

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE	3
1.1 Contexte	3
1.2 Problématique	5
1.3 Objectifs à l'origine de l'étude commandée par le MTQ.....	6
1.3.1 Service des Orientations stratégiques	7
1.3.2 Service des Chaussées	8
1.4 Terminologie associée à l'évaluation des coûts aux usagers.....	9
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	13
2.1 Contexte	13
2.2 Système HERS-ST.....	13
2.2.1 Rapport technique de 1982 (FHWA)	14
2.2.1.1 Classes de véhicules	14
2.2.2 Consommation de carburant	15
2.2.3 Autres coûts d'exploitation des véhicules	15
2.3 Système HDM-4	17
2.3.1 Modèle pour la conception et l'entretien des routes (HDM-III)	18
2.3.1.1 Étude réalisée au Kenya.....	21
2.3.1.2 Étude réalisée dans les Caraïbes	21
2.3.1.3 Étude réalisée au Brésil	21
2.3.1.4 Étude Indienne.....	22
2.3.2 Études ISOHDM	23
2.3.2.1 Étude HTRS	23
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	25
3.1 Compréhension de l'évaluation des coûts aux usagers	25
3.2 Évaluation de la réalité québécoise.....	26
3.3 Module d'évaluation des coûts aux usagers du HERS-ST.....	28
3.4 Développement et intégration d'un modèle au GCH-6011.....	29
3.5 Plan de travail général.....	30
CHAPITRE 4 OUTILS DE MODÉLISATION ET DE GESTION	31
4.1 Système HERS-ST de la Federal Highway Administration	32
4.1.1 Volet des coûts aux usagers et à la collectivité du HERS-ST	35
4.2 Système HDM-4 de la Banque Mondiale	38
4.2.1 Module des coûts aux usagers du HDM-4.....	39
4.3 Le système GCH-6011 du MTQ.....	44
4.4 Le modèle MOBILE 6 QC.....	46
4.5 Autres outils.....	48
4.5.1 Les autres programmes et feuilles de calculs Microsoft Excel	48
4.5.2 Le modèle RED	48

CHAPITRE 5 MODÈLES DE DÉPLACEMENT.....	50
5.1 Modèle de la vitesse HERS.....	50
5.1.1 Vitesse en écoulement libre.....	51
5.1.2 Vitesse effective moyenne.....	52
5.1.2.1 Sections de routes en milieu urbain comportant des panneaux d'arrêt.....	52
5.1.2.2 Sections de routes en milieu urbain comportant des feux de circulation.....	53
5.1.2.3 Sections de routes en milieu urbain caractérisées par les deux types de dispositifs de contrôle de la circulation.....	54
5.1.2.4 Sections de routes en milieu rural avec une voie par direction.....	54
5.1.2.5 Sections de routes avec deux voies ou plus par direction.....	55
5.1.2.6 Sections de routes avec trois voies, deux directions.....	55
5.2 Modèle des prévisions de la circulation de HERS.....	55
5.2.1 Mise en contexte.....	56
5.2.2 Élasticité de la demande.....	57
5.2.3 Facteurs endogènes et facteurs exogènes de la circulation induite.....	58
5.2.4 Conditions initiales.....	60
5.2.5 Conditions à la fin de la période d'analyse.....	61
5.2.5.1 Croissance de la circulation.....	61
5.3 Modèle des forces s'opposant au mouvement (HDM-4).....	62
5.4 Modèle de vitesse de HDM-4.....	63
5.4.1 Vitesse en écoulement libre.....	63
5.4.2 Vitesse limitée par la puissance du moteur (VDRIVE).....	64
5.4.3 Vitesse limitée par la puissance de freinage (VBRAKE).....	65
5.4.4 Vitesse limitée par l'alignement horizontal de la route (VCURVE).....	65
5.4.5 Vitesse limitée par l'état de la chaussée (VROUGH).....	66
5.4.6 Vitesse limitée par la perception du conducteur (VDESIR).....	66
5.4.7 Vitesse annuelle moyenne d'opération.....	67
5.5 Modèle de capacité de HDM-4.....	67
5.5.1 Unité de véhicule équivalent.....	68
5.5.2 Caractéristiques de la circulation.....	69
5.5.3 Vitesse effective et interactions entre les véhicules.....	70
5.5.4 Cycles induits de changements de vitesse.....	71
CHAPITRE 6 MODÈLES DES COÛTS D'EXPLOITATION DES VÉHICULES.....	75
6.1 Modèles du système HERS.....	77
6.1.1 Taux de consommation des composantes.....	81
6.1.1.1 Vitesse constante.....	81
6.1.1.2 Cycles de changements de vitesse.....	81
6.1.1.3 Sinuosité du tracé en plan de la route.....	81
6.1.2 Coûts unitaires.....	82
6.1.3 Facteurs d'ajustement pour les taux de consommation.....	83
6.1.4 Facteurs d'ajustement liés à l'état du revêtement.....	85
6.2 Modèles du système HDM-4.....	86
6.2.1 Modèle de la consommation de carburant.....	86
6.2.1.1 Consommation minimale de carburant (FCmin).....	87
6.2.1.2 Facteur d'efficacité de transmission de la puissance (ξ).....	87
6.2.1.3 Puissance totale requise (Ptot).....	88

6.2.1.4	Consommation additionnelle de carburant due aux accélérations (dFUEL)	89
6.2.2	Modèle de la consommation de l'huile du moteur	90
6.2.3	Modélisation de l'usure des pneus	91
6.2.4	Modélisation des coûts d'entretien et de réparation	94
6.2.5	Modélisation de la vie utile	96
6.2.6	Modélisation du coût en capital	96
CHAPITRE 7 MODÈLES DE TEMPS DE DÉPLACEMENT		98
7.1	Temps des passagers et de l'équipage	98
7.1.1	Modèles HERS-ST	98
7.1.2	Modèles HDM-4	100
7.2	Valeur de l'inventaire	100
7.2.1	Modèles HERS-ST	101
7.2.2	Modèles HDM-4	101
CHAPITRE 8 MODÉLISATION DES ÉMISSIONS DES VÉHICULES		102
8.1	Modèle HERS	103
8.1.1	Processus de détermination des effets des émissions	104
8.1.1.1	Sections	105
8.1.1.2	Véhicules	105
8.1.1.3	Modèles de simulations des émissions	107
8.1.1.4	Coûts unitaires	107
8.2	Modèles HDM-4	110
CHAPITRE 9 CARACTÉRISTIQUES DES TRONÇONS ROUTIERS		114
9.1	Système HERS-ST	114
9.2	Paramètres de modélisation obtenus du Système de gestion des chaussées	114
9.3	Paramétrage des tronçons routiers du HDM-4	115
CHAPITRE 10 CLASSIFICATION DES VÉHICULES		118
10.1	Choix des critères de classifications	118
10.2	Classification HPMS/HERS	118
10.3	Classification incluse dans les normes du MTQ	119
10.4	Autres classifications en usage au Québec	119
10.5	Classification du FHWA	121
10.6	Classification adoptée pour le HCAS de 1997 (FHWA)	121
10.7	Classification du HDM-4 et du NZ-VOC	121
10.8	Agence pour la protection de l'environnement (EPA)	122
10.9	Systèmes de classification de l'industrie du transport	122
10.10	Sommaire des classifications existantes	123
10.11	Classification proposées pour l'étude	125
10.12	Correspondance entre la classification proposée et celle du HERS-ST	126
CHAPITRE 11 DISTRIBUTION DE LA FLOTTE DE VÉHICULES		127
11.1	Données de circulations disponibles (SOS)	127
11.2	Données de l'enquête 1999	128
11.3	Données obtenues du SMST	129
11.4	Données de circulations requises pour le HERS-ST	129

CHAPITRE 12 VÉHICULES REPRÉSENTATIFS.....	131
12.1 Définition du véhicule représentatif	131
12.2 Base de données de la SAAQ.....	132
12.3 Définition des véhicules légers « composites ».....	133
12.4 Sélection des modèles représentatifs pour les camions	133
CHAPITRE 13 CARACTÉRISTIQUES DES VÉHICULES REPRÉSENTATIFS.....	135
13.1 Paramètres de modélisation du HERS-ST	135
13.2 Paramètres de modélisation du HDM-4	135
13.3 Méthode d'attribution des caractéristiques des véhicules	136
13.4 Caractéristiques physiques	136
13.4.1 Dimensions de grandeur.....	137
13.4.2 Coefficient d'aérodynamisme	138
13.4.3 Masse	138
13.4.4 Nombre d'essieux et nombre de roues.....	139
13.5 Paramètres mécanique	139
13.5.1 Cylindrée du moteur	140
13.5.2 Puissance nominale du moteur	140
13.5.3 Puissance effective du moteur.....	141
13.5.4 Puissance de freinage	141
13.5.5 Vitesse maximale de révolution du moteur.....	141
13.5.6 Vitesse de révolution du moteur au ralenti	141
13.5.7 Type de carburant utilisé	142
13.5.8 Consommation de carburant à la vitesse de révolution du moteur au	143
ralenti	143
13.5.9 Consommation de carburant (valeur nominale).....	143
13.5.9.1 Facteur de pondération de la consommation de carburant	144
13.6 Caractéristiques des pneus.....	145
13.6.1 Dimensions des pneus	146
13.6.2 Diamètre des roues	146
13.6.3 Volume de la gomme.....	147
13.6.4 Paramètres d'utilisation des pneus.....	147
13.6.4.1 Durée de vie.....	147
13.6.4.2 Nombre de rechapages	148
13.7 Utilisation des véhicules	148
13.7.1 Vie utile et vie économique.....	149
13.7.1.1 Ajustement du taux de dépréciation (HERS-ST)	151
13.7.2 Utilisation annuelle.....	153
13.7.2.1 Kilométrage parcouru.....	153
13.7.2.2 Nombre d'heures d'utilisation des véhicules.....	154
13.7.2.3 Nombre d'heures de conduite.....	156
13.7.2.4 Proportion du temps d'utilisation du véhicule.....	158
CHAPITRE 14 COÛTS UNITAIRES	159
14.1 Coûts unitaires de nature économique.....	159
14.2 Unités de mesure, facteurs de conversion et indicateurs économiques	159
14.3 Carburant	160
14.3.1 Coût économique du carburant	160
14.3.2 Évolution du coût du carburant.....	161

14.3.2.1 Valeurs proposées	163
14.3.3 Taxes sur le carburant	164
14.4 Lubrifiant.....	165
14.5 Entretien et réparations	166
14.5.1 Coût horaire de la main d'œuvre d'entretien	166
14.5.2 Coût moyen par 1000 véhicule-milles parcourus.....	167
14.6 Pneus	171
14.7 Valeur à neuf des véhicules	171
14.8 Dépréciation	173
14.8.1 Valeur résiduelle	173
14.8.2 Dépréciation liée au temps	173
14.9 Frais généraux	174
14.9.1 Frais d'immatriculation et du régime d'assurance collectif de la SAAQ.....	174
14.9.2 Frais d'assurance privée.....	175
14.10 Taux d'intérêts.....	175
14.11 Sommaire des coûts unitaires	176
CHAPITRE 15 VALEUR DU TEMPS	178
15.1 Salaires des conducteurs	178
15.2 Valeur du temps pour les conducteurs et les passagers.....	179
15.3 Taux d'occupation des véhicules	179
15.4 Proportion des déplacements liés au travail.....	180
15.5 Valeur du temps pour la marchandise.....	183
CHAPITRE 16 MODÉLISATION DES IMPACTS DES ÉMISSIONS	184
16.1 Utilisation des données par le HERS-ST, version 4.2	184
16.2 Données du MOTREM	185
16.3 Production des tableaux de coûts pour le HERS-ST.....	186
16.4 Intégration au HERS-ST	192
CHAPITRE 17 ÉTALONNAGE DES MODÈLES DU HDM-4	194
17.1 Problématiques particulières à l'étalonnage.....	195
17.2 Vitesse de déplacement	196
17.3 Consommation de carburant	199
17.4 Consommation en lubrifiant.....	200
17.5 Usure des pneus	201
17.6 Consommation en pièces détachées	204
17.7 Heures consacrées à l'entretien et aux réparations	209
17.8 Coûts en capital et en intérêts.....	211
17.9 Temps de transport	212
17.10 Conclusions relatives à l'étalonnage	213
CHAPITRE 18 LES RÉSULTATS OBTENUS.....	214
18.1 Résultats du HERS-ST.....	214
18.1.1 Vitesses de déplacement des véhicules.....	214
18.1.2 Coûts de fonctionnement à vitesse constante	216
18.1.3 Coûts marginaux de fonctionnement dus aux courbes.....	217
18.1.4 Coûts marginaux de fonctionnement dus aux cycles de changements de vitesse	217
18.1.5 CEV en fonction de l'état du revêtement	218

18.1.6	Coûts relatifs au temps de transport.....	219
18.1.7	Coûts des émissions de polluants et de gaz à effet de serre	221
18.2	Résultats du HDM-4	223
18.2.1	Résultats présentés en fonction de l'état du revêtement.....	223
18.2.2	Coûts en fonction de l'état du revêtement	225
18.2.3	Coûts selon la classe de route.....	226
18.2.4	Distribution relative des composantes des CEV	227
18.3	Analyse comparative des résultats obtenus des deux systèmes	229
18.3.1	Vitesse en régime libre	229
18.3.2	Coûts d'exploitation des véhicules.....	230
18.3.3	Consommation de carburant et de lubrifiant.....	232
18.3.4	Usure des pneus.....	232
18.3.5	Entretien et réparations	233
18.3.6	Dépréciation et coûts en capital.....	233
CHAPITRE 19 VALIDATION PRÉLIMINAIRE DES RÉSULTATS.....		235
19.1	Estimation de la vitesse.....	238
19.2	Carburant	239
19.3	Lubrifiant.....	240
19.4	Pneus	241
19.5	Entretien et réparations	241
19.6	Dépréciation	242
CHAPITRE 20 INTÉGRATION DES RÉSULTATS.....		244
20.1	Indicateurs de performance des coûts aux usagers.....	244
20.1.1	Résultats obtenus	247
20.1.2	Analyse des résultats.....	249
20.2	Production des équations de coûts	252
CONCLUSION		258
RECOMMANDATIONS		264
BIBLIOGRAPHIE		269

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Études majeures produites par la Banque Mondiale	20
Tableau 3.1 Planification de l'étude	30
Tableau 4.1 Particularités des systèmes de gestion études	45
Tableau 5.1 Valeurs PCSE par défaut dans HDM-4	69
Tableau 6.1 Modèles des systèmes HERS-ST et HDM-4	76
Tableau 6.2 Logique générale des équations des coûts d'exploitation (HERS-ST)	79
Tableau 6.3 Paramètres des équations de base (HERS-ST)	80
Tableau 6.4 Coûts unitaires d'exploitation des véhicules (HERS-ST)	82
Tableau 6.5 Logique d'allocation des coûts unitaires d'opérations	83
Tableau 6.6 Facteurs d'ajustement des taux de consommation (HERS-ST)	84
Tableau 6.7 Logique d'évaluation des facteurs d'ajustement	85
Tableau 7.1 Valeurs du temps de déplacement de HERS-ST (USD de 1995)	99
Tableau 8.1 Types de polluants modélisés par les deux systèmes	102
Tableau 8.2 Proportion des déplacements en fonction des classes fonctionnelles	105
Tableau 8.3 Équivalences des véhicules entre les modèles MOBILE6 et HERS-ST	106
Tableau 8.4 Équivalences des véhicules entre les modèles PART5 et HERS-ST	106
Tableau 8.5 Coûts unitaires des polluants (HERS-ST v.3.0)	108
Tableau 8.6 Équations dépendantes de la consommation de carburant	111
Tableau 9.1 Familles de routes à modéliser pour le SC	116
Tableau 10.1 Classification de comptages selon la longueur	120
Tableau 10.2 Classifications de comptages selon le nombre d'essieux	120
Tableau 10.3 Classification de l'ATA	123
Tableau 10.4 Tableau comparatif des différents systèmes de classification	124

Tableau 10.5	Correspondance entre la classification proposée et celle du HERS-ST ...	126
Tableau 11.1	Distribution par catégorie des véhicules en fonction la classe.....	127
Tableau 11.2	Fréquence par type de véhicules lourds	128
Tableau 11.3	Fréquence par type de véhicule lourd et par nombre d'essieux	128
Tableau 11.4	Extraction des véhicules enregistrés au Québec.....	129
Tableau 11.5	Données de circulation requises pour le HERS-ST	130
Tableau 12.1	Véhicules en circulation au Québec.....	132
Tableau 13.1	Synthèse des paramètres physiques (HDM-4)	137
Tableau 13.2	Calcul de la masse totale en charge des camions (tonnes métriques).....	139
Tableau 13.3	Synthèse des paramètres mécaniques (HDM-4).....	140
Tableau 13.4	Type de carburant utilisé par les camions.....	142
Tableau 13.5	Données sur la consommation de carburant	144
Tableau 13.6	Synthèse des paramètres des pneus (HDM-4).....	146
Tableau 13.7	Données sur l'utilisation des pneus.....	148
Tableau 13.8	Synthèse des paramètres d'utilisation (HDM-4).....	149
Tableau 13.9	Estimation du facteur d'ajustement du taux de dépréciation.....	151
Tableau 13.10	Utilisation des camions porteurs	157
Tableau 13.11	Utilisation des semi-remorques.....	158
Tableau 14.1	Exemple de calcul du coût économique des carburants.....	161
Tableau 14.2	Moyennes calculées du coût des carburants	163
Tableau 14.3	Taxes sur le carburant (cents/litre).....	164
Tableau 14.4	Facteurs de pondération sur les taxes sur le carburant	164
Tableau 14.5	Sommaire des coûts en entretien et en réparations (2006 CAD).	170
Tableau 14.6	Valeurs horaires de la dépréciation liée au temps	173
Tableau 14.7	Taux d'intérêt de différentes études.....	175
Tableau 14.8	Paramètres de coûts unitaires pour le HERS-ST.....	177

Tableau 14.9	Paramètres de coûts unitaires pour le HDM-4	177
Tableau 15.1	Coûts du temps de transport associés au camionnage	178
Tableau 15.2	Valeurs du temps de déplacement.....	179
Tableau 15.3	Taux d'occupation des véhicules légers au Canada et aux États-Unis	180
Tableau 15.4	Répartitions des motifs de déplacements pour 5 régions urbaines	181
Tableau 15.5	Nature des déplacements de véhicules au Canada (EVC, 2000).....	182
Tableau 15.6	Répartition des motifs de déplacements au Canada	182
Tableau 15.7	Estimation du coût de l'inventaire à partir des données de l'ERN 1998	183
Tableau 16.1	Variables considérées dans la modélisation des émissions	184
Tableau 16.2	Types de polluants modélisés.....	189
Tableau 16.3	Impacts économiques des émissions polluantes selon la vitesse	192
Tableau 16.4	Coefficients de régression pour l'estimation des émissions polluantes ...	193
Tableau 17.1	Paramètres liés à la contamination du lubrifiant	201
Tableau 17.2	Variables d'étalonnage du modèle d'usure des pneus	203
Tableau 17.3	Étalonnage du modèle de consommation de pièces	207
Tableau 17.4	Étalonnage du modèle de prévision des heures affectées à l'entretien.....	210
Tableau 17.5	Répartition des coûts en remplacement des pièces	211
Tableau 17.6	Effets de l'IRI sur la durée de vie des véhicules	212
Tableau 18.1	Tableau comparatif des résultats du HERS-ST et du HDM-4.....	231
Tableau 19.1	Vitesse en régime libre en fonction de la législation	239
Tableau 19.2	Valeurs relatives à l'entretien et aux réparations des véhicules	242
Tableau 19.3	Heures consacrées à l'entretien (heures par 1000 VKP).....	242
Tableau 20.1	Analyse de contrainte par performance par catégories de coûts.....	248
Tableau 20.2	Analyse de contrainte par performance par coûts visés	249
Tableau 20.3	Distribution des véhicule-kilomètres par catégorie de camions	255
Tableau 20.4	Coefficients des équations de coûts d'exploitation des véhicules.....	256

