à 0 secondes.

Consignes d'utilisation :

Il suffit de placer les capteurs sur le réseau. Pour ce faire, l'utilisateur modifie le fichier *nomDuCircuit.crxxx* : Il choisit le type d'action (en l'occurrence **recueilDonnées**), la période d'action (0 secondes) et l'emplacement des capteurs de type ponctuel.

Exemple d'un fichier .crxxx :

```
V2.5
Type= Boucle ;(vlv, controleAcces, bouchon, aida, recueilDonnees, balisage, test)
Periode= 0 ;( s )

;Capteurs (type route pk(dm) sens voie(dm) noVoie nbVoies (paramètres spécifiques)) :
nbCapteurs= 8
ponctuelA1 10000 1 0 0 -1
ponctuelA1 159000 1 0 0 -1
ponctuelA1 164000 1 0 0 -1
ponctuelA1 293000 1 0 0 -1
ponctuelA1 298000 1 0 0 -1
ponctuelA1 446000 1 0 0 -1
ponctuelA1 451000 1 0 0 -1
ponctuelA1 499000 1 0 0 -1

;Actionneurs (type route pk(dm) sens voie(dm) noVoie nbVoies (paramètres spécifiques)) :
nbActionneurs= 0
```

Contrôleur balises AIDA

Objectif :

Alerter les conducteurs de véhicules équipés d'un terminal AIDA d'événements se déroulant en aval de leur position.

Moyens :

Le réseau routier est équipé de balises. Chaque balise peut recevoir et émettre des informations. Elles émettent des informations vers des véhicules et vers un serveur central (SIRA) et elles reçoivent des données provenant des véhicules AIDA et du SIRA.

Consignes :

Les balises doivent être disposées de manière régulière sur le réseau : l'espacement entre deux balises consécutives doit être constant.

Les événements pouvant survenir à tout moment, il est nécessaire que la période d'action soit de l'ordre de la seconde.

Un événement de nature à perturber le trafic est caractérisé par au moins un PK de début. Pour un PK donné, peut débiter un et un seul événement.

Commentaires :

Une balise de type AIDA, pouvant recevoir et émettre de l'information, est modélisée par deux composants, l'un émettant et l'autre recevant. De ce fait, il est important de disposer sur le réseau autant de balises émettrices que de balises réceptrices.

Utilisation :

Il suffit de placer les balises émettrices (actBaliseAïda) et réceptrices (captBaliseAïda) sur le réseau. Pour ce faire, l'utilisateur modifie le fichier *nomDuCircuit.crxxx* : Il choisit le type d'action (en l'occurrence **AIDA**), la période d'action (1 secondes) et l'emplacement des balises.

Exemple d'un fichier de type .crxxx :

V2.5

Type= aida ;(vlv, controleAcces, bouchon, aida, recueilDonnees, balisage, test)

Periode= 1 ;(s)

;Capteurs (type route pk(dm) sens voie(dm) noVoie nbVoies (paramètres spécifiques)) :

nbCapteurs= 5

captBaliseAida A1 50000 1 0 1 -1

captBaliseAida A1 150000 1 0 1 -1

captBaliseAida A1 250000 1 0 1 -1

captBaliseAida A1 350000 1 0 1 -1

captBaliseAida A1 450000 1 0 1 -1

;Actionneurs (type route pk(dm) sens voie(dm) noVoie nbVoies (paramètres spécifiques)) :

nbActionneurs= 5

actBaliseAida A1 50000 1 0 1 -1

actBaliseAida A1 150000 1 0 1 -1

actBaliseAida A1 250000 1 0 1 -1

actBaliseAida A1 350000 1 0 1 -1

actBaliseAida A1 450000 1 0 1 -1