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Allocation des coûts aux usagers et à la collectivité.	11
Figure 4.1 Éléments du système HERS-ST.	34
Figure 4.2 Méthodologie du HERS-ST.	34
Figure 4.3 Interrelations des modèles de prédiction du HERS-ST.	37
Figure 4.4 Architecture du HDM-4.	39
Figure 4.5 Interactions entre les modèles d'effets sur les usagers (HDM).	43
Figure 4.6 Principe de la gestion des chaussées (GCH-6011).	44
Figure 5.1 Courbes de l'offre sur la demande en transport.	56
Figure 5.2 Circulation et demande induite.	59
Figure 5.3 Accroissement de la circulation et élasticité de la demande.	60
Figure 5.4 Forces agissant sur un véhicule.	62
Figure 5.5 Modèle HDM-4 de la vitesse en fonction du débit.	70
Figure 5.6 Fréquences de l'amplitude des accélérations.	72
Figure 5.7 Distribution observée des fréquences.	73
Figure 6.1 Méthodologie de calcul des coûts d'exploitation.	78
Figure 8.1 Logique de modélisation des coûts des émissions (HERS-ST).	104
Figure 8.2 Émissions du système d'échappement d'une voiture.	113
Figure 14.1 Graphique de l'évolution des prix à la pompe.	162
Figure 14.2 Graphique de l'évolution du taux d'intérêt au Canada (10 ans).	176
Figure 16.1 Évolution des valeurs liées aux impacts environnementaux.	191
Figure 17.1 Influence du kilométrage cumulé sur les coûts en pièces de rechange.	206
Figure 17.2 Réparations et entretien en fonction de l'état du revêtement.	208
Figure 18.1 Réparations et entretien en fonction de l'état du revêtement.	215

Figure 18.2	CEV en fonction de la vitesse (HERS-ST).	216
Figure 18.3	CEV en fonction des cycles de changements de vitesse (HERS-ST).	218
Figure 18.4	CEV en fonction de l'état du revêtement (HERS-ST).	219
Figure 18.5	Délais moyens en fonction du RDC (HERS-ST).	220
Figure 18.6	Coûts marginaux liés au temps de transport en fonction du RDC.	221
Figure 18.7	Impacts environnementaux	222
Figure 18.8	Impacts environnementaux selon la classe de route.	222
Figure 18.9	Vitesses en régime libre pour une autoroute (HDM-4).	224
Figure 18.10	CEV en fonction de l'IRI pour une autoroute (HDM-4).	225
Figure 18.11	CEV moyens selon la classe et le milieu de la route (HDM-4).	227
Figure 18.12	Distributions relatives des composantes des CEV (HDM-4).	228
Figure 18.13	Analyse comparative des CEV en fonction de la vitesse.	232
Figure 18.14	Coûts marginaux de la dépréciation en fonction de l'IRI.	234
Figure 19.1	Comparaison entre les prédictions des modèles	237
Figure 19.2	Consommation comparée de carburant en fonction de la vitesse.	240
Figure 20.1	Interface d'entrée des facteurs de pondération (HERS-ST).	245

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

α	Consommation instantanée de carburant à la vitesse de révolution minimale du moteur
σ_a	Bruit de l'accélération (HDM-4)
σ_{at}	Bruit de l'accélération attribuable aux interactions des véhicules (HDM-4)
σ_{an}	Bruit de l'accélération naturelle par type de véhicule (HDM-4)
ξ	Facteur d'efficacité de transmission de la puissance
ξ_b	Facteur d'efficacité de base du moteur du véhicule
ϵ_i	Efficacité maximale du catalyseur pour l'émission i
a0 et a1	Coefficients de régression des modèles du HDM-4
a0jk, a1jk...	Coefficients du modèle pour le véhicule k et la route j (équations SC)
AAC	Analyse avantages-coûts
AAGRSL	Taux de croissance linéaire du débit de circulation (HERS-ST)
AADT	Débit actuel (HPMS)
AADTGR	Taux de croissance exponentielle positive du débit de circulation (HERS-ST)
AADT _{t0}	Débit au temps t ₀ (HERS-ST)
AADT _{t1}	Débit au temps t ₁ (HERS-ST)
AADTYR	Année du débit actuel (HPMS)
AASHTO	Association américaine des administrations routières
aCO2	Paramètre représentant un ratio d'atomes d'hydrogène (HDM-4)
ACV	Analyse sur le cycle de vie
ACQ	Association du camionnage du Québec
ACR	Ratio DJMA-capacité
ADB	Banque asiatique de développement

ADTBS	Distance moyenne parcourue entre chaque arrêt
AES	Vitesse effective moyenne
AIPCR	Association internationale permanente des congrès de la route
AMT	Agence métropolitaine de transport (Montréal)
ANCAI	Association nationale des camionneurs artisans (Québec)
APVLM	<i>Aggregate Probabilistic Limiting Velocity Model</i>
ARFCOM	<i>Australian Road Fuel Consumption Model</i>
ARRB	Bureau australien de recherche en transport (Australie)
ARVMAX	Vitesse maximale de déplacement vertical de la suspension (HDM-4)
ATA	Association américaine du camionnage (États-Unis)
ATC	Association des transports du Canada
BAD/AfDB	Banque africaine de développement
b_i	Coefficient stœchiométrique d'un catalyseur
BLS	Bureau des statistiques sur le travail (États-Unis)
BM	Banque Mondiale
CA	Coûts attribuables aux accidents routiers (HERS-ST)
CAA	Association canadienne de l'automobile
CAD	Dollar Canadien
CE	Coûts attribuables aux émissions polluantes (HERS-ST)
CEV	Coûts d'exploitation des véhicules
CEVAN j	CEV total annuel sur la section j (équations SC)
CEVU jk	CEV/VKP pour le véhicule k sur une route du type j (équations SC)
CEVUCAM j	CEV/VKP moyen pour les véhicules lourds sur la section j (équations SC)
CEVUVLEG j	CEV/VKP moyen pour les véhicules légers sur la section j (équations SC)
CFC	Consommation marginale de carburant attribuable aux courbes

CFI	Force circonférentielle
CFV	Coût de fonctionnement d'un véhicule
CGL	Longueur critique d'une pente
CKM	Kilométrage cumulatif
CMR	Entretien marginal attribuable aux courbes (HERS-ST)
CO	Monoxyde de carbone
COV	Composés organiques volatiles
CO ₂	Dioxyde de carbone
COPCST _{vt}	CFV/VMP attribuables au tracé en plan
COSFCvt	Coût d'un gallon de carburant (HERS-ST)
COSMRvt	Coût d'entretien par 1000 VMP (HERS-ST)
COSOCvt	Coût d'une pinte de lubrifiant (HERS-ST)
COSTWvt	Coût d'un pneu (HERS-ST)
COSVDvt	Valeur du véhicule (HERS-ST)
CPCON	Facteur d'élasticité pour la congestion (HDM-4)
CPF _i	Fraction de l'émission <i>i</i> non traitée par le catalyseur (HDM-4)
CSFC	Consommation de carburant à vitesse constante (HERS-ST)
CSMAX	Vitesse maximale d'un véhicule pendant le cycle de changement de vitesse (HERS-ST)
CSMR	Entretien à vitesse constante à vitesse constante (HERS-ST)
CSOC	Consommation de lubrifiant à vitesse constante (HERS-ST)
CSOPCST _{vt}	CFV/VMP à vitesse constante
CSTW	Usure des pneus à vitesse constante (HERS-ST)
CSVD	Dépréciation à vitesse constante (HERS-ST)

CTW	Usure marginale des pneus attribuable aux courbes (HERS-ST)
CRAWLS	Vitesse maximale d'ascension d'une pente abrupte par un camion
CRRRI	Centre de recherche routière indien (Inde)
CTCQ	Comité technique du camionnage du Québec
CTT	Coûts attribuables au temps de transport (HERS-ST)
D _{cong}	Délais attribuables à la congestion (HERS-ST)
DENG	Cylindrée du moteur
dFUEL	Consommation additionnelle de carburant attribuable aux cycles de changements de vitesse (HDM-4)
dFUELavg	Consommation additionnelle moyenne de carburant attribuable aux cycles de changements de vitesse (HDM-4)
D _{inc}	Délais attribuables aux incidents routiers (HERS-ST)
DISTOT	Distance parcourue par une carcasse de pneu
DISTCHNG	Distance entre les changements d'huile
DJMA	Débit journalier moyen annuel
DJMAi	débit journalier moyen annuel pour la section i (équations SC)
DLC	Direction du laboratoire des chaussées (MTQ)
DP	Direction de la planification (MTQ)
D _{sig}	Délais attribuables aux dispositifs de contrôle de la circulation (HERS-ST)
DT	Direction territoriale (MTQ)
DTRM	Direction du transport routier et des marchandises (MTQ)
EC	Coefficient de régression (émissions polluantes, HERS-ST)
edt	Facteur d'efficacité de la transmission
EF1...EF6	Coefficients de régression (émissions polluantes, HERS-ST)
ehp	Décroissance proportionnelle de l'efficacité à haut régime

EmCost	Impact économique des émissions (HERS-ST)
EOEi	Émissions de type i par le moteur (HDM-4)
EPA	Agence de protection de l'environnement (États-Unis)
EQNT	Nombre équivalent de pneus consommés (HDM-4)
ERN1999	Enquête routière nationale de 1999
ETC	Examen de la totalité des coûts en transports au Canada
ETSU	<i>Energy Technology Support Unit</i> (Royaume-Uni)
EU	États-Unis
EVC	Enquête sur l'utilisation des véhicules au Canada
Fa	Résistance aérodynamique
FAADT	Débit prévu (HPMS)
FAADTYR	Année du futur prévu (HPMS)
Fc	Résistance attribuable au tracé en plan
FC	Consommation de carburant (HDM-4)
FCCONG	Consommation de carburant attribuable à la congestion (HDM-4)
FCmin	Consommation minimale de carburant (au ralenti)
FCSTEADY	Consommation de carburant à vitesse constante (HDM-4)
FEAFvt	Facteur d'ajustement de l'efficacité pour la consommation de carburant (HERS-ST)
FFS	Vitesse en régime libre
FFSUD	Vitesse en régime libre des véhicules lourds sur une pente ascendante
Fg	Résistance due à la pente
FHWA	Administration fédérale des routes (États-Unis)
Fi	Résistance inertielle

FMR	Fichier maître-réseau (MTQ)
Fr	Résistance au roulement
Ft	Force de traction du véhicule
GCH-6011	Système de gestion des chaussées (MTQ)
GES	Gaz à effet de serre
HC	Hydrocarbures
HCAS	<i>Highway Cost Allocation Study</i> (FHWA)
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i> (TRB)
HDM-RUE	<i>Highway Development and Management Road Users Effects</i>
HDM-III	<i>Highway Design and Maintenance System</i> (Banque Mondiale)
HDM-4	<i>Highway Development and Management System</i> (Banque Mondiale)
HERS	<i>Highway Economic Requirement System</i> (FHWA)
HERS-ST	<i>Highway Economic Requirement System, State Version</i> (FHWA)
HPMS	<i>Highway Performance Management System</i> (FHWA)
HTRS	<i>Highway Development and Management Technical Relationship Study</i>
IFC	Consommation instantanée de carburant
IKRAM	Institut Kerja Raya Malasia (Malaisie)
IPC	Indice des prix à la consommation
IPI	Indice des prix à l'industrie
IRI	Indice de rugosité international
ISOHDM	<i>International Study Of Highway Developpement and Management</i>
K0pc	Facteur de rotation du modèle des pièces de rechange (HDM-4)
K0lh	Facteur de rotation du modèle de la main d'œuvre d'entretien (HDM-4)
K1pc	Facteur de translation du modèle des pièces de rechange (HDM-4)
K1lh	Facteur de translation du modèle de la main d'œuvre d'entretien (HDM-4)

IRRE	<i>International Road Roughness Experiment</i> (Banque Mondiale)
LFT	Force latérale
LGSEGi	Longueur de la section i (équations SC)
LH	Consommation en main d'œuvre (HDM-4)
LIFE	Âge du véhicule
LTTP	<i>Long-Term Pavement Performance</i>
MassFuel	Masse volumique du carburant
MDFi	Facteur maximum de détérioration pour l'émission i (HDM-4)
MOBILE	<i>Mobile Source Factor Model</i> (EPA)
MoTH	Ministère des transports et des routes (Colombie-Britannique)
MOTREM	Modèle de transport de la région de Montréal (MTQ)
MPH	Mille(s) par heure
MRAFvt	Facteur d'ajustement de l'entretien d'un véhicule de carburant (HERS-ST)
MTC	Masse totale en charge
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NAFA	Association nationale des administrateurs de flotte (États-Unis)
NFT	Force normale
NHTS	<i>National Highway Transportation Study</i>
NITR	Taux de déplacement ou inverse de la vitesse
NO _x	Oxydes d'azote
NR	Nombre de rechapages calculé (HDM-4)
NR0	Nombre de rechapages par défaut (HDM-4)
NRS	<i>National Road Survey</i> (États-Unis)
NZ-VOC	Modèle des coûts d'exploitation des véhicules (Nouvelle-Zélande)

OCAFvt	Facteur d'ajustement de l'efficacité pour la consommation de carburant (HERS-ST)
O-D	Origine-Destination (enquête)
ODA	Agence de développement international (Royaume-Uni)
OEE	Office de l'efficacité énergétique (Canada)
OIL	Consommation de lubrifiant
OILCAP	Contenu de lubrifiant du moteur
OILCONT	Perte de lubrifiant attribuable à la contamination
OILOPER	Consommation de lubrifiant attribuable au fonctionnement (HDM-4)
ORNL	<i>Oak Ridge National Laboratory</i> (États-Unis)
Paccs	Puissance requise pour le fonctionnement des accessoires
PARTS	Consommation en pièces de rechange (HDM-4)
Pb	Puissance de freinage du moteur
PC	Coût en pièces de rechange (HDM-4)
PCSE	<i>Passenger Car Space Equivalent</i> (HDM-4)
PCU	Unité de véhicule particulier (HCM)
Pd	Puissance du moteur
PDSF	Prix de détail suggéré par le fabricant
Peng	Puissance requise pour contrecarrer la friction interne du moteur
PM	Matières particulaires
PNBV	Poids nominal brut d'un véhicule
Prat	Puissance nominale du moteur
PREC	Ratio de coûts des pneus réchappés-neufs (HDM-4)
PSR	<i>Present serviceability rating</i>
PSBR	point de rupture de l'évolution de la vitesse en fonction de la valeur du PSR

P _{tot}	Puissance totale requise
P _{tr}	Puissance requise pour contrecarrer les forces s'opposant au mouvement
PVEHLO _i	Pourcentage de véhicules lourds sur la section i (équations SC)
Q _{nom}	Débit à capacité nominale
Q _{ult}	Débit à capacité ultime
R	Rayon de courbure moyen
RBC	Ratio bénéfices-coûts
RDC	Ratio débit-capacité
RED	<i>Road Economic Decision Model</i> (Banque Mondiale)
r _i	Facteur de détérioration relié à l'âge pour l'émission i
RI	Indice de rugosité utilisé par le modèle
RI _{mod}	Indice modifié de rugosité
S	Vitesse moyenne sur une section (HDM-4)
SAAQ	Société de l'assurance automobile du Québec
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (É.-U.)
SC	Service des chaussées (MTQ)
SFC	Consommation de carburant
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SMST	Service de la modélisation et des systèmes de transports (MTQ)
S _{nom}	Vitesse à capacité nominale
SNRA	Administration suédoise nationale des routes (Suède)
SOS	Service des orientations stratégiques (MTQ)
SO _x	Oxydes de soufre
SPEEDBIAS	Facteur de correction du biais de la vitesse (HDM-4)

TC	Transports Canada
TPECO	Émissions en CO du système d'échappement
TPECO2	Émissions en CO2 du système d'échappement
TPEHC	Émissions en HC du système d'échappement
TPEi	Émissions du système d'échappement
TPEPM	Émissions en PM du système d'échappement
TPS	Taxe sur les produits et services
TRAC	<i>Washington State Transportation Research Center (É.-U.)</i>
TRAVF	Proportion annuelle des déplacements pour une période (HERS-ST)
TRB	<i>Transportation Research Board (É.-U.)</i>
TRDF	<i>Transportation Research and Development Foundation (É.-U.)</i>
TRDI	<i>Transportation Research and Development Institute (É.-U.)</i>
TRL	<i>Transportation Research Laboratory Limited (R.-U.)</i>
TVQ	Taxe de vente du Québec
TWAFvt	Facteur d'ajustement du taux d'usure des pneus (HERS-ST)
TWT	Taux d'usure de la gomme d'un pneu
UE	Union européenne
Uni	Uniformité longitudinale du revêtement
USD	Dollar des États-Unis
UVP	Unité de véhicule particulier
V	Vitesse du véhicule (HDM-4)
VCR	Ratio débit-capacité (HERS-ST)
VCRPP	Ratio débit-capacité désagrégé pour une période (HERS-ST)
VDAFvt	Facteur d'ajustement du taux de dépréciation d'un véhicule (HERS-ST)
VHR	Véhicule hors-route

VKP	Véhicule-kilomètres parcourus
VMP	Véhicule-milles parcourus
VTI	Institut de recherche en transports (Suède)
VTPI	<i>Victoria Transport Policy Institute (Canada)</i>
VCURVE	Vitesse maximale en fonction du tracé en plan (BM)
VBRAKE	Vitesse maximale selon la puissance de freinage en pente descendante (BM)
VDESIR	Vitesse maximale attribuable à la perception du conducteur (BM)
VDRIVE	Vitesse maximale selon la puissance du moteur (BM)
VROUGH	Vitesse maximale en fonction de l'uni (BM)
VSPLIM	Vitesse maximale en fonction de la vitesse prescrite (TRDF)
VOL	Volume gomme d'un pneu
VUS	Véhicule utilitaire sport
VSFC	Consommation marginale de carburant attribuable aux cycles de changements de vitesse (HERS-ST)
VSMR	Entretien marginal attribuable aux cycles de changements de vitesse (HERS-ST)
VSOC	Consommation marginale de lubrifiant attribuable aux cycles de changements de vitesse (HERS-ST)
VSOPCST _{vt}	CFV/VMP attribuables aux cycles de changement de vitesse (HERS-ST)
VSS	Vitesse instantanée en écoulement libre en un point sur la section
VSTW	Usure marginale des pneus attribuables aux cycles de changements de vitesse (HERS-ST)
VSVD	Dépréciation marginal attribuable aux cycles de changements de vitesse (HERS-ST)

z0	Coefficient des modèles de résistance au roulement et aérodynamique
z1	Coefficient des modèles de résistance au roulement, aérodynamique et gravitationnelle
ZUDSIG	Délai minimum attribuable à la présence de dispositifs de contrôle de la Circulation (HERS-ST)

INTRODUCTION

La situation qui prévaut relativement à l'exploitation du réseau routier justifie une amélioration en continu des procédures de gestion des infrastructures par l'administration publique.

Ces procédures ont grandement été validées du point de vue de la priorisation des interventions sur la base du cycle de vie économique des infrastructures.

Bien que tout à fait valables, ces procédures ne prennent pas en compte la totalité des coûts amortis par la société; laquelle est constituée, en partie, des contribuables et, plus particulièrement, des utilisateurs du réseau routier.

Ces coûts consistent en des coûts aux usagers de la route et à la collectivité.

Toutefois, bien qu'il existe au ministère des Transports du Québec comme au sein d'autres administrations routières certaines méthodologies relatives à l'évaluation des impacts économiques des travaux routiers sur les usagers, cet aspect de la microéconomie des transports n'a pas été intégré aux procédures d'une gestion élargie des actifs routiers.

L'adoption d'une telle pratique apporterait un éclairage plus global quant à la prise de décision relative aux investissements, sur la base de la rentabilité économique.

Cette recherche porte sur l'adaptation au contexte québécois des modèles de coûts aux usagers (et à la collectivité) des systèmes HERS-ST³ et HDM-4⁴.

³ Produit par la *Federal Highway Administration* du *Department of Transportation* des États-Unis.

⁴ Produit sous l'égide de la Banque Moniale.

Cette étude vise à permettre à des exploitants de réseaux routiers tels que le ministère des Transports du Québec d'intégrer la prise en considération des effets subis par les usagers aux procédures actuelles d'analyses technico-économiques.

Ce mémoire rapport décrit de manière successive le contexte et l'importance des coûts aux usagers et à la collectivité dans le cadre de la gestion du réseau routier (chapitre 1); la revue de littérature effectuée (chapitre 2); la méthodologie adoptée pour l'évaluation des coûts aux usagers à l'aide des outils sélectionnés pour l'étude (chapitre 3); la présentation des systèmes de gestion des infrastructures routières HERS-ST et HDM-4 et leur applicabilité (chapitre 4); la description technique des modèles utilisés (chapitres 5 à 8); le sommaire des différents paramètres requis en vue de l'adaptation des modules de coûts aux usagers (chapitres 9 à 15); une mise au point sur l'intégration de la modélisation des émissions au HERS-ST (chapitre 16); l'étalonnage des modèles de coûts d'exploitation des véhicules du HDM-4 (chapitre 17); les résultats obtenus et la validation de ces derniers (chapitre 18 et 19) ainsi que l'élaboration de certaines procédures d'intégration des résultats à des outils actuellement utilisés (chapitre 20).

CHAPITRE 1

CONTEXTE

1.1 Contexte

L'exploitation du réseau routier provincial nécessite différents types d'analyses relativement à l'affectation des ressources aux diverses composantes du patrimoine routier.

Plus particulièrement, la gestion durable de ces infrastructures implique un suivi de la performance, sur une base temporelle, de chacun des tronçons routiers qui sont sous la responsabilité de l'administration routière.

Dans la perspective de promouvoir l'efficacité économique de la gestion du réseau routier et les intérêts des usagers de la route, certaines méthodes d'évaluation des coûts relatifs à la gestion du réseau sont intégrées aux processus de gestion à court et à long terme (i.e. programmation et analyse stratégique) du ministère des Transports du Québec et d'autres administrations routières.

Ces méthodologies, qui permettent l'optimisation de l'allocation des ressources, se concentrent au niveau des investissements relatifs à l'entretien, à la réfection et à la construction des infrastructures et tiennent compte des bénéfices qui en découlent directement.

Toutefois, ces procédures ne permettent généralement pas une quantification de l'ensemble des bénéfices reliés à la mise en œuvre des investissements qui profitent à la collectivité québécoise.

En particulier, certains de ces bénéfices touchent les usagers de la route tandis que, de manière plus générale, d'autres sont ressentis par la population dans son ensemble, tels que ceux liés aux émissions de polluants.

Un bilan inclusif des conséquences administratives, économiques et environnementales relatives à l'exploitation du réseau routier permettrait une évaluation plus réaliste de l'impact de l'état des infrastructures routières sur la compétitivité économique de la société québécoise.

La quantification des bénéfices aux usagers de la route se concrétise par une évaluation de la réduction des coûts qui sont tributaires à l'amélioration de la qualité et de la performance du réseau routier dans le temps.

Les coûts que l'on peut qualifier de directement absorbés par l'utilisateur de la route sont ceux attribuables à l'exploitation des véhicules; plus précisément ceux reliés au fonctionnement et à la propriété des véhicules.

Le premier type représente donc les coûts reliés à la consommation de carburant, de lubrifiant, de pièces de rechange, de pneus, à l'entretien du véhicule, à la dépréciation liée à l'usage ainsi qu'au temps du conducteur.

Les coûts de propriété englobent ceux relatifs à la dépréciation temporelle, à l'immatriculation et aux autres frais généraux.

Dans le second type de coûts, soit la catégorie des coûts sociaux, il y a ceux relatifs aux conséquences environnementales; plus particulièrement les coûts qui relèvent de la problématique des émissions polluantes et des gaz à effet de serre.

En ce qui concerne les impacts du temps de transport, bien qu'ils touchent particulièrement les usagers du réseau, certaines des conséquences du niveau de service des différents segments de routes se répercutent également sur une part élargie de la société; appréciées principalement par une estimation de la perte de productivité.

Ces dernières années, le ministère des Transports du Québec (MTQ) a exprimé son intérêt à inclure les coûts qui sont assumés par les usagers et la collectivité dans le cadre de ses procédures de gestion du réseau routier provincial.

Par le fait même, des travaux de recherche portant sur la définition et l'évaluation des coûts aux usagers de la route et à la collectivité ont donc été réalisés à l'École de technologie supérieure et ont fait l'objet de trois rapports déjà soumis au MTQ (Roy et *al.*, 2006, Roy et *al.*, 2007a et Roy et *al.*, 2007b). En effet, l'étude intitulée «Adaptation au contexte québécois des modules de coûts aux usagers du HERS-ST et du HDM-4» (Roy et *al.*, 2007b) constitue la fondation du travail présenté dans ce mémoire.

1.2 Problématique

Le manque d'informations relativement au coût moyen de transport assumé par l'utilisateur québécois relativement à l'influence de la qualité et de la performance (dans le temps), des infrastructures routières, justifie en soi une étude ciblée portant sur les procédures existantes d'évaluation de ces types de coûts et de la possibilité de les récupérer et de les intégrer dans divers types d'analyses.

Ainsi, il s'agit de mettre en relation les bilans de performance du réseau routier, au niveau de l'état du revêtement, du niveau de service et, éventuellement, des évaluations énergétiques, en vue d'effectuer l'évaluation des conséquences de différents scénarios d'investissements. Ces éléments nécessitent une recherche intensive par rapport aux données existantes et à l'état de l'art relativement à l'évaluation de ce type de coûts et des bénéfices qui en découlent. De fait, l'analyse des stratégies et des scénarios d'investissements sur le réseau routier passe par la modélisation des effets économiques sur l'utilisateur en considérant certaines caractéristiques moyennes de la route et, au besoin, en la réalisant section par section.

Puisque, antérieurement au projet dont il est question dans ce mémoire, les différentes modélisations et applications en matière de coûts aux usagers ont été effectuées à l'extérieur du Québec et à d'autres époques, une préoccupation de ce projet de recherche consiste à évaluer le niveau d'adaptabilité des procédures et des modèles aux conditions typiquement québécoises.

Cet arrimage aux efforts développés dans des contextes différents requiert également de définir des conditions qui sont représentatives de la flotte de véhicules en circulation, du climat, de l'économie et de la configuration du réseau routier québécois.

Enfin, les résultats de cet arrimage des modèles développés dans des contextes différents et ajustés aux conditions québécoises les plus représentatives, doivent concorder avec les différentes études économiques des coûts aux usagers et à la collectivité récemment publiées au Québec ou au Canada.

Bien évidemment, et dans la mesure du possible, cette concordance doit tenir compte des conditions d'utilisation des véhicules caractéristiques à chacune des publications.

Également nécessaires, l'adaptation et le paramétrage des modèles doivent répondre à des critères de facilité de mise en œuvre et de flexibilité d'utilisation en vue de leur inclusion dans les procédures et les outils de gestion existants, et ce, à la mesure des besoins des deux différentes entités ministérielles impliquées.

1.3 Objectifs à l'origine de l'étude commandée par le MTQ

Le travail effectué vise à établir le fondement des paramètres de référence à utiliser pour représenter les caractéristiques et l'utilisation du réseau routier provincial ainsi qu'à dresser une méthodologie d'évaluation des coûts aux usagers de la route.

Cet objectif principal double implique le paramétrage des modèles d'évaluation des coûts aux usagers déjà intégrés à des systèmes de gestion des infrastructures routières.

Le chapitre 3 de ce mémoire présente la méthodologie adoptée alors que le chapitre 4 décrit les outils utilisés, par le MTQ et dans le cadre du mandat octroyé par ce dernier, afin d'assurer le respect des objectifs énumérés ci-dessus.

1.3.1 Service des Orientations stratégiques

Composante de la direction de la Planification, la responsabilité du Service des Orientations Stratégiques (SOS) est d'établir des prévisions à moyen et à long termes en lien avec les axes de la conservation, de l'amélioration et du développement du réseau routier exploité par le Ministère.

À cet effet, divers aspects des coûts aux usagers et à la collectivité sont déjà identifiés lors des procédures d'analyses technico-économiques réalisées par le SOS.

Dans le cadre des analyses de scénarios, le SOS a recours, depuis peu, au système de gestion des infrastructures routières *Highway Economic Requirement System, State Version* (HERS-ST).

Parmi les composantes de cet outil, un module d'évaluation inclut les coûts de fonctionnement des véhicules, ceux relatifs au temps de transport ainsi que l'évaluation économique de l'impact des émissions polluantes.

Le paramétrage des modèles sous-jacents à ce module a été rendu nécessaire afin de permettre l'exploitation du HERS-ST.

Ainsi, les principaux objectifs du SOS stratégiques sont :

- l'adaptation au contexte québécois du volet des coûts aux usagers sous-jacent au HERS-ST;
- la production de fichiers paramétrés (format du HERS-ST);
- la proposition d'une pondération des indices de performances intégrant les coûts aux usagers.

1.3.2 Service des Chaussées

Le Service des Chaussées (SC), qui est assimilé à la Direction du laboratoire des chaussées, répond à des charges relatives à l'axe conservation des chaussées exploitées par le Ministère.

À l'instar du SOS, le SC dispose d'un système de gestion fournissant un soutien aux décisions dans le cadre de l'analyse des investissements en conservation des chaussées.

Dans l'optique de poursuivre l'amélioration des procédures de gestion des projets de réfection, le SC a exprimé son intérêt à intégrer les coûts aux usagers aux analyses visant l'ordonnancement et l'analyse prioritaire des interventions.

À cet effet, les fonctions de l'éventuelle modélisation des coûts aux usagers devront permettre la prise en charge de ces derniers de manière distinctive pour chaque segment. De plus, le modèle à développer devra être alimenté à partir des champs de données tels que présentés dans le Fichier Maître Réseau; c'est-à-dire le fichier au sein duquel les données sur le réseau, servant à alimenter le module d'analyse du système de gestion des chaussées, sont stockées et mises à jour sur une base régulière. Les axes de gestion, liés à l'amélioration et au développement du réseau, ne font pas partie du mandat de ce Service.

Ce statut est souligné puisqu'il a dicté la méthodologie d'évaluation des coûts aux usagers de la route; principalement dans le choix des paramètres qui en sont tributaires. De cette manière, les facteurs exclusivement liés à la géométrie et la capacité des segments routiers ne sont pas retenus. Cela a comme avantage de permettre un allègement de la procédure d'évaluation à intégrer au système de gestion des chaussées exploité par le SC.

Les deux principaux objectifs du SC tels qu'exigés dans le cadre du mandat précédemment octroyé par le MTQ sont :

- l'adaptation et l'opérationnalisation du module d'évaluation des coûts aux usagers du *Highway Development and Management System* (HDM-4);

- l'élaboration d'une procédure d'intégration des résultats du module du HDM-4 au système de gestion des chaussées du Ministère (système GCH-6011).

Dans le but de préciser le dernier point, il faut mentionné que, pour le SC, l'objectif principal consiste à établir la série d'équations qui permettront au système de gestion des chaussées du MTQ de calculer lui-même les coûts aux usagers de chaque segment du réseau routier. Le calcul sera établi en fonction des caractéristiques jugées pertinentes par l'étude, dont, entre autres, l'indice de rugosité international (IRI), le débit journalier moyen annuel (DJMA) et le milieu (i.e. rural ou urbain).

1.4 Terminologie associée à l'évaluation des coûts aux usagers

Cette section précise, au niveau terminologique, les termes techniques utilisés dans ce document.

Du point de vue de l'évaluation des coûts aux usagers de la route, une ressource est un produit ou un bien consommé lors de l'utilisation d'un véhicule. Les différents types de ressources sont définis comme étant le carburant, le lubrifiant, les pièces de rechanges, les heures affectées à l'entretien et aux réparations, la valeur dépréciative d'un véhicule, etc.

Le **lubrifiant** est une substance qui recouvre deux ou plusieurs pièces en mouvement relatif (terme équivalent : huile). Dans le cadre de la présente étude, seul le lubrifiant du moteur est considéré de manière distincte; les autres types de lubrifiants étant considérés dans la composante des coûts d'entretien et de réparations des véhicules.

Le **carburant** est un produit combustible destiné à fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement d'un moteur. Dans le texte qui suit, le terme carburant peut référer à différents types d'hydrocarbures à savoir l'essence automobile, le diesel ou aux deux à la fois.

Les **coûts aux usagers** sont, de manière élargie, tous les coûts qui sont pris en charge par les utilisateurs du réseau routier. Par exemple, certains coûts liés à l'insécurité routière

sont amortis par les usagers alors que d'autres se répercutent sur l'ensemble de la collectivité.

Les **coûts d'exploitation des véhicules** représentent les coûts absorbés par le détenteur ou le responsable d'un véhicule automobile. Ces coûts incluent autant les coûts de fonctionnement que les frais relatifs à la propriété d'un véhicule, par exemple, la perte en capital liée à l'âge du véhicule et les frais de financement.

Les **coûts de fonctionnement des véhicules** incluent, en tout ou en partie, les composantes de coûts que les usagers doivent endosser lorsqu'un véhicule est en marche. Les coûts attribuables au fonctionnement des véhicules proviennent de la consommation des ressources telles que le carburant, le lubrifiant pour moteur, les pièces mécaniques, les pneus ainsi que la proportion de la dépréciation qui est associée à l'utilisation du véhicule sur la route par opposition à l'âge de ce dernier.

Les **coûts à la collectivité** englobent l'ensemble des coûts générés par l'exploitation d'un réseau routier, soit les coûts à l'administration, les coûts aux usagers et les coûts à la société en général. En ce qui a trait aux coûts sociaux, il s'agit, d'une perspective élargie, des conséquences associées aux accidents de la route, à la congestion, aux émissions des véhicules, au bruit, à la consommation énergétique et à la destruction des milieux naturels. Dans le cadre du travail visé par ce mémoire, seuls les coûts liés au temps de transport et aux émissions des véhicules ont été examinés.

La Figure 1.1 Allocation des coûts aux usagers et à la collectivité illustre les principaux types de coûts et les impacts de l'état et du niveau de service du réseau routier sur les usagers et la société en général.

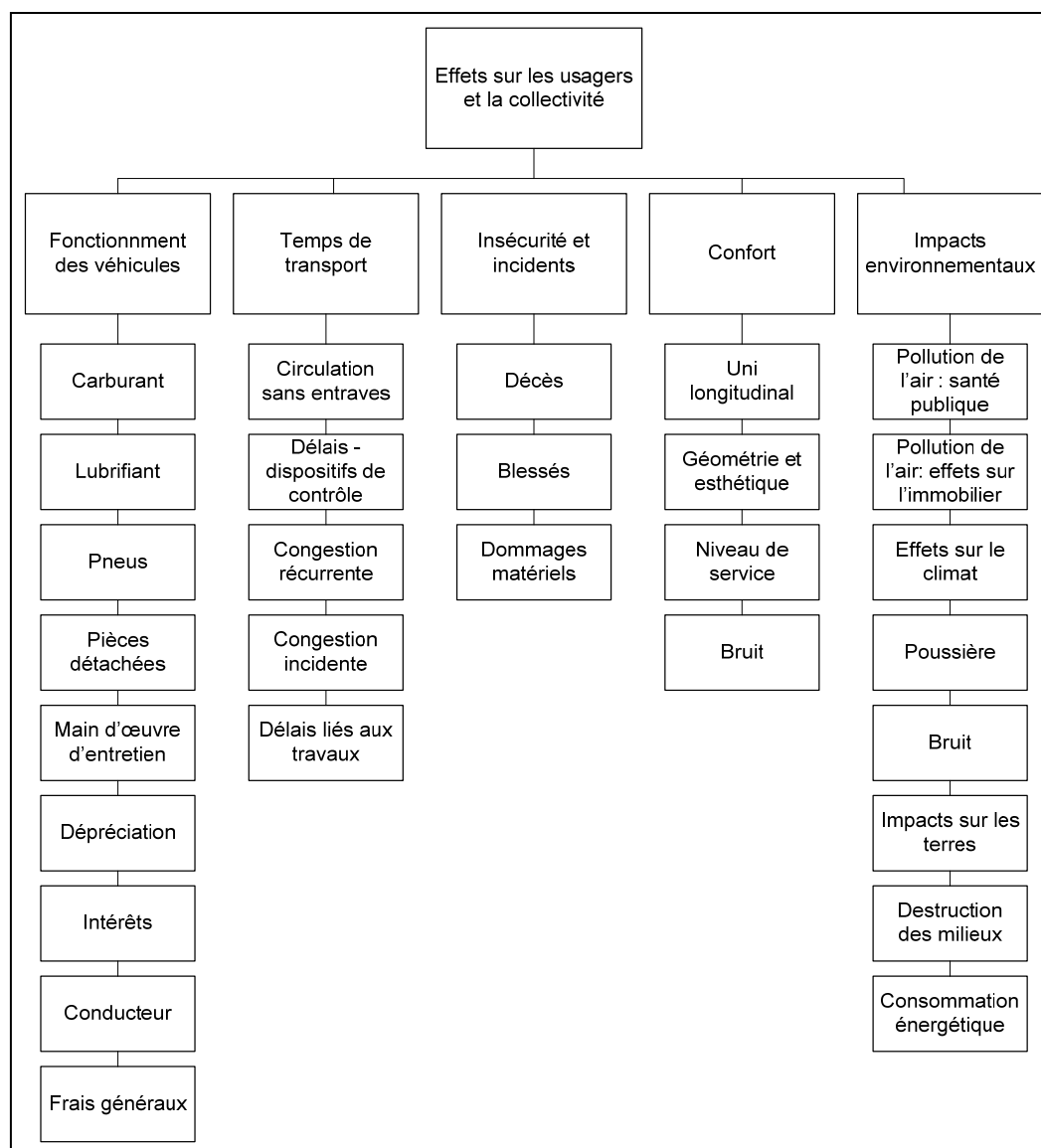


Figure 1.1 Allocation des coûts aux usagers et à la collectivité.

Cette liste exhaustive n'est pas prise en considération dans son ensemble par les systèmes experts et les outils de gestion des infrastructures.

Tel que détaillé au chapitre 3, les versions actuelles des systèmes HERS-ST et HDM-4, malgré le fait que ce dernier soit très complet, n'incluent pas des modèles pour tous les types de coûts énumérés.

En sus des définitions relatives aux différents types de coûts, certains termes sont expliqués ci-dessous afin de faciliter la compréhension du travail qui fait l'objet du présent mémoire et d'éviter toute confusion dans le sens des termes propres à la classification hiérarchisée des différents véhicules.

Une **catégorie de véhicule** est déterminée selon le nombre d'unités, c'est-à-dire le véhicule motorisé et la(les) remorque(s), et la fonction du véhicule. Les catégories de véhicules, telles que définies dans ce document, sont : les véhicules légers, les camions porteurs et les camions semi-remorques.

Il est à noter qu'un regroupement a été effectué afin de permettre l'intégration au GCH-6011 du service des Chaussées de la manière suivante : 1) véhicules légers et 2) camions porteurs et semi-remorques.

Le fondement de la **classe de véhicule** se définit par l'inclusion d'un maximum de paramètres en vue d'une désagrégation adéquate et représentative de la flotte.

Ces paramètres, qui viennent en sus de ceux décrivant les catégories, sont le type de véhicule, la configuration (i.e. type de carrosserie), les dimensions physiques et le nombre d'essieux.

Plusieurs classes de véhicules sont intégrées dans une catégorie de véhicules. (Exemples de classes : automobile compacte, camion porteur avec 3 essieux, etc.).

Le **modèle de véhicule** fait référence à l'appellation commerciale d'un véhicule, soit la marque, le modèle et la version qui sont spécifiques à un véhicule (i.e. Toyota Tercel DX).

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Contexte

Les modèles de coûts à l'utilisateur, et à la société⁵, sous-jacents aux systèmes HERS-ST et HDM-4, et couverts dans ce mémoire, proviennent généralement de sources différentes. En effet, les modèles du système HERS-ST découlent principalement d'études statistiques menées aux États-Unis qui ont conduit au développement d'équations de régression, applicables à la gestion au niveau réseau des infrastructures routières. Les modèles intégrés à l'outil HDM-4 sont le fruit de la collaboration de différentes organisations dans le monde dans le cadre d'une étude technique internationale dirigée par l'Université de Birmingham au Royaume-Uni. Ces modèles, généralement de nature probabiliste structurée⁶, proviennent de plusieurs administrations, et peuvent être appliqués à différents niveaux de gestion des chaussées.

2.2 Système HERS-ST

Les modèles de coûts aux usagers du HERS-ST ont été développés au niveau de l'administration fédérale des routes des États-Unis (FHWA) afin de quantifier l'effet de l'état du réseau routier sur les usagers. Ils reposent sur les recherches initialement effectuées pour le compte de la FHWA et publiées en 1982 (Zaniewski, 1982). Ces modèles ont été actualisés dans les années 1995-2000 par plusieurs études dont celles réalisées par la firme *Cambridge Systematics Inc.* (Cambridge Systematics, 1997). Ces études portaient sur une révision des modèles inclus dans l'étude publiée par Zaniewski (1982) et sur le modèle de prédiction de la vitesse en écoulement libre de la Banque Mondiale.

⁵ Les coûts à la société réfèrent à la somme des coûts à l'administration, aux usagers et à la collectivité en général.

⁶ C'est-à-dire qui combinent des éléments déterministes et mécanistes.

2.2.1 Rapport technique de 1982 (FHWA)

L'étude de Zaniwski (1982), réalisée pour le compte de la FHWA, consistait en une compilation et une mise à jour des tableaux de coûts d'exploitation des véhicules utilisés à l'époque par différentes administrations routières américaines. Ces tableaux de coûts reposaient principalement sur des méthodologies adoptées pour la réalisation de deux études antérieures portant sur les coûts d'exploitation des véhicules et les vitesses de déplacement des véhicules (Claffey et *al.*, 1971 et Winfrey, 1969). Les paramètres étudiés par Zaniwski (1982) sont la vitesse de déplacement, les coûts de fonctionnement, les émissions et les accidents des véhicules.

La présente section traite principalement des coûts d'exploitation des véhicules ainsi que de la consommation de carburant puisque le traitement des autres composantes du fonctionnement des véhicules n'est pas pertinent dans le cadre d'une revue des modèles du système HERS-ST puisqu'ils n'y ont pas été retenus dans celui-ci.

2.2.1.1 Classes de véhicules

Les classes de véhicules adoptées pour l'étude représentent la flotte de véhicules circulant sur les routes des États-Unis à l'époque. Ces classes, au nombre de huit, sont les suivantes :

- automobile compacte (*Small car*);
- automobile intermédiaire (*Medium car*);
- automobile grand format (*Large car*);
- camionnette (*Pick-up*);
- camion porteur comportant 2 essieux (2A-SU);
- camion porteur comportant 3 essieux (3A-SU);
- semi-remorque comportant 4 essieux (2-S2);
- semi-remorque comportant 5 essieux (3-S2).

2.2.2 Consommation de carburant

En vue d'effectuer les essais de mesure, huit véhicules représentatifs ont été sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques mécaniques et physiques. Aussi, deux véhicules différents ont été utilisés afin d'estimer la consommation de carburant pour la classe de voiture moyenne et aucun véhicule de la classe des camions articulés à 5 essieux (3-S2) n'a été utilisé (Zaniewski, 1982).

Des expériences ont donc été réalisées afin de mesurer la consommation d'essence à l'aide d'appareils conçus à cet effet. Douze sections de routes homogènes constituées de différentes déclivités (pentes), différentes valeurs de PSR (*Present Serviceability Rating*) et différents types de revêtement ont été utilisées pour les essais. Les effets des rayons de courbure ont été mesurés dans un stationnement pour les véhicules les plus légers. Les résultats des consommations pour les camions articulés à 5 essieux (3-S2) ont été déduits à partir des résultats actualisés de l'étude réalisée par Winfrey (1969).

La consommation à vitesse constante et lors des accélérations a été mesurée par incrément de 10 mph pour des vitesses allant de 10 mph à 70 mph. La modélisation d'un cycle de changement de vitesse consistait en une phase accélération d'une vitesse initiale jusqu'à une vitesse maximale suivie d'une phase de décélération à la vitesse initiale. Selon Zaniewski (1982), pour la plage de valeurs de l'indice PSR caractérisant les sections d'essais, l'uni avait une influence relative sur la consommation de carburant.

2.2.3 Autres coûts d'exploitation des véhicules

À une exception près, les coûts liés aux autres composantes de l'opération des véhicules ont été établis par des sondages menés auprès des opérateurs de flottes de véhicules ainsi qu'à partir d'études antérieures. En effet, les coûts liés à l'utilisation des pneus ont été déterminés à l'aide d'un modèle existant. En tout, 15 exploitants de véhicules lourds en charge de la gestion de plus de 12 000 camions ont été sondés (Zaniewski, 1982).

Les coûts en matière de consommation de lubrifiants, inclus dans l'étude réalisée par Winfrey (1969), ont également été actualisés. Par rapport à 1969, une baisse moyenne de

la consommation de l'ordre de 34% avait été déterminée en 1982 (Zaniewski, 1982). Enfin, la modélisation des effets de l'uni sur la consommation de lubrifiant est dérivée d'une phase préliminaire de l'étude Brésilienne réalisée à la fin des années 70 (GEIPOT, 1982).

La modélisation de l'usure des pneus et des coûts qui en sont tributaires découle de l'utilisation du *slip-energy model* développé par le Département fédéral des forêts (Zaniewski, 1982). Celui-ci a été préféré aux tableaux de coûts développés par Winfrey (1969). Le modèle adopté permettait une évaluation des coûts de l'usure des pneus à vitesse constante ainsi que des coûts marginaux reliés aux courbes et aux changements de vitesse. En ce qui a trait à la prédiction de l'impact de l'état du revêtement sur l'usure des pneus, bien qu'il fût possible d'utiliser ce modèle sur l'usure des pneus, les données obtenues de l'étude Brésilienne (GEIPOT, 1982) ont été préférées.

Les coûts inclus dans les tableaux portant sur l'entretien et les réparations des véhicules selon la vitesse, la géométrie de la route et les cycles de changements de vitesse ont été dérivés de ceux produits par Winfrey (1969). Un ajustement linéaire (proportionnel) des coûts totaux d'entretien et de réparation a été effectué par une répartition de ces derniers selon différents groupes de composantes mécaniques. Des modifications des coûts des différentes composantes ont été effectuées pour tenir compte de l'évolution de la technologie et de l'augmentation généralisée des coûts. La distribution des coûts a été établie en fonction des composantes du système de freinage, du groupe motopropulseur et des autres systèmes du véhicule, avant d'être agrégés en vue de la production des tableaux des coûts totaux (Zaniewski, 1982).

La détermination des coûts de dépréciation repose sur une méthodologie précédemment développée en Angleterre par Daniels (1974). Celle-ci présente une différenciation entre la dépréciation reliée à l'âge d'un véhicule et à celle liée à l'utilisation. Cette dernière composante des coûts a été utilisée dans le cadre de l'étude de Zaniewski (1982) pour le calcul de la perte de valeur d'un véhicule circulant sur le réseau routier américain.

Bien que certaines des bases de calculs aient été révisées dans le cadre d'études ultérieures, l'étude de Zaniewski (1982) s'avère être le fondement de la philosophie de la modélisation des coûts d'exploitation de véhicules inclus dans le systèmes HERS-ST. Des

tableaux de coûts y ont été produits à partir de données empiriques et en fonction des différents paramètres liés à la route. Parmi ceux-ci, l'influence de l'uni sur les coûts de fonctionnement des véhicules a été déterminée à partir de données recueillies au Brésil⁷ (FHWA, 2003). Bien que ces données n'étaient pas directement transposables au réseau routier visé par l'étude de Zaniewski (1982), cette approche représentait la meilleure alternative disponible pour caractériser l'influence de l'état du revêtement de la chaussée sur les coûts d'exploitation des véhicules. Il ressortait, pour les plages d'uni rencontrées, que la consommation de carburant n'était pas corrélée à l'état du revêtement dans les conditions observées aux É.U. alors qu'une influence plus importante a été établie pour les autres composantes des coûts d'exploitation de véhicules.

2.3 **Système HDM-4**

Les modèles de coûts aux usagers du système HDM-4 ont été conçus, d'une part, à partir de modèles existants (i.e. HDM-III, ARFCOM, et autres) et, d'autre part, à la suite de la vaste étude «*International Study Of Highway and Development Management Tool*» (ISOHDM) qui a impliqué différentes organisations internationales. Un des objectifs du HDM-4 était d'étendre l'application des versions précédentes de l'outil aux pays industrialisés de l'hémisphère nord. Ainsi, par rapport au modèle HDM-III, le nouvel outil offre une nette amélioration à ce qui a trait à la caractérisation du parc de véhicules, à la modélisation de différentes composantes des coûts d'exploitation et à la quantification des émissions des véhicules. Il intègre également les modèles de comportement développés dans le cadre du programme «*Long Term Performance Pavement*» (LTPP) du «*Strategic Highway Research Program*» (SHRP) menés par l'Association américaine des administrations routières (AASHTO), dont ceux propres aux climats humides et froids.

⁷ Les données utilisées sont celles obtenues lors de la phase intermédiaire de l'étude menée au Brésil par différentes organisations.

2.3.1 Le modèle pour l'entretien et la conception des routes model (HDM-III)

Au milieu des années 80, on estimait à plus de dix milliards de dollars les investissements annuels par les administrations routières dans la conservation et l'entretien des réseaux routiers. Malgré ces sommes considérables, il était alors déjà reconnu que les coûts assumés par les utilisateurs de la route représentaient entre huit et dix fois ces investissements (Watanatada, 1987).

Dans le cadre des recherches ayant mené à la conception de l'outil HDM-III, une grande partie des énergies a été consacrée à la modélisation des coûts aux usagers, plus spécifiquement, en ce qui a trait aux coûts d'exploitation des véhicules. Moins d'attention ayant été portée à la modélisation des bénéfices liés à la réduction du temps de transport et des accidents puisque les effets de la conception des chaussées et de l'uni avaient été jugés moins importants sur ces derniers. De plus, l'importance des coûts reliés à l'utilisation des véhicules, à tout le moins dans les pays en voie de développement, s'est avérée bien supérieure qu'à celle reliée aux coûts découlant des accidents et de la congestion (Watanatada, 1987).

Les modèles inclus dans le HDM-III proviennent du traitement des données amassées dans le cadre de quatre vastes études réalisées dans des pays en voie de développement pendant les années 70 et 80. Il s'agit des études produites par la Banque Mondiale avec la collaboration d'autres organisations qui ont été menées au Kenya (Daniels, 1974), dans les Caraïbes (Hide, 1982), au Brésil (GEIPOT, 1981) et en Inde (CRRI, 1982). Toutes ces études comportaient au moins trois phases qui consistaient en l'observation des vitesses des véhicules sur le réseau, des expérimentations de la consommation de carburant dans différentes conditions ainsi que des sondages auprès des opérateurs de flottes de véhicules. Les données ont été compilées en fonction de différents paramètres dont les pentes, la sinuosité, la géométrie des voies et l'uni caractérisé par l'IRI. D'ailleurs, les conclusions de ces études ont mis en évidence la très forte corrélation entre l'uni et les coûts aux usagers. Bien que la littérature sur le sujet recommande l'utilisation des modèles développés à partir des données de l'étude brésilienne, l'opération du HDM-III permet la sélection des modèles développés à partir des autres études.

Le modèle HDM-III ayant servi de base au développement des modèles de coûts aux usagers du HDM-4, une brève description du contenu des quatre études, du Kenya, des Caraïbes, de l'Inde et du Brésil, est présentée dans les sections suivantes. De plus, une compilation générale de ces études a été dressée au Tableau 2.1.

Tableau 2.1

Études majeures produites par la Banque Mondiale

Étude	Pays	Années de réalisation	Commanditaires	Étendue du réseau routier (km)	Types de véhicules (#)	Particularités
<i>Kenya Road User Cost Study</i>	Kenya	1971-1975	-British Transport and Road Research Laboratory (TRRL) -Kenya Ministry of Works -Banque Mondiale	9 300	5	-effets de l'UNI sur les CEV ⁸ -modélisation empirique -équations de régression linéaires
<i>Vehicle Operating Costs in the Caribbean</i>	Ste-Lucie Dominique St-Vincent Barbade	1977-1982	-British Transport and Road Research Laboratory (TRRL)	n/d	4	-valeurs de l'indice IRI élevées -pentes élevées -même méthodologie que celle du Kenya
<i>Research on interrelationships between costs of highway construction, maintenance and utilization</i>	Brésil	1975-1984	-Gouvernement Brésilien -Nations Unies -Banque Mondiale -TRDF	36 000	6	-échantillon de données très important -modélisation empirique structurée (paramètres mécanistes) -modèles non linéaires (CEV, vitesse)
<i>Road User Cost Study in India</i>	Inde	1977-1983	-Central Road Research Institute (gouvernement Indien) -Banque Mondiale	40 000	6	-bénéfice de la réduction en temps de transport -modélisation des accidents -conditions de la circulation extrêmes -modélisation de la circulation

⁸ CEV : coûts d'exploitation des véhicules

2.3.1.1 Étude réalisée au Kenya

L'étude «*Kenya Road User Cost Study*» (Daniels, 1974 et Hide et *al.*, 1975) résulte d'une collaboration entre les gouvernements britannique et kényan. Cette étude, la première du genre à être réalisée à grande échelle, porte sur les coûts d'exploitation des véhicules, en termes de carburant, pneus, entretien et dépréciation du véhicule, temps de déplacement, taux d'intérêt, qui sont corrélés avec plusieurs caractéristiques de la chaussée telles que la déclivité, la sinuosité, l'uni et le type de revêtement. Une modélisation préliminaire des différentes composantes des coûts d'exploitation des véhicules a permis de dresser des équations empiriques de régression linéaire.

2.3.1.2 Étude réalisée dans les Caraïbes

Le réseau routier kényan de l'époque ne comportant pas de section de routes présentant des unis élevés ni des pentes abruptes, l'étude «*Vehicle Operating Costs in the Caribbean*» (Hide, 1982) a été menée dans certaines îles des Caraïbes afin de compléter la modélisation amorcée dans le cadre de l'étude originale. Aussi, la même méthodologie que celle utilisée au Kenya fut adoptée. Cette étude a alors permis de confirmer l'importance des effets de l'uni sur les coûts aux usagers. Toutefois, les conclusions de l'étude ont mené à la modification de plusieurs modèles et a soulevé le problème de l'adaptation des modèles de nature empirique d'une région à une autre.

2.3.1.3 Étude réalisée au Brésil

L'étude la plus importante est celle qui a été menée au Brésil (GEIPOD, 1982). Elle a fait l'objet d'analyses exhaustives des données brutes et a conduit au développement de modèles incorporant des principes analytiques (mécanistes). La réalisation de l'étude s'étend sur près de dix années et a impliqué la contribution de spécialistes provenant de dix pays. L'envergure des données amassées a permis plusieurs mises à jour des modèles non linéaires qui ont été développés. Une méthodologie statistique éprouvée aura également assuré une meilleure corrélation des caractéristiques des chaussées et des véhicules aux coûts qui en sont tributaires.

La méthodologie retenue dans HDM-III pour dresser la distribution stochastique de la vitesse, limitée en fonction des caractéristiques de la chaussée, des véhicules et de la circulation a été tirée de cette étude⁹ (Watanatada, 1987). Les coûts découlant de l'usure des pneus ont été modélisés sur la base de certaines considérations de nature analytique (mécaniste) à partir des résultats d'autres recherches publiées au début des années 80 (TRDF). C'est également au sein de l'étude Brésilienne qu'a été menée la «*International Road Roughness Experiment*» (IRRE) et dont découle l'indicateur IRI en tant qu'indice de mesure absolue des irrégularités du profil d'une chaussée. Ainsi, l'indice IRI aura servi de paramètre clé dans la modélisation des coûts aux usagers par le système HDM-III et, plus récemment, le système HDM-4.

2.3.1.4 Étude Indienne

L'étude «*Road User Cost Study in India*» (CRRI, 1982) a été réalisée en Inde parallèlement à l'étude menée au Brésil. Les caractéristiques du réseau routier et de la flotte de véhicules étudiées, comportaient des particularités spécifiques à l'Inde, très différentes de celles relevées au Brésil. Bien que l'uni y ait été présenté comme un facteur d'influence prédéterminant pour la modélisation des coûts d'exploitation des véhicules, les techniques de dimensionnement des chaussées, la présence importante de transport non motorisé, le faible rapport entre la puissance et la masse des véhicules et la géométrie particulière des routes en Inde ont mené à une philosophie différente de modélisation. En effet, en sus des études de vitesses, des sondages sur les coûts d'exploitation des véhicules et des expérimentations portant sur la consommation de carburant, des efforts ont été investis en vue de la modélisation des interactions des véhicules en situation de congestion et de l'incidence des accidents. Un modèle Indo-suédois de simulation du débit de circulation en milieu rural a été développé et validé (Watanatada, 1987). De plus, certaines notions ont été

⁹ Se référer au chapitre 5 du présent rapport pour une description plus détaillée de la modélisation de la vitesse.

utiles dans le développement ultérieur du modèle de capacité retenu dans HDM-4. Malheureusement, il semble que, bien que considérable, la base de données amassée dans le cadre de cette étude ne fut pas totalement exploitée faute de ressources suffisantes pour en assurer le traitement (Watanatada, 1987).

2.3.2 Études ISOHDM

L'étude intitulée «*International Study Of Highway Development and Management*» (ISOHDM) a été menée entre 1993 et 1996 grâce au soutien financier de la Banque asiatique de développement (ADB), de l'Agence de développement internationale (ODA) du Royaume-Uni, de l'administration nationale des routes de la Suède (SRNA) et de la Banque Mondiale (Kerali, McMullen et Odoki, 2000). Le comité de direction de l'étude était sous la responsabilité du Dr. Henry Kerali de l'Université de Birmingham. Cette étude avait pour objectif d'améliorer les outils existants servant à analyser et évaluer la pertinence des investissements routiers, dans le but de soutenir le développement économique, et à mettre sur pied une approche socio-économique plus intégrée et mieux articulée pour aider à identifier les meilleurs investissements dans le domaine des infrastructures routières. Aussi, l'étude ISOHDM était subdivisée en plusieurs modules dont ceux portant sur le développement des modèles liant les coûts aux usagers, la fluidité du débit et l'état de la route, la mesure des défauts de surface et leur prévision y compris pour les chaussées rigides, la prise en compte de l'impact sur l'environnement et le développement des interfaces conviviales du logiciel. Le lien entre les coûts aux usagers et l'état de la route est à la base de l'étude intitulée *HDM Technical Relationship Study (HTRS)*, présentée dans la section qui suit.

2.3.2.1 Étude HTRS

L'étude HTRS représente la contribution la plus importante vers le développement des modèles intégrés des effets sur les usagers de la route en termes de fluidité et de coûts des véhicules (NDLI, 1995). L'étude a été réalisée par *N.D. Lea International Ltd.* (NDLI, 1995) et menée à partir des installations de l'Institut Kerja Raya Malasia (IKRAM) en Malaisie, un laboratoire de l'état qui avait été privatisé. L'équipe de projet de l'étude HTRS était formée de spécialistes provenant du Canada (N.D. Lea), de la Nouvelle-Zélande («*Transit New*

Zealand»), de l'Afrique du Sud, de la Suède (SRNA), du Royaume-Uni («*Department for International Development*» (DfID) et «*Transport Research Laboratory*» (TRL)), de l'Inde (CRR) et de la Malaisie (IKRAM).

Cette étude consistait en une revue de la littérature et des règles de l'art en matière de modélisation des coûts aux usagers. Quelques expérimentations et quelques sondages ont été menés sur le terrain sans, toutefois, égaler l'ampleur des études réalisées dans les années 70 et 80. L'objectif principal de l'étude étant le développement de modèles constitués de composantes de nature mécaniste.

Les indicateurs suivants furent abordés par l'étude, à savoir : la consommation de carburant, les coûts d'entretien et de réparations des véhicules, la prévision de la vitesse, la modélisation de la congestion incluant l'impact des cycles de changements de vitesses, les investissements de capitalisation, l'impact des travaux routiers, les coûts des accidents routiers et la modélisation du bruit généré par les véhicules. Le développement et les caractéristiques des 16 véhicules représentatifs inclus par défaut dans HDM-4 proviennent de l'étude HTRS.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre décrit la méthodologie adoptée en vue de l'atteinte des objectifs énumérés dans le chapitre 1.

Les différentes étapes de l'étude ont fait l'objet d'une méthode de recherche distincte, telles qu'en sont présentées les grandes lignes dans ce rapport.

De plus, les rapports soumis dans le cadre d'un mandat octroyé par le MTQ (Roy et *al.*, 2006, Roy et *al.* 2007a et Roy et *al.* 2007b) pourront venir compléter l'information fournie dans ce mémoire.

Aussi, un portrait plus détaillé des outils utilisés en soutien est inclus dans le chapitre 4.

3.1 Compréhension de l'évaluation des coûts aux usagers

L'analyse des coûts aux usagers du réseau routier québécois a reposé d'abord sur une revue bibliographique relative à leur compilation et à leur estimation.

La revue a été particulièrement orientée vers les systèmes et les modèles sous-jacents, qui ont été évalués dans le cadre de la présente étude.

Ainsi, la documentation rendue disponible par les développeurs des systèmes HERS-ST version 3.0 et 4.0 et HDM-4 versions 1.3 et 2.0, en plus des études à la base de la formulation des modèles qui en sont sous-jacents, ont fourni une bonne compréhension de la logique de calcul propre à chaque système.

Les principales sources consultées sont :

- la *Federal Highway Administration* (États-Unis);

- la Banque Mondiale et l'association internationale permanente des congrées de la route (AIPCR);
- les différentes administrations routières;
- les études publiées par les centres de recherche routière.

La justification des approches préconisées ainsi que l'établissement de plusieurs parallèles entre les deux systèmes de gestion à l'étude ont été mis en lumière suite à cette revue.

Dès lors, certaines conclusions ont pu être tirées en ce qui a trait aux facteurs limitatifs de l'adaptabilité des modèles aux conditions québécoises; permettant ainsi d'orienter et de concentrer les énergies vers les aspects les plus profitables.

Une revue des applications réalisées à l'extérieur du Québec ainsi que de l'évolution historique des modèles ont également été intégrées dans Roy et *al.* (2006).

3.2 Évaluation de la réalité québécoise

L'adaptation des modèles de coûts aux usagers à la situation québécoise a nécessité une recherche d'information soutenue. Bien que cette étape, préparatoire aux simulations, visait principalement le paramétrage des différents modèles à être utilisés ultérieurement, une compilation de différentes valeurs de référence (*benchmark*) des coûts aux usagers a été réalisée en parallèle.

À cet effet, les principales sources de renseignement consultées sont :

- la documentation rendue disponible par le MTQ et les autres entités du gouvernement du Québec;
- les publications du gouvernement du Canada;
- les publications d'autres gouvernements et administrations routières;
- les organismes de l'industrie automobile;
- les organismes de transports;
- les détaillants de véhicules et de divers produits;
- les exploitants de flottes;
- certains experts du transport.

Malgré le fait que certains des intervenants contactés n'aient pas fourni des informations détaillées, soit à cause de la nature commerciale de leurs opérations ou de l'inexistence des données demandées, une quantité appréciable d'informations et de conseils a été obtenue.

Évidemment, les sondages réalisés n'ont pas l'ampleur des études menées par les grandes organisations. Par conséquent, les informations contenues dans les différentes études publiées ont été privilégiées.

Toutefois, plusieurs conseils, qui ne sont pas évidents à l'esprit de l'ingénieur responsable de la gestion des infrastructures de la route, auront permis de bien saisir certaines réalités propres à l'exploitation des véhicules et à l'industrie du transport et, conséquemment, de venir bonifier, lorsque justifié et nécessaire, le travail réalisé par la suite.

En vue de l'identification des valeurs de coûts unitaires et celles utilisées comme références, l'approche retenue consiste à déterminer un coût pour une utilisation courante d'un véhicule type et des conditions moyennes de conduite qui sont représentatives de la réalité du Québec. Précisons que les coûts peuvent varier d'un conducteur à un autre selon le degré d'utilisation annuelle (nombre d'heures d'utilisation ou de kilomètres parcourus), la configuration, le modèle et l'âge du véhicule, etc. Voilà la raison qui a mené à la détermination de valeurs moyennes pondérées selon l'importance de la distribution des différents modèles de véhicules.

Dans le cas de plusieurs paramètres, la quantité de valeurs amassées aura nécessité une analyse de la validité et de la représentativité des conditions de conduite sur le réseau routier québécois. À qualité égale, un ordre de priorité, pour la sélection des données, a été établi comme suit :

1. ministère des Transports du Québec;
2. autres organisations québécoises telles que la SAAQ;
3. données du Canada (gouvernement et autres organisations);
4. données des États-Unis (gouvernement et autres organisations);
5. autres données disponibles.

Pour la catégorie des paramètres liés à la route, les efforts ont particulièrement porté sur la fonction de la route, l'état du revêtement et le niveau de service de la route. Ces paramètres font figure de variables en fonction desquelles les coûts aux usagers et à la collectivité sont estimés et, en général, quantifiés sur la base des informations stockées au sein des bases de données du Ministère.

Le sommaire des valeurs adoptées pour les différents paramètres entrant dans la modélisation des coûts aux usagers est présenté dans les chapitres 9 à 13.

Un complément d'informations est disponible dans Roy et *al.* (2007a).

3.3 Module d'évaluation des coûts aux usagers du HERS-ST

L'expérimentation du HERS-ST repose, en majeure partie, sur le paramétrage préalable des modèles.

L'analyse détaillée des résultats des simulations effectuées à l'aide des modèles de coûts aux usagers n'est pas possible directement à partir de l'interface de l'outil.

Aussi, le code du logiciel n'a pas été obtenu du développeur.

Ainsi, une part importante des équations relatives aux modèles de déplacement et de coûts de fonctionnement des véhicules ont été inscrites dans un classeur *Microsoft Excel* afin de permettre la détermination des résultats des différents modèles pour les sept catégories de véhicules incorporées dans les procédures de modélisation du HERS-ST.

L'analyse des résultats présentée dans ce mémoire est essentiellement basée sur les données générées dans le classeur mentionné.

Un des objectifs formulés dans le chapitre 1 consiste en la proposition d'une pondération des indices de performances intégrant les coûts aux usagers (i.e. CEV, accidents, temps de transport et émissions).

Ceci implique l'expérimentation de la fonctionnalité de pondération des coûts intégrée dans l'outil d'analyse de contrainte de performance du HERS-ST. Il s'agit d'un type d'analyse permettant la sélection des interventions en fonction du coût total généré par l'exploitation du réseau routier, exprimé par véhicule-mille parcouru. Les coûts sont catégorisés de la manière suivante : entretien des routes, exploitation des véhicules, temps de transport, impacts économiques des émissions polluantes, etc.

À cet effet, le travail est inspiré des procédures qui ont été recommandées par les développeurs du logiciel et utilisées dans le cadre de la production des rapports au Congrès américain relativement à la pondération de chacun des indices présentés par le système. D'autre part, certaines simulations basées sur des pondérations, différentes de celles relevées aux États-Unis, ont été effectuées en vue d'apporter un éclairage complémentaire.

3.4 Développement et intégration d'un modèle au GCH-6011

Les modèles de coûts aux usagers obtenus du système HDM-4 et développés pour le compte du MTQ, sont présentés sous la forme d'une série d'équations, qui permettront au système de gestion des chaussées du Ministère (GCH-6011) de calculer les coûts aux usagers de chaque segment de route.

Ces coûts pourront donc être générés par le GCH-6011, à chaque calcul du Fichier Maître Réseau (FMR), pour chaque segment, à l'aide des équations ainsi prédéfinies qui ont à être sélectionnées en adéquation avec la classe fonctionnelle et le milieu. Ces équations, permettent au GCH-6011 de calculer les coûts aux usagers du segment en fonction de variables telles que l'IRI, le DJMA et la vitesse prescrite. L'élaboration des équations à utiliser passe par une multitude de simulations des modèles de coûts de fonctionnement de véhicules du HDM-4 et par le développement d'outils complémentaires mieux adaptés aux besoins définis par le service des Chaussées.

Ainsi, la compilation des coûts est faite à partir de programmes *Visual Basic*, l'étalonnage des modèles, réalisés à l'aide d'un classeur *Microsoft Excel*, alors que la validation des résultats obtenus à partir de ces fichiers repose sur un certain nombre de simulations effectuées avec le HDM-4.

3.5 Plan de travail général

Le plan de travail adopté est présenté dans le tableau suivant :

Tableau 3.1
Planification de l'étude

Phases du projet	Étapes
(1) Étude des modules d'évaluation des coûts aux usagers	Définition des coûts aux usagers Revue des modèles Choix des modèles les plus pertinents Revue des applications (études de cas) Production du premier rapport d'étape
(2) Compilation des paramètres de coûts aux usagers québécois	Constitution d'une base de données Actualisation des valeurs Évaluation de la qualité des données disponibles Choix des valeurs des paramètres Production du deuxième rapport d'étape
(3) Expérimentation du HERS-ST	Paramétrage des modèles Évaluation des résultats Actualisation des facteurs d'ajustement Mesure de la performance des modèles calés Analyse de sensibilité Expérimentation des facteurs de pondération
(4) Intégration au GCH-6011	Paramétrage des modèles Évaluation des résultats Étalonnage des modèles Mesure de la performance des modèles calés Analyse de sensibilité Production d'un modèle d'intégration au GCH-6011
(5) Production du rapport final	Analyse comparative des résultats Appréciation de la qualité de l'étalonnage par estimation de l'erreur de prédiction Présentation des résultats et discussions. PRODUCTION DU RAPPORT FINAL

CHAPITRE 4

OUTILS DE MODÉLISATION ET DE GESTION

Comme cela a déjà été soulevé, deux systèmes de gestion des infrastructures routières sont utilisés : le HERS-ST et le HDM-4.

Le HERS-ST est utilisé en vue de l'analyse de scénarios de stratégies d'interventions à moyen et long termes. Le HDM-4 est utilisé afin de produire les équations de coûts à être intégrées aux GCH-6011 en exploitation au Ministère.

Il s'agit d'outils d'analyse et de prédiction intégrant des procédures de gestion qui sont basées sur la proposition d'interventions en réponse aux déficiences identifiées sur les différentes sections.

Ces outils évaluent également les impacts et les bénéfices, découlant de la mise en œuvre des interventions.

L'approche consiste à confronter, sur une durée de vie prédéfinie de l'infrastructure, l'ensemble des avantages et des coûts par comparaison de la situation résultant de cette mise en œuvre d'une celle résultant du statu quo.

Les sections suivantes décrivent brièvement l'ensemble des outils utilisés.

4.1 **Système HERS-ST de la Federal Highway Administration**

Le système «*Highway Economic Requirements System, State Version*» (HERS-ST) a été développé par la FHWA¹⁰ en collaboration avec certaines administrations routières de certains états américains.

Ce système permet l'évaluation des besoins en investissements, liés à la préservation et à l'amélioration du réseau routier.

Les analyses du HERS-ST sont effectuées par la FHWA selon un cycle de 20 ans, réparti en quatre périodes d'investissement. La longueur de la période totale d'analyse, le nombre et la durée des périodes intermédiaires sont à la discrétion de l'utilisateur du système.

Chacune de ces périodes fait l'objet d'analyses distinctes par le système; cela se traduit par une programmation des travaux et une quantification des besoins sur une base pluriannuelle.

De façon générale, les domaines d'application du HERS-ST sont :

- 1) la planification à long terme;
- 2) l'évaluation des scénarios;
- 3) l'analyse de corridor;
- 4) l'évaluation de programmes pluriannuels d'interventions.

Ces évaluations font appel à des notions techniques et économiques reliées à la fois à la structure de la chaussée, à la géométrie de la route et à la microéconomie des transports routiers.

¹⁰ Le développement et la distribution du HERS-ST sont faits sous la responsabilité du «*Office of Asset Management*».

Le système identifie les sections défaillantes en fonction d'un ensemble de critères d'interventions, définies selon des seuils répondant à plusieurs niveaux de sévérités (i.e. inacceptable, déficient, etc.).

Il en ressort des interventions, proposées en fonction de deux catégories : celle portant sur la structure de la chaussée et celle liée à l'aménagement de la route.

Les paramètres qui servent de critères d'évaluation sont, dans le premier cas, le PSR et le type de revêtement et, dans le second cas, la largeur des voies et des accotements, le profil en long et l'alignement horizontal, le nombre de voies et le niveau de congestion.

Les analyses du système s'effectuent à partir des données d'intrant de différentes natures soit :

- 1) les données portant sur les sections de la route;
- 2) les données des paramètres d'analyse (critères d'interventions, coûts unitaires);
- 3) les données de contrôle (méthode d'analyse, objectifs visés).

La procédure d'analyse peut se faire selon des objectifs d'efficacité économique, de fonds disponibles, de nature technique ou de critères de performance.

Les données de sortie du système présentent l'état global du réseau et/ou la compilation des interventions sous la forme de tableaux, de rapports spécifiques, de graphiques ou de représentations cartographiques.

La Figure 4.1 Éléments du système HERS-ST illustre l'architecture du système HERS-ST en y incluant les différents éléments alors que la Figure 4.2 Méthodologie du HERS-ST précise la méthodologie d'analyse du logiciel.

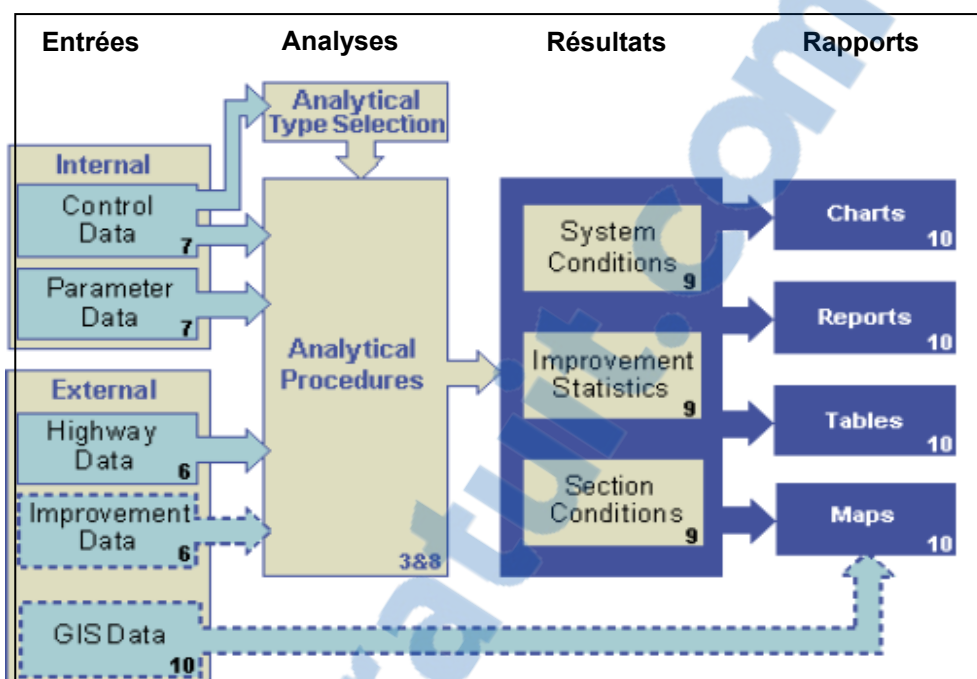


Figure 4.1 Éléments du système HERS-ST.

Adapté de FHWA (2005)

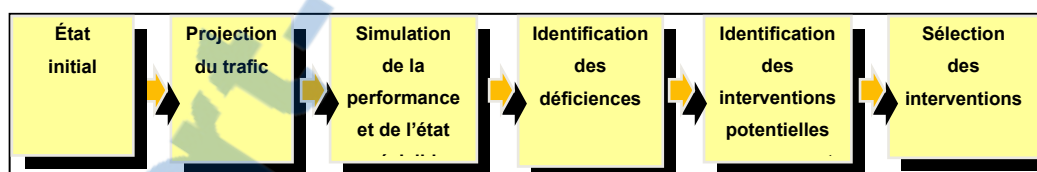


Figure 4.2 Méthodologie du HERS-ST.

Tiré de Beaulieu (2006a)

Dans le cadre de ce projet, l'étude du HERS-ST porte sur les données d'intrant, le paramétrage des fichiers d'intrant (*Parameter Data*) et la critique de l'exactitude des résultats obtenus des modèles inclus dans la procédure d'analyse (*Analytical Procedures*) sur la base des caractéristiques des tronçons routiers (*Highway Data*).

L'expérimentation du HERS-ST est basée sur une méthodologie d'analyse servant à maximiser le retour sur l'investissement relativement à l'atteinte d'objectifs particuliers liés à la performance de l'actif routier.

Plus concrètement, ce type d'analyse permet de déterminer le nombre et la nature des interventions à mettre en œuvre afin de respecter la contrainte de performance et le coût total relié à cette mise en œuvre.

Les objectifs de performance peuvent, entre autres, être formulés en coûts de fonctionnement des véhicules par véhicule-mille parcouru (VMP).

4.1.1 Volet des coûts aux usagers et à la collectivité du HERS-ST

L'équation de prédiction de la vitesse en régime libre s'avère être une version simplifiée qui estime la vitesse de déplacement des véhicules selon la géométrie de la route, la vitesse limite et l'état du revêtement. Le système détermine ensuite la vitesse effective moyenne en fonction des délais causés par le volume de circulation, les incidents routiers et la présence d'intersections.

Les modèles de coûts de fonctionnement des véhicules intégrés au HERS-ST découlent principalement d'une étude réalisée vers 1980 (Zaniewski, 1982) et comprennent l'instrumentation de divers types de véhicules¹¹, la collecte de données de flottes de transport et dont la méthodologie est, en partie, basée sur des études américaines antérieures ainsi que sur les données intérimaires de l'étude qui a été réalisée au Brésil (GEIPOT, 1982) sous l'égide de la Banque Mondiale.

Les modèles sont construits suivant une série d'équations qui estiment, de manière distincte, les éléments qui représentent les trois types de conduite suivants :

- Les coûts associés aux déplacements à vitesse constante qui sont ajustés selon le profil longitudinal et l'état du revêtement;

¹¹ Sauf dans le cas des semi-remorques comportant 5 essieux dont les coûts de consommation de carburant ont été déduits d'études antérieures.

- Les coûts supplémentaires engendrés par les cycles de changements de vitesse;
- Les coûts supplémentaires qui sont tributaires à la présence de courbes.

Cette série d'équations a été actualisée en 2000 (FHWA, 2003) afin de remédier à certaines irrégularités obtenues auparavant.

Les variables à définir à l'interface du logiciel sont les coûts unitaires (i.e. carburant, pneus, etc.) et les facteurs d'ajustement utilisés afin de corriger la surestimation des taux de consommation qui découle de l'âge des modèles.

Les modèles servant à estimer le temps de déplacement font appel aux notions du «*Highway Capacity Manual*» et permettent de prendre en considération les retards liés à la présence d'intersections (signalisation et dispositifs de contrôle), à la congestion récurrente (niveau de service) ainsi qu'à la congestion incidente causée par les incidents qui sont propres à chaque classe fonctionnelle.

Pour chaque type de véhicule, la valeur horaire du temps de déplacement, le taux d'occupation, la valeur de la dépréciation temporelle et une valeur associée à la marchandise transportée sont utilisés afin de déterminer les coûts du temps de transport.

HERS-ST comprend également un modèle de prévision de la circulation incorporant une composante d'élasticité de la demande.

L'évolution dans le temps de cette demande est fonction de l'offre en transport, c'est-à-dire le coût financier pour l'utilisateur, qui est estimé selon le niveau de service de la route; soit les délais subis par les usagers.

Cette méthodologie sert à prévoir l'accroissement de la circulation (évolution de la demande) qui entre dans les projections liées aux calculs de tous les types de coûts ainsi qu'à l'évolution de l'état et du niveau de service du réseau routier pour les périodes d'investissements ultérieures.

La modélisation des effets des émissions des véhicules par HERS-ST repose sur les résultats de simulations réalisées par l'agence «*Environmental Protection Agency*» (EPA) pour une gamme de vitesses de déplacements, exprimées en milles par heure, et selon la classe fonctionnelle.

Les données, disponibles sous forme de tableaux, sont fournies en dollars des États-Unis (USD) et incluent la combinaison de plusieurs types d'émissions polluantes.

Toutefois, dans la version actuelle, les émissions de dioxyde de carbone ne sont pas intégrées à la modélisation.

La Figure 4.3 illustre les interactions entre les modèles du HERS-ST :

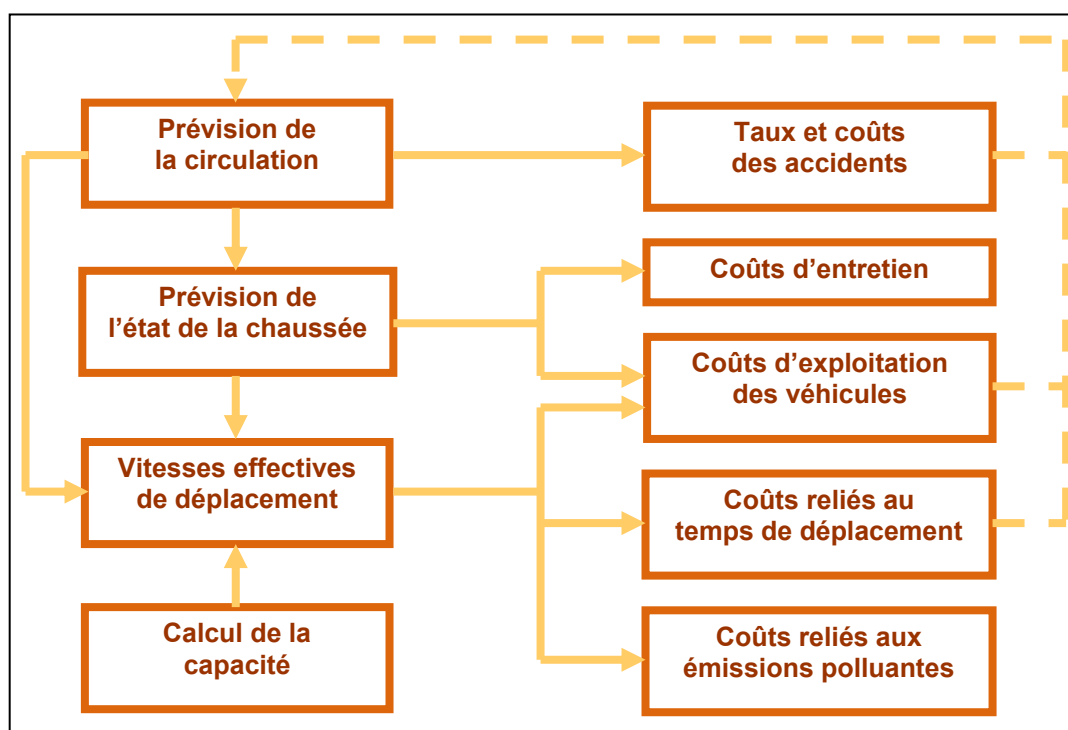


Figure 4.3 Interrelations des modèles de prédiction du HERS-ST.

Tiré de Beaulieu (2006a)

4.2 **Système HDM-4 de la Banque Mondiale**

Le système «*Highway Development and Management*» (HDM-4) a été développé sous l'égide de la Banque Mondiale et de l'AIPCR afin d'évaluer économiquement les projets d'infrastructures, du point de vue de la collectivité, selon la méthode du bilan actualisé.

Le système est utilisé dans le cadre des analyses économiques conditionnelles à l'attribution des crédits des institutions financières telles que la Banque Mondiale (BM), la Banque Asiatique pour le Développement (ADB) et la Banque Africaine pour le développement (BAD/AfDB).

Certains modules du HDM-4 ont également été adaptés par des administrations routières dont celles de l'Australie (Bennett, 1998), de la Nouvelle-Zélande (Bennett, 2002) et de la Suède (VTI, 2003).

Le modèle a été adapté par le *Washington State Department of Transportation* (TRAC, 2004) et en évaluation pour considération par l'administration Albertaine des transports (SCGC, 2005).

Le HDM-4 convient, à la fois, à des analyses de niveau stratégique, à la programmation des travaux et à l'étude détaillée d'une section individuelle.

Le système est structuré en plusieurs modules qui permettent la gestion d'un ensemble considérable de données, l'exploitation de modèles techniques adaptables et la génération d'analyses pour les niveaux mentionnés.

Au niveau des modèles, la force du HDM-4 se traduit en un maximum d'adaptabilité de par la nature mécaniste ou analytique des relations et l'attribution de coefficients de calages pour remédier à leur adaptation locale.

L'interface permet à l'utilisateur de modifier la plupart des composantes du logiciel.

La Figure 4.3 Interrelations des modèles de prédiction du HERS-ST illustre l'architecture du HDM-4.

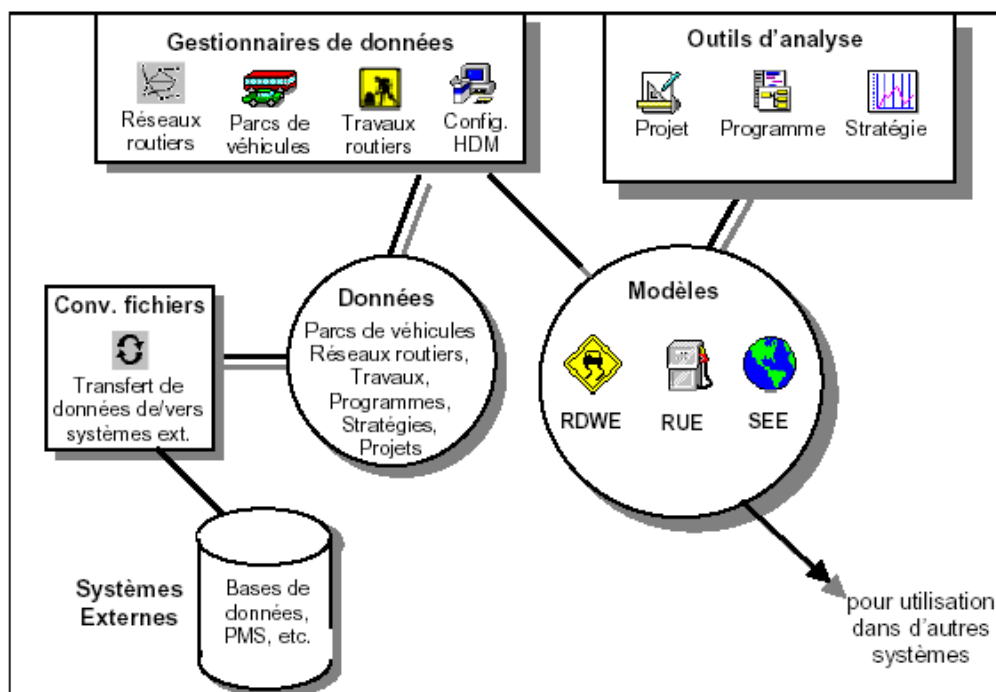


Figure 4.4 Architecture du HDM-4.

Tiré de Kerali et Odoki (2000)

4.2.1 Module des coûts aux usagers du HDM-4

À l'instar de celui du système HERS-ST, le module des coûts aux usagers du HDM-4 permet l'estimation des bénéfices aux usagers en termes d'une économie sur le coût du transport, laquelle découle de la mise en œuvre des interventions.

Dans un premier temps, l'estimation des coûts aux usagers repose sur deux modèles de prédiction de la vitesse de déplacement des véhicules soit : dans le cas d'une conduite en

régime libre¹² ou sans encombrements et, en cas de nécessité, un ajustement est effectué en fonction des interactions qui surviennent entre les véhicules dans la circulation; relativement à un débit en régime libre.

D'autre part, les modèles de coûts de fonctionnement des véhicules du HDM-4 sont de nature mécaniste et empirique.

Ils sont le fruit des recherches menées pendant la période 1990-2000 (Kerali et Odoki, 2000). Les différents modèles font référence à neuf composantes de coûts, telles que décrits ci-dessous.

D'abord, pour chaque section, chaque période type de circulation et chaque direction (ascendante ou descendante), les composantes suivantes sont calculées :

- La **consommation de carburant** est modélisée selon une version adaptée et améliorée du modèle ARFCOM (Australie). Ainsi, la consommation de carburant dépend de la puissance totale qui est requise pour le fonctionnement du véhicule; c'est-à-dire pour contrecarrer les forces qui s'opposent à la transmission de la puissance du moteur (déplacement du véhicule, friction interne du moteur et fonctionnement des accessoires);
- L'estimation de la **consommation de lubrifiant** du moteur est faite en fonction de deux composantes : la première, correspond aux pertes lors du fonctionnement du moteur, proportionnelles à la consommation de carburant et, la seconde, relative à la consommation liée à la contamination;
- Le modèle de l'**usure des pneus** repose sur celui développé précédemment pour le HDM-III, ce dernier étant basé sur des principes de dynamique de glissance et de

¹² Il s'agit de la traduction de l'expression *free-flow speed* qui est utilisée par le HDM-4.

dissipation de l'énergie. Ces besoins en énergie, traduits en termes d'un taux d'usure de la gomme, sont calculés en fonction des forces circonférentielle, latérale et normale appliquées sur chaque roue. Le taux d'usure est exprimé selon le nombre équivalent de pneus consommé par 1000 véhicule-kilomètres parcourus (VKP); le nombre équivalent de pneus étant tributaire d'un nombre de rechapages estimé selon l'état du revêtement.

Ensuite, pour chaque section et selon le niveau de sollicitations de la circulation, le HDM-4 estime les deux composantes suivantes :

- La **consommation en pièces détachées**, déterminée en fonction de l'âge du véhicule, l'état du revêtement (IRI) et ajustée selon le niveau de sollicitation de la circulation (estimée selon la consommation additionnelle de carburant relative à cette condition). La valeur est exprimée selon la valeur de remplacement du véhicule sans les pneus par 1000 VKP;
- La prédiction du **nombre d'heures affectées à l'entretien**, directement déduite de celle relative à la consommation en pièces détachées à l'aide de constantes de régressions qui sont modifiables.

Finalement, pour chaque section sous analyse, les composantes suivantes sont déterminées :

- Les **coûts en capital** qui reposent sur la détermination de la dépréciation et qui réfèrent à l'utilisation annuelle et la durée de la vie utile du véhicule ainsi que, sur la base de coefficients empiriques et à l'état du revêtement qui vient affecter la valeur résiduelle du véhicule. Plus particulièrement, la durée de vie des véhicules peut être, selon l'option sélectionnée par l'utilisateur du logiciel, déterminée en fonction de considérations économiques prenant en compte l'influence de l'état du revêtement sur la durée de vie du véhicule;

- Les **coûts en intérêts** qui s'obtiennent à partir de la valeur de remplacement, de l'utilisation annuelle (i.e. nombre d'heures) et de la vitesse moyenne de déplacement du véhicule ainsi que du taux d'intérêt prédéterminé;
- Le temps de l'**équippage** qui dépend directement de la vitesse de déplacement du véhicule;
- Les **frais généraux** qui sont répartis en fonction de l'utilisation annuelle (en kilomètres) du véhicule.

Notons qu'il existe, dans la documentation du HDM-4, des modèles distincts dans le cas des remorques (pour les camions lourds) pour les composantes de la consommation en pièces détachées et la prédiction du nombre d'heures affectées à l'entretien tandis que, pour d'autres cas, les coûts peuvent être estimés de manière distincte (pneus, dépréciation et intérêts).

Bien que tous ces modèles ne soient toujours pas incorporés dans la version la plus récente du HDM-4, cet aspect a été étudié en vue de juger la pertinence de leur utilisation.

La Figure 4.5 Interactions entre les modèles d'effets sur les usagers (HDM) schématise les différentes interactions entre les modèles et leurs paramètres relatifs.

4.3 Le système GCH-6011 du MTQ

Le système de gestion des chaussées du Ministère, le GCH-6011, est exploité par le SC et utilisé par les différentes Direction Territoriales (DT) afin de procéder à la programmation des interventions sur le réseau routier ou pour consulter les données relatives à la conservation des chaussées.

Ce système est une adaptation du logiciel *Visual PMS* a été développé par l'institut «*Texas Research and Development Institute*» (TRDI) et est actuellement distribué par la firme *Agile Asset*.

Le logiciel inclut des interfaces, permettant la présentation des données d'état et de l'historique des travaux pour chacune des sections. Il définit les modèles de comportement propres à chaque famille de chaussées et les analyses reposent sur des arbres de décision qui relient les dégradations aux interventions et des facteurs de priorisation.

Les analyses peuvent se faire selon le rapport coût-bénéfice et le rapport coût-bénéfice marginal.

La Figure 4.6 Principe de la gestion des chaussées (GCH-6011) illustre les différents éléments constituant le GCH-6011.

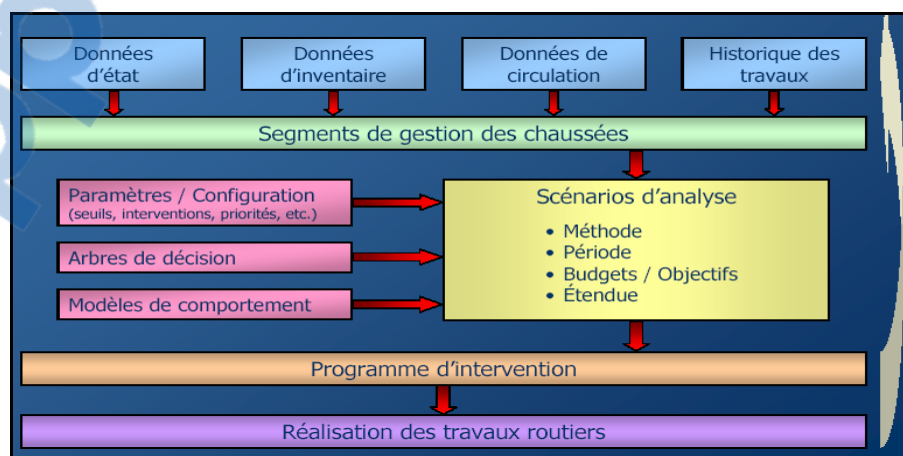


Figure 4.6 Principe de la gestion des chaussées (GCH-6011).

Tiré de Boucher (2006a)

Le Tableau 4.1 résume les différents éléments de la modélisation des coûts aux usagers pour les systèmes présentés. Les commentaires font référence à la procédure d'intégration des résultats des modèles du HDM-4 au système GCH-6011 qui est présentée dans ce mémoire.

Tableau 4.1

Particularités des systèmes de gestion études

Caractéristiques	HERS	HDM-4	GCH-6011	Commentaires - GCH-6011
NIVEAU D'ÉTUDE				
Projet		X		
Réseau	X	X	X	Niveau d'analyse du GCH-6011.
CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT MODÉLISÉES				
Classe fonctionnelle	X	X	X	Tient compte de la distribution de la flotte.
Vitesse constante	X	X	X	Déterminée selon la limite de vitesse.
Alignement horizontal	X	X		Données manquantes au GCH-6011.
Profil longitudinal	X	X		<i>Idem</i>
Profil transversal		X		<i>Idem</i>
Changement de vitesses	X	X		<i>Idem</i>
Interactions des véhicules		X		<i>Idem</i>
Moteur au ralenti		X		<i>Idem</i>
Uni	X	X	X	
Type de revêtement		X		Développé pour les chaussées souples.
Texture de la surface		X		Paramètre moyen dans le modèle.
VÉHICULES				
Par défaut	X	X	X	Tels que définis au chapitre 10.
Véhicule composite ¹³		X	X	<i>Idem</i>
Défini par l'utilisateur		X		
Flotte moderne		X	X	Caractéristiques : consulter le chapitre 13.
TYPES DE MODÈLES - FONCTIONNEMENT ET PROPRIÉTÉS DES VÉHICULES				
Vitesse en écoulement libre	X	X	X	
Vitesse limitée – circulation	X	X		Axe conservation.
Carburant	X	X	X	
Huile	X	X	X	
Pneus	X	X	X	
Entretien	X	X	X	
Dépréciation	X	X	X	
Intérêts		X	X	
Frais généraux		X	X	
Conducteur	X	X	X	

¹³ Selon une moyenne pondérée des caractéristiques des véhicules pour une catégorie donnée.

Tableau 4.1 (suite)

Particularités des systèmes de gestion études

TYPES DE MODÈLES - EFFETS À LA COLLECTIVITÉ				
Élasticité de la demande	X			Axe conservation; mission du SC.
Temps passagers	X	X	X	En fonction de l'uni.
Inventaire	X	X		Axe conservation; mission du SC.
Accidents	X ¹⁴	X ¹⁵		Idem
Émissions	X	X		Idem
Bruit		X		Idem
Cycle énergétique		X		Idem
NATURE DES MODÈLES				
Empirique	X	X	X	
Mécaniste		X	X	

4.4 Le modèle MOBILE 6 QC

Le modèle «Mobile 6» (*Mobile Source Factor Model*) est une application développée par l'EPA pour estimer les émissions actuelles et futures de polluants provenant des véhicules routiers.

La version «Mobile 6 C» (version canadienne) consiste en une adaptation au contexte canadien réalisée par Environnement Canada avec la collaboration des différentes administrations provinciales et qui présente les modifications suivantes (Environnement Canada, 2007) :

- le paramétrage au contexte des grandes régions canadiennes;
- la modification du code du logiciel original pour prendre en considération les normes canadiennes.

Une adaptation régionale supplémentaire a été réalisée par le Service de la Modélisation et des Systèmes de Transport (SMST) de la direction de la Planification du MTQ.

¹⁴ Ces types de coûts ne sont pas pris en considération dans le présent rapport.

¹⁵ Calculés de manière exogène au système.

Il s'agit de la version Mobile 6 QC, la version québécoise (Babin, 2004), qui fournit une corrélation entre la vitesse de marche moyenne des véhicules et le taux d'émission des gaz à effet de serre; une fonctionnalité qui n'est pas intégrée à la version originale ni à son adaptation canadienne.

Les données de sorties, fournies par Mobile 6, consistent en des séries de taux d'émission dégagées selon (EPA, 2004) :

- 1) les conditions de conduite (température, vitesse);
- 2) les caractéristiques du carburant;
- 3) la flotte de véhicules existante.

Les résultats sont présentés en grammes par véhicule-mille parcouru ou par véhicule-heure selon :

- 1) la classe de véhicule (28 classes);
- 2) la classe de route (autoroute, artère);
- 3) le type d'émission (en marche, départ, etc.);
- 4) le type de polluant (i.e. hydrocarbures, monoxyde de carbone, résidus des freins, etc.).

Les données obtenues du SMST, qui ont été utilisées dans le cadre du projet portent sur deux types de routes, soit autoroute et artère, ainsi que sur trois catégories de véhicules, soit : les véhicules légers, les camions réguliers et les camions lourds. Ces données ont été produites sur un horizon de 20 ans selon quatre années de référence : 2006, 2011, 2016 et 2021.

En complément, les informations tirées des fichiers d'intrant au Mobile 6 QC (Babin, 2004) qui portent sur les taux pondérés de consommation de carburant, les enregistrements des véhicules et la distribution du type de carburant consommé pour chaque classe de véhicule ont été utilisés pour le paramétrage et l'étalonnage des modèles du HDM-4 et du HERS-ST comme cela est détaillé dans les chapitres 17 et 19.

4.5 Autres outils

Étant donnée la nature de la recherche, principalement orientée vers la modélisation, certains outils ont été utilisés en sus de ceux déjà présentés.

4.5.1 Les autres programmes et feuilles de calculs Microsoft Excel

Dans le cadre du projet, des chiffriers *Excel* et des programmes *VisualBasic* ont été constitués afin de permettre l'analyse des résultats des modèles des coûts de fonctionnement des véhicules du HERS-ST v.4.0 et du HDM-4 v. 2.0., en vue de répondre aux objectifs suivants :

- le calcul des coûts d'exploitation des véhicules en fonction de la vitesse et de l'état du revêtement (HERS-ST et HDM-4);
- l'étalonnage des modèles du HDM-4;
- la production de la version québécoise des tableaux de coûts des émissions en fonction de la vitesse à inclure au HERS-ST;
- la production des équations à inclure au GCH-6011;
- la comparaison des résultats fournis par les deux systèmes à l'étude avec d'autres modèles.

4.5.2 Le modèle RED

Le programme «*Roads Economic Decision Model*» (RED) a été développé sous l'égide de la Division Africaine sub-saharienne de la Banque Mondiale en collaboration avec des organisations telles que les Nations Unies et de l'Union Européenne (Banque Mondiale, 2008).

Il s'agit d'un programme rédigé en *Visual Basic*, utilisant, partiellement, les modèles sous-jacents au système HDM-4 version 1.3 et dont le code est accessible; permettant ainsi l'actualisation, l'adaptation et l'exploitation aisée et rapide de ces modèles.

Plus particulièrement, RED permet la compilation des coûts aux usagers et des vitesses de marche des véhicules en fonction de l'IRI en utilisant les modèles du HDM-4 et la définition d'équations polynomiales du 3^e degré relatives à ces variables.

Évidemment, les coûts calculés par le fichier RED ont été comparés à ceux fournis par le logiciel HDM-4 pour des fins de validation.

Précisons que RED a été initialement utilisé afin d'assurer la production d'équations des coûts d'exploitation des véhicules en fonctions de l'uni (IRI) puisque les résultats obtenus concordent avec ceux du logiciel HDM-4 et des chiffriers créés afin de compiler les résultats de différents modèles et d'effectuer des analyses de sensibilités.

CHAPITRE 5

MODÈLES DE DÉPLACEMENT

Pour les deux systèmes, le calcul de la vitesse de déplacement inclut une version modifiée du modèle de vitesse en écoulement libre originalement développé par la Banque Mondiale (Watanatada, 1987). Les équations de la vitesse effective moyenne de déplacement et celles des retards sont déterminées par le système HERS-ST en fonction de la classification fonctionnelle de la route. Un modèle de la demande induite, dépendant du niveau de service de la route, caractérise également HERS-ST. Dans le cas du HDM-4, le calcul de la vitesse de déplacement des véhicules est alimenté par un modèle caractérisant les effets des forces physiques agissant sur le véhicule. Le système permet également une modélisation en trois zones¹⁶ de la capacité et de la vitesse sur une section qui tient compte des interactions entre les véhicules.

5.1 Modèle de la vitesse HERS

Le modèle de la vitesse incorporé à l'outil HERS-ST détermine la vitesse effective moyenne (AES) pour chaque type de véhicule et pour chaque section. La moyenne pondérée de la vitesse de déplacement des véhicules se fait selon une distribution de la flotte de véhicules déterminée pour chaque classe fonctionnelle. La vitesse AES est déterminée à partir de la vitesse en écoulement libre d'un véhicule (FFS) provenant d'une équation développée par la corporation «*Science Application International Corporation*» et la firme «*Cambridge Systematics*» (SAIC, 1993). Cette équation est une adaptation simplifiée de la vitesse probabiliste (APLVM) de la fondation «*Texas Research Development Foundation*» (TRDF) (Elkins et al., 1987) qui, elle-même, est une adaptation d'une procédure originalement développée par la Banque Mondiale. Le modèle de la vitesse de HERS tient compte des

¹⁶ À savoir écoulement libre, zone intermédiaire avec interactions entre les véhicules et vitesse uniforme et réduite menant à la saturation du trafic

effets du profil longitudinal de la route, des dispositifs de contrôle de la circulation, de la congestion et des incidents routiers.

5.1.1 Vitesse en écoulement libre

La vitesse en écoulement libre de HERS-ST (FFS) est calculée en milles par heure à partir de trois vitesses, limitées par des facteurs distincts relatifs aux courbes, à l'uni et à la vitesse prescrite.

$$FFS = ((1/VCURVE)^{10} + (1/VROUGH)^{10} + (1/VSPLIM)^{10})^{-0.1} \quad (5.1)$$

D'abord, la vitesse maximale due à la sinuosité de la route (paramètre *VCURVE*) est déterminée à partir de la procédure de la Banque Mondiale (HDM-III) en modifiant l'équation originale afin d'utiliser des données de rayon de courbure en degrés et d'obtenir une vitesse en milles par heure^{17, 18}. Ces modifications permettent l'arrimage au système précurseur; le «*Highway Performance and Monitoring System*» (HPMS).

Ensuite, l'estimation de la valeur de la vitesse limitée par les conditions de surface du revêtement (paramètre *VROUGH*) passe par un calcul utilisant la valeur de l'indice PSR. Un système de double équation permet de trouver la valeur du paramètre *VROUGH* sans surestimer l'impact de l'uni de surface à basse vitesse. Il est possible d'étalonner le modèle en modifiant les valeurs par défaut de quatre paramètres du système d'équations reliés à la vitesse et à l'indicateur de confort des usagers de la route (PSR). Ces paramètres sont : le point de rupture de l'évolution de la vitesse (*VROUGH*) en fonction de la valeur de l'indice PSR (*PSRB*), la valeur du paramètre *VROUGH* lorsque l'indice PSR est 0 et lorsqu'il correspond à *PSRB* ainsi que le coefficient de la pente de la valeur *VROUGH* en fonction de la valeur du PSR.

¹⁷ Les unités impériales de longueur et de vitesse sont intégrées au système HERS-ST.

¹⁸ 1 Mille par heure = 1,6093472 kilomètres par heure

L'influence de la limite de vitesse prescrite sur la vitesse réelle de déplacement (paramètre *VSPLIM*) est estimée en fonction d'un dépassement de la première de 10 ou de 15 kilomètres par heure selon la classe fonctionnelle de la route selon HERS-ST.

À la suite du calcul de la vitesse FFS pour tous les types de véhicules, HERS-ST estime les effets des pentes verticales ascendantes sur la vitesse d'écoulement libre des véhicules lourds dans la direction ascendante (FFSUP). La vitesse maximale d'ascension d'une pente abrupte (CRAWLS) pour ces véhicules est obtenue à partir de l'inclinaison de la pente moyenne de la section. De cette vitesse est déduit le temps du délai supplémentaire dû à l'inclinaison de la pente. Les deux valeurs obtenues ainsi que la longueur de la section servent à évaluer la FFSUP.

5.1.2 Vitesse effective moyenne

Les modèles inclus au HERS-ST ont été développés sur la base des éditions 1994 et 1997 du *Highway Capacity Manual* (TRB, 1994 et TRB, 1997) et procèdent à des analyses distinctes selon la direction de la circulation en période de pointe ainsi que la circulation hors pointe. Le calcul de la Vitesse Effective de Déplacement (AES) d'une section se fait à partir de la vitesse FFS selon des méthodes dépendantes de la présence de dispositifs de contrôle de la circulation et du nombre de voies. La vitesse AES tient compte des délais attribuables aux incidents routiers (D_{inc}), à la congestion (D_{cong}) et aux dispositifs de contrôle de la circulation. (D_{sig}). Selon le cas, les délais dus aux incidents routiers peuvent être calculés par le modèle des incidents routiers du système HERS-ST tandis que les autres types de délais sont tous obtenus à partir du modèle de vitesse. Tous les délais sont calculés en heures par véhicule-milles.

5.1.2.1 Sections de routes en milieu urbain comportant des panneaux d'arrêt

La modélisation de la vitesse effective de déplacement des véhicules sur les sections caractérisées par la présence de panneaux d'arrêt tient uniquement compte des délais dus à la signalisation. Le délai de parcours de la section sans incident causé par la signalisation

(D_{ss}) est calculé à partir d'une équation sélectionnée. Cette dernière est choisie à partir d'un système de cinq équations utilisées pour différentes plages de valeurs du ratio débit-capacité¹⁹ et pour différentes fréquences de panneaux d'arrêts (nombre par mille). Ces équations intègrent dans le calcul la vitesse en écoulement libre (FFS) et le ratio débit-capacité (ACR) dans le calcul. Les délais dus aux accidents sont calculés par le modèle des incidents routiers de HERS-ST et les délais dus à la congestion ne sont pas considérés.

$$AES = 1 / (1/FFS + (D_{sig} + D_{inc})/1000) \quad (5.2)$$

5.1.2.2 Sections de routes en milieu urbain comportant des feux de circulation

Le calcul de la vitesse effective de déplacement des véhicules sur les sections caractérisées par la présence de feux régularisant la circulation se fait en plusieurs étapes selon les trois conditions suivantes : la période de pointe, pour chacune des deux directions, et pour la période hors pointe. Les délais dus aux feux de circulation, aux incidents et à la congestion sont inclus dans ces calculs. Selon FHWA (2003), les six étapes menant à la modélisation de la vitesse effective sont les suivantes :

1. La proportion annuelle des déplacements (TRAVF) pour chacune des trois périodes précédemment mentionnées est déterminée à partir du ratio débit-capacité (VCR);
2. Un ratio débit-capacité pour chaque période (VCRPP) est calculé en fonction du ratio ACR et de la capacité nominale;
3. Le délai minimum de parcours de la section dû à la présence de dispositifs de contrôle de la circulation (ZVDSIG) est calculé à débit nul pour chaque direction à partir du nombre d'intersections comportant de tels dispositifs;
4. Un taux de déplacement (l'inverse de la vitesse) est calculé pour chacune des trois périodes à l'aide d'une équation sélectionnée en fonction du ratio VCR. Ce taux de déplacement (NITR) est calculé à l'aide des valeurs du ratio VCR, du ratio VCRPP,

¹⁹ Obtenue en utilisant le débit journalier annuel moyen (DJMA)

de la vitesse FFS et d'un nombre prédéterminé d'étranglements par mille. Ce nombre est codé dans HERS-ST et dépend de la classe de route;

5. Les délais dus aux incidents (D_{inc}) sont calculés à l'aide d'un système d'équations dépendantes des deux types de ratios (VCR et VCRPP);
6. Finalement, la vitesse effective moyenne de déplacement des véhicules est calculée à l'aide de l'équation 5.3 et selon le taux de déplacement NITR et du délai dû aux incidents précédemment calculé. Le paramètre NITR tient compte des délais dus aux dispositifs de contrôle et à la congestion.

$$AES = 1 / (NITR + D_{inc}) \quad (5.3)$$

5.1.2.3 Sections de routes en milieu urbain caractérisées par les deux types de dispositifs de contrôle de la circulation

Pour les sections comportant à la fois des panneaux d'arrêt et des dispositifs de régulation de la circulation, HERS calcule une vitesse effective moyenne en fonction de chacun des deux types de dispositifs de contrôle (feux de circulation et panneaux d'arrêt) et, par la suite, détermine une vitesse AES moyenne en pondérant les vitesses obtenues selon les nombres de dispositifs de chaque type de signalisation présents sur chaque tronçon routier analysé.

5.1.2.4 Sections de routes en milieu rural avec une voie par direction

Le calcul de la vitesse effective de déplacement des véhicules sur les sections à deux voies se fait à l'aide de l'équation 5.4 à partir des délais et de la vitesse en écoulement libre (FFS). Les délais dus à la congestion sont obtenus à l'aide d'un système de deux équations dépendantes du ratio DJMA-capacité tandis que les délais dus aux accidents sont calculés à partir du modèle des incidents routiers de HERS-ST.

$$AES = 1 / (1/FFS + (D_{cong} + D_{inc})/1000) \quad (5.4)$$

5.1.2.5 Sections de routes avec deux voies ou plus par direction

Le calcul de la vitesse effective moyenne pour les sections de routes à deux voies ou plus par direction est réalisé à l'aide d'une méthodologie en cinq étapes qui est semblable à celle présentée pour le cas de sections comportant des feux de régulation de la circulation. Toutefois, la troisième étape n'est pas incluse dans cette méthode puisqu'elle réfère à la présence de feux de régulation. La sélection de l'équation servant à déterminer la proportion annuelle des déplacements (TRAVF) se fait en fonction des mêmes critères mais les équations constitutives du système sont différentes puisqu'elles tiennent uniquement compte des effets de la congestion sur le temps de parcours de la section (FHWA, 2003). La vitesse effective moyenne est calculée à partir de l'équation 5.3.

5.1.2.6 Sections de routes avec trois voies, deux directions

Dans le cas des sections comportant une voie dans une direction et deux dans l'autre direction, le modèle HERS-ST utilise la méthode de calcul pour les sections à deux voies pour la direction à une voie et la méthode de calcul pour les sections à plus de deux voies par direction pour la direction comportant deux voies. Pour les fins du calcul, le débit est réparti également dans les deux directions tandis que la capacité est distribuée de manière plus importante dans la direction caractérisée par deux voies (selon un rapport 7:5). Le délai moyen attribuable à la congestion est évalué par la moyenne des valeurs calculées pour chaque direction. Ce délai moyen sert au calcul de la vitesse effective moyenne qui est donnée par l'équation 5.4.

5.2 Modèle des prévisions de la circulation de HERS

Le HERS-ST est constitué d'un modèle de prévision de la circulation prenant en compte l'existence de l'élasticité de la demande en transport. Cette demande est influencée par le coût du transport assumé par l'utilisateur et qui fluctue en fonction du niveau de service offert.

5.2.1 Mise en contexte

En termes économiques, le transport peut-être considéré comme un produit qui est offert à un prix qui varie dans le temps. Ce prix qui est pris en charge par les usagers du système inclut différentes composantes tels que les coûts d'exploitation des véhicules, les coûts en temps de transport et les coûts liés aux accidents. Comme c'est le cas pour d'autres produits, le coût du transport a une influence sur la demande et vice-versa. En gestion des chaussées, le niveau de service qui est offert aura une influence sur une partie de la demande ou de l'utilisation des routes par les automobilistes puisque ces derniers réagiront aux changements régissant l'infrastructure par un ajustement de la fréquence de leurs déplacements. Dans HERS, ces conditions sont mesurées par le ratio débit-capacité ainsi que par l'indice PSR qui influencent le volume de circulation dans le cas de routes très sollicitées. Plus le débit de la circulation augmente, plus la composante du prix du transport reliée au coûts des retards augmente. Ce processus est illustré à la Figure 5.1 de la page suivante par les courbes de l'offre et la demande.

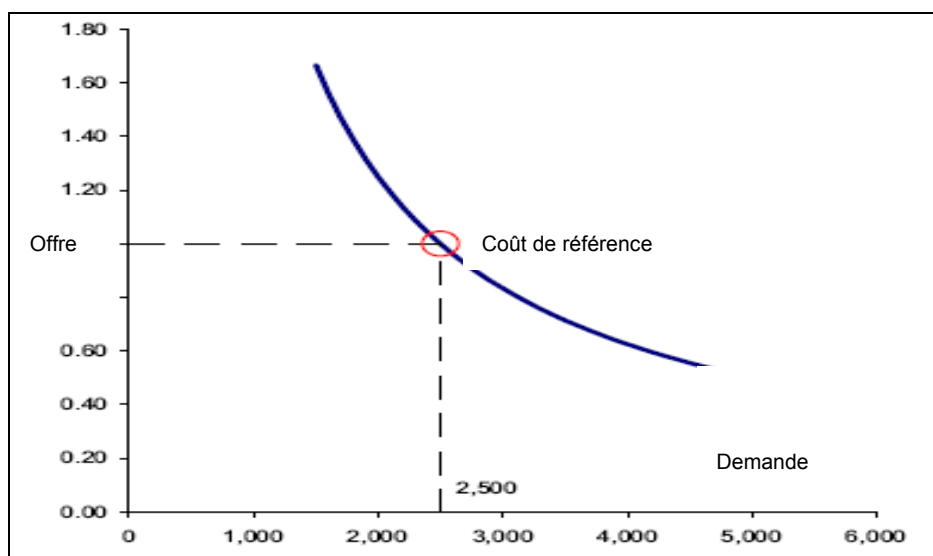


Figure 5.1 Courbes de l'offre sur la demande en transport.

Tiré de FHWA (2003)



5.2.2 Élasticité de la demande

Tel que mentionné précédemment, les usagers réagissent face à une augmentation du coût de transport, résultant en une réduction de la demande, conséquence d'un changement de comportement des usagers. Ces changements se traduisent par :

- la pratique du covoiturage;
- le changement de mode de transport;
- la réduction du nombre de déplacements;
- la modification de l'horaire des déplacements ou de travail;
- l'utilisation d'itinéraires alternatifs;
- la relocalisation de la demeure ou du travail;
- le changement d'occupation.

Ces changements de comportement mettent en relief le fractionnement du coût du produit « transport » qui, dans une certaine mesure, induit une élasticité (ϵ) de la demande (q) qui varie selon le coût (p).

Aussi, il ressort que l'élasticité de la demande dépend de la période de temps durant laquelle le secteur du transport est évalué. D'une part, l'élasticité à court terme est applicable à une période de temps durant laquelle les caractéristiques du transport demeurent inchangées; comme, à titre d'exemple, l'efficacité énergétique des véhicules ou le lieu de travail qui ne changent pas. En termes de planification des transports, la période de temps durant laquelle l'élasticité à court terme est applicable est généralement établie à une année. Aussi, la demande à court terme est moins élastique que celle à plus long terme en conséquence d'un nombre théoriquement moins élevé d'opportunités d'adaptation aux changements de coûts par les usagers.

Selon FHWA (2002), des valeurs d'élasticité²⁰ prédéfinies sont attribuées à chacune des classes fonctionnelles selon une longueur moyenne de déplacements imputés à ces dernières. Les valeurs appliquées d'élasticité sont ajustées de façon proportionnelle à la longueur de la section. L'équation qui suit présente la forme de la courbe de la demande variant selon l'élasticité (e), une constante (α) et le prix du déplacement (p).

$$q = \alpha p^e \quad (5.5)$$

L'équation ci-dessous illustre l'élasticité en tant que variation de la demande, ou débit, (q) en fonction du coût du transport (p). L'élasticité est déterminée à partir de données empiriques.

$$e = \frac{\% \Delta q}{\% \Delta p} \quad (5.6)$$

5.2.3 Facteurs endogènes et facteurs exogènes de la circulation induite

Le HERS établit une distinction entre deux termes de demande selon que l'accroissement de la circulation est causé par des facteurs internes (endogènes) ou externes (exogènes) au système. D'abord, le terme **circulation induite** (*induced traffic*) fait référence au débit additionnel attribuable à une modification des caractéristiques de la section; c'est-à-dire à l'amélioration, à court terme, du niveau de service relié aux conditions de la circulation et à l'état du revêtement (i.e. tributaire des interventions). Le terme **demande induite** (*induced demand*) est employé pour décrire l'augmentation du débit qui est tributaire de facteurs exogènes au système de transport tels que l'étalement urbain, la construction de nouvelles infrastructures, les changements dans les politiques de transports, l'évolution de l'économie et l'accroissement démographique. La demande induite correspond à la croissance de la

²⁰ Les valeurs respectives de la longueur moyenne des déplacements ainsi que de l'élasticité varient de 15 milles et -0,1 pour les routes dites « inter-états » en milieu rural à des valeurs de 4 milles et -0,6 pour les collectrices en milieu urbain (FHWA, 2002, p.18).

circulation prévue par l'utilisateur sur la base d'un coût de transport connu et constant dans le temps.

La Figure 5.2 illustre, à titre représentatif, les débits de la circulation induite (*HERS scenario*), pour chaque période d'investissement (*FP*) en fonction d'une intervention sélectionnée, ainsi que de la demande induite par un taux de croissance de base de la circulation (*baseline forecast*) qui est estimé à partir de facteurs extérieurs.

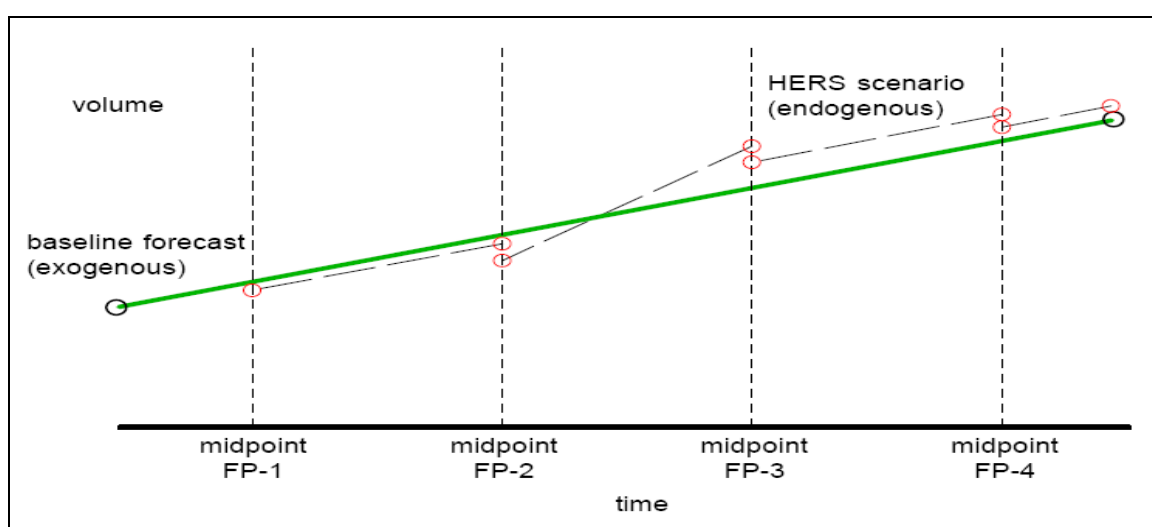


Figure 5.2 Circulation et demande induite.

Tiré de FHWA (2002)

La Figure 5.3 résume la modélisation du HERS-ST en illustrant l'évolution de la demande d'une période d'investissements (*funding period*) à une autre en fonction de la croissance prévue (*baseline forecast*) du débit de circulation (*volume*) ainsi que de la circulation marginale induite ($v_{2,improved} - v_{2,base}$).

La conséquence de la réduction du coût de transport induite par une intervention (*improvement*) sur la section de route génère une augmentation de la demande qui suit la courbe d'élasticité à court terme de la demande.

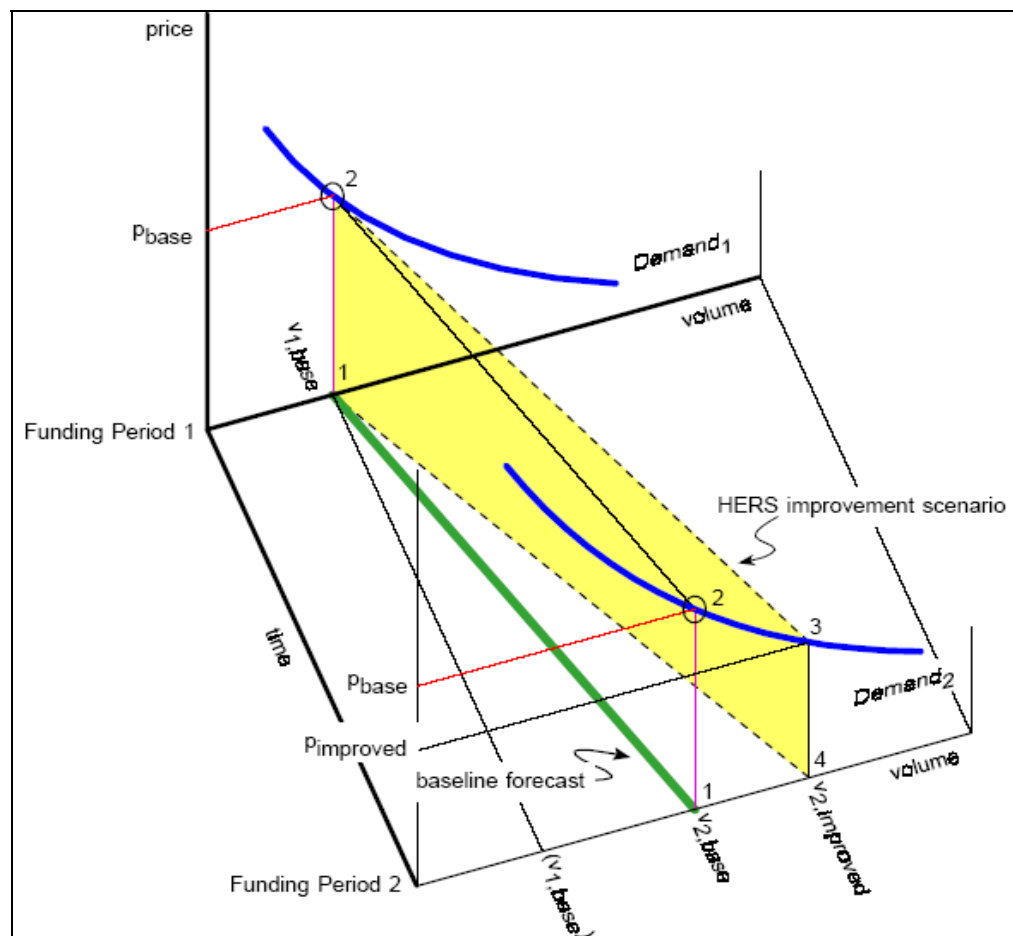


Figure 5.3 Accroissement de la circulation et élasticité de la demande.

Tiré de FHWA (2002a)

5.2.4 Conditions initiales

Le coût initial de transport (*initial price*) est calculé à partir des conditions du revêtement et de la circulation au début de la période d'analyse. Le coût de référence (*baseline price*; P_{base}) correspond au coût initial lorsque la section n'est pas caractérisée par un état de congestion. Dans le cas contraire, le débit de base ($v_{1,base}$) est ajusté suivant un ratio débit-capacité de 1,0. Dans ce cas, le modèle fait l'hypothèse qu'une intervention sera automatiquement imputée par HERS à la section pour la période d'investissement courante. Le coût de référence est ajusté à partir du débit calculé.

5.2.5 Conditions à la fin de la période d'analyse

Les conditions à la fin de la période d'analyse, ou période d'investissement, sont déterminées sur la base d'un taux de croissance de la circulation calculé pour ce qui est de la demande à long terme. La circulation induite à court terme dépend d'une modélisation de l'élasticité pour la durée d'une période d'investissement.

5.2.5.1 Croissance de la circulation

HERS-ST permet à l'utilisateur de prévoir la croissance de la circulation en fonction de différentes caractéristiques de croissance. Il est possible de choisir, parmi trois options, le type de taux de croissance qui sera appliqué au calcul de celui-ci. Il s'agit du taux de croissance exponentiel positif (option 1; équation 5.7), du taux de croissance linéaire (option 2; équation 5.8) et du taux de croissance exponentiel négatif (option 3; équation 5.9). L'option 1 est celle qui est la plus utilisée par l'administration fédérale américaine. Conformément à l'étude de la FHWA (2003), les équations qui suivent présentent les formules de calculs pour les trois options.

$$AADTGR = (FAADT/AADT)^{(1/(FAADTYR-AADTYR))} \quad (5.7)$$

$$AAGRSL = (FAADT-AADT) / (FAADTYR-AADTYR) \quad (5.8)$$

$$AADT_{t1} = 2 * (AADT_{t0} + AAGRSL * (t1 - t0)) - AADT_{t0} * AADTGR^{(t1 - t0)} \quad (5.9)$$

où	AAGRSL	taux de croissance linéaire
	AADTGR	taux de croissance exponentielle positive
	AADT _{t1}	débit au temps t ₁
	AADT _{t0}	débit au temps t ₀
	FAADT	débit futur (donnée HPMS)
	AADT	débit actuel (donnée HPMS)
	FAADTYR	année du futur débit (donnée HPMS)
	AADTYR	année du débit actuel (donnée HPMS)

5.3 Modèle des forces s'opposant au mouvement (HDM-4)

Le modèle de prédiction des forces physiques agissant sur les véhicules est un pré-requis aux calculs de la vitesse et des coûts d'exploitation des véhicules (i.e. consommation de carburant et de lubrifiant, usure des pneus). Le modèle calcule les forces agissant sur le véhicule ainsi que la puissance nécessaire pour contrecarrer ces forces. Les forces peuvent être externes ou internes au véhicule. L'aérodynamisme, la friction des pièces mécaniques, la résistance au roulement, les pentes, l'alignement horizontal et l'inertie sont considérés par le modèle. La Figure 5.4 illustre une représentation graphique des forces agissant sur un véhicule. Les détails des calculs physiques des différentes forces de résistance ne sont pas présentés ici.

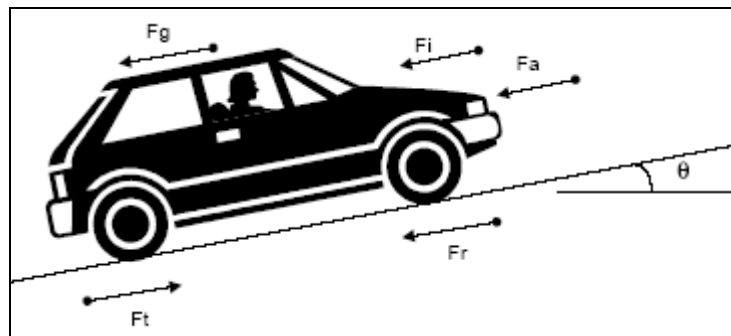


Figure 5.4 Forces agissant sur un véhicule.
Tiré de Bennett, C.R. et Greenwood, I.D.(2000)

L'équation 5.10 présente l'équation de l'équilibre des forces agissant sur le véhicule.

$$F_t = F_a + F_r + F_g + F_c + F_i \quad (5.10)$$

Où	F_t	force de traction du véhicule (N)
	F_a	résistance aérodynamique (N)
	F_r	résistance au roulement (N)
	F_g	résistance due à la pente (N)
	F_c	résistance due à l'alignement horizontal (N)
	F_i	résistance inertielle (N)

5.4 Modèle de vitesse de HDM-4

Le modèle de la vitesse des véhicules de HDM-4 est alimenté par le modèle caractérisant les effets des forces physiques agissant sur un véhicule.

5.4.1 Vitesse en écoulement libre

Le modèle stochastique de prédiction de la vitesse (*Probabilistic speed prediction model*) a été développé suite à des études menées au Brésil, au Kenya, dans les Caraïbes et en Inde (Watanada, 1987). La version précédente du modèle a été modifiée en vue de l'intégration au système HDM-4. Ce modèle prend en considération de nombreux facteurs concernant la géométrie et l'état de la route, les caractéristiques des véhicules, la perception du conducteur et la législation. Toutefois, les interactions entre les véhicules ne sont pas prises en compte par le modèle. Ces facteurs sont présents dans les équations des cinq vitesses limitatives qui composent le modèle de la vitesse en écoulement libre (VSS²¹) de HDM-4 présenté par l'équation 5.11 (Kerali, 2000).

$$VSS = \frac{\exp(\sigma^2/2)}{\left[VDRIVE^{-1/\beta} + VBRAKE^{-1/\beta} + VCURVE^{-1/\beta} + VROUGH^{-1/\beta} + VDESIR^{-1/\beta} \right]^\beta} \quad (5.11)$$

où	VDRIVE	Vitesse limitée par la puissance du moteur (m/s)
	VBRAKE	Vitesse limitée par la puissance de freinage (m/s)
	VCURVE	Vitesse limitée par l'alignement horizontal de la route (m/s)
	VROUGH	Vitesse limitée par l'état de la chaussée (m/s)
	VDESIR	Vitesse limitée par la perception du conducteur (m/s)

²¹ VSS : *Steady state speed* ou vitesse en écoulement libre

La vitesse VSS se traduit comme la vitesse moyenne pour tous les véhicules en un point donné de la section. La prédiction probabiliste de la vitesse effective moyenne (S) sur une section se fait à partir de la vitesse VSS et d'un facteur de correction du bruit statistique de la vitesse (équation 5.12). Le biais est obtenu à partir d'une plage de valeurs déterminées du coefficient de variation de la vitesse moyenne en un point par rapport à la vitesse moyenne sur la section. La vitesse qui en découle est celle qui est utilisée pour les analyses effectuées par HDM-4. Cette vitesse peut être soit calculée avec la vitesse en écoulement libre ou soit à partir de la vitesse corrigée par le modèle de la capacité selon le niveau de circulation. Elle est l'équivalent de la vitesse AES du système HERS-ST.

$$S = 3,6 \text{ SPEEDBIAS VSS} \quad (5.12)$$

où	S	vitesse moyenne sur une section (km/h)
	SPEEDBIAS	facteur de correction du biais de la vitesse (par défaut 0,15)
	VSS	vitesse en écoulement libre en un point sur la section (m/s)

5.4.2 Vitesse limitée par la puissance du moteur (VDRIVE)

La vitesse limitée par la puissance du moteur d'un véhicule, paramètre VDRIVE, est déterminée en fonction de principes dynamiques. Ces principes sont dépendants des forces s'opposant au déplacement du véhicule et de ses caractéristiques physiques et mécaniques (i.e. masse, puissance du moteur, etc.). La vitesse VDRIVE se calcule à partir de l'équation 5.13.

$$1000 \text{ Pd} = z_0 \text{ VDRIVE}^3 + z_1 \text{ VDRIVE} \quad (5.13)$$

où	VDRIVE	vitesse limitée par la puissance du moteur (m/s)
	Pd	puissance du moteur (kW)
	z_0	fonction de la résistance au roulement et aérodynamique
	z_1	fonction de la résistance au roulement, aérodynamique et gravitationnelle

5.4.3 Vitesse limitée par la puissance de freinage (VBRAKE)

Une vitesse maximale due à la puissance de freinage est évaluée par le modèle dans le cas des pentes descendantes. Pour les pentes ascendantes, le modèle ne considère pas le paramètre VBRAKE.

VBRAKE est déterminée en fonction des forces mécaniques agissant sur le véhicule selon une condition relative à une longueur critique de la pente (CGL). Le paramètre CGL, exprimé en kilomètres, est déterminé à partir d'une équation de régression tributaire de l'inclinaison et de la longueur de la pente. Lorsque la longueur réelle d'une pente excède la valeur du paramètre CGL, la vitesse limitée par la puissance de freinage, VBRAKE, est calculée. La quantification du paramètre VBRAKE est obtenue par la résolution de l'équation 5.14.

$$- 1000 P_b = z_0 \text{VBRAKE}^3 + z_1 \text{VBRAKE} \quad (5.14)$$

où	VBRAKE	vitesse limitée par la puissance de freinage (m/s)
	P _b	puissance de freinage du moteur (kW)
	z ₀	fonction de la résistance au roulement et aérodynamique
	z ₁	fonction de la résistance au roulement, aérodynamique et gravitationnelle

5.4.4 Vitesse limitée par l'alignement horizontal de la route (VCURVE)

L'équation (5.15) servant à déterminer la vitesse maximale due aux courbes horizontales a été simplifiée par rapport à la version précédente (HDM-III). Le modèle tient compte du rayon de courbure (R) et de deux facteurs de régression (a₀, a₁) déterminés suite à la réalisation d'études de vitesse en Nouvelle-Zélande (Bennett, 1987) en Thaïlande (Greenwood, 1998) et en Australie (HTC, 1998).

$$VCURVE = a_0 R^{a_1} \quad (5.15)$$

où	VCURVE	vitesse limitée par la sinuosité (m/s)
	a0 et a1	coefficients de régression de l'équation
	R	rayon de courbure moyen sur la section (en mètres)

5.4.5 Vitesse limitée par l'état de la chaussée (VROUGH)

Le paramètre principal entrant dans le calcul de la vitesse maximale limitée par l'état de la surface de la chaussée est l'IRI. Les valeurs proposées, par défaut, pour le facteur de régression a0 ont été actualisées et sont représentatives des véhicules modernes. L'équation 5.16 présente le modèle de prévision de la vitesse en fonction de l'uni.

$$VROUGH = ARVMAX / (a_0 IRI) \quad (5.16)$$

où	VROUGH	vitesse limitée par l'uni de surface (m/s)
	IRI	indice de rugosité internationale
	ARVMAX	vitesse maximale (en m/s)
	a0	facteur de régression

Compte tenu des différents paramètres pouvant affecter la vitesse sur une section, la meilleure alternative pour isoler celui de l'uni de surface consistait en un relevé avant et après une intervention de réfection de la couche de revêtement d'une chaussée. Ces mesures ont été réalisées lors d'une étude réalisée en vue de la calibration de modèles de coûts aux usagers de HDM-4 en Inde en 1997 (NDLI, 1997). Cette étude a permis de valider le modèle existant en fonction de différents types de véhicules.

5.4.6 Vitesse limitée par la perception du conducteur (VDESIR)

La vitesse maximale due à la perception et au comportement du conducteur (VDESIR) tient compte des différents facteurs qui sont difficiles à évaluer distinctement. Ces facteurs sont, entre autres, les considérations en rapport à l'économie de carburant, à la sécurité, à l'usure du véhicule, à la limite de vitesse et à la perception visuelle générale du conducteur. La

vitesse (VDESIR) est évaluée en deux étapes. Dans une première étape, une vitesse maximale est calculée sans tenir compte de la limite de vitesse légale. Cette première vitesse est obtenue en fonction de la vitesse désirée, les abords de la route, le transport non motorisé (lorsque pertinent) et la classe fonctionnelle de la route. Dans une seconde étape, la vitesse est obtenue en fonction de la limite légale de vitesse ainsi qu'un facteur de répression policière. Ces deux vitesses ainsi obtenues, sont finalement comparées et la valeur inférieure est retenue comme étant celle de la vitesse limitée par la perception du conducteur (VDESIR). Des valeurs par défaut, pour certains paramètres, sont proposées dans la littérature et retenues dans le logiciel.

5.4.7 Vitesse annuelle moyenne d'opération

La vitesse moyenne annuelle est obtenue par la sommation des vitesses moyennes d'opération pour chaque période type de circulation (i.e. congestion, vitesse libre,...) et pondérées en fonction du nombre d'heures par année propres à chacune de ces périodes.

La vitesse de fonctionnement moyenne annuelle est calculée pour chaque véhicule représentatif et sur chaque section à partir de la vitesse en écoulement libre ou de la vitesse de déplacement obtenue du modèle de la capacité en fonction du niveau de circulation caractérisant la section.

5.5 Modèle de capacité de HDM-4

Spécifique à HDM-4, le modèle de capacité repose sur une modélisation « en trois zones²²» des interactions des véhicules. La modélisation des effets des cycles de changements de vitesse engendrés par ces interactions est utile pour la quantification de différentes composantes des coûts d'exploitation des véhicules engendrés par la congestion.

²² À savoir écoulement libre, zone intermédiaire et vitesse unique pour tous les véhicules menant à la saturation.

5.5.1 Unité de véhicule équivalent

La philosophie élémentaire du modèle de capacité du HDM-4 réfère à des notions de débit et de densité de la circulation telles que présentées dans l'édition de 1994 du «*Highway Capacity Manual*» (TRB, 1994).

Toutefois, les effets de la puissance des véhicules étant modélisés de façon analytique (mécaniste) par les modèles précédemment présentés (modèles des forces et de la vitesse), la méthodologie de l'outil HDM-4 utilise une unité dite d'«équivalent de véhicule léger» qui est différente du UVP²³ ou du PCU²⁴. En effet, l'unité utilisée par le modèle HDM-4 est le «*Passenger Car Space Equivalencies*» (PCSE).

Le PCSE repose sur le concept de l'espace occupé par un véhicule dans la circulation. Cet espace inclut la longueur du véhicule et la distance entre les véhicules dans la circulation, qui est déterminée à partir d'un intervalle de temps entre le passage de deux véhicules.

Bref, dans HDM-4, la valeur de base du PSCE est de 36 mètres pour une vitesse de 70 km/h. Par conséquent, la capacité est exprimée en PCSE par heure et elle varie en fonction du nombre et de la largeur des voies.

Le Tableau 5.1 dresse la liste de certaines valeurs liées à la détermination du PSCE pour les véhicules proposés par défaut par le HDM-4.

²³ UVP : Unité de Véhicule Particulier; faisant référence aux normes du Tome 1 de la série ouvrages routiers du MTQ (MTQ, 2007a).

²⁴ PCU : *Passenger Car Unit*; faisant référence au *Highway Capacity Manual* (TRB, 2000).

Tableau 5.1

Valeurs PCSE par défaut dans HDM-4²⁵
(Tiré de Bennett et Greenwood (2003))

Vehicle Class	Avg. Length (m)	Time Headway (s)	Space Headway (m)	Total Space (m)	Basic PCSE	Recommended Values (Includes "Basic" plus adjacent lane effects)		
						Two-Lane Four-Lane	Narrow Two-Lane	One-Lane
Car	4.0	1.6	32	36.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Pickup	4.5	1.8	36	40.5	1.1	1.0	1.0	1.0
Heavy Bus	14.0	2.2	44	58.0	1.6	1.8	2.0	2.2
Light Truck	5.0	2.0	40	45.0	1.3	1.3	1.4	1.5
Medium Truck	7.0	2.2	44	51.0	1.4	1.5	1.6	1.8
Heavy Truck	9.0	2.4	48	57.0	1.6	1.8	2.0	2.4
Truck and Trailer	15.0	2.5	50	65.0	1.8	2.2	2.6	3.0

5.5.2 Caractéristiques de la circulation

Différentes classes d'intensités de circulation dites périodes de trafic, sont allouées à partir de différents niveaux de débits distribués annuellement selon la proportion d'heures totales pendant lesquelles une section de route est caractérisée par un débit type. Ces niveaux de débits sont exprimés par un pourcentage du DJMA.

Les coûts aux usagers annuels sont déterminés à partir du coût inhérent à chacune des vitesses de déplacement des différentes périodes de débit multiplié par le nombre d'heures annuellement caractérisées par ce débit. Ce calcul génère le coût total annuel pour les usagers en termes de coûts d'exploitation, de coûts du temps de déplacement, de coûts des accidents et des effets des émissions).

²⁵ Le PCSE a été déterminé à partir d'observations basées sur une vitesse moyenne des véhicules de 70 km/h.

Le modèle est flexible et peut être calibré afin de permettre une représentation adéquate des profils de vitesse et des débits observés dans une région donnée. Cette flexibilité est permise grâce à l'ajustement des valeurs de la capacité en écoulement libre, de la capacité nominale ainsi que de la capacité et de la vitesse à saturation qui sont modifiables.

5.5.3 Vitesse effective et interactions entre les véhicules

Le calcul de la vitesse effective résultante des interactions entre les véhicules repose sur un modèle en trois zones modélisant la vitesse (S) en fonction du débit (Q); 1) un état initial où la vitesse d'un véhicule est indépendante des autres véhicules parcourant la même section de route (zone 1), 2) un état de transition où la vitesse de déplacement des différents véhicules diminue de façon linéaire (zone 2) et 3) et un état où tous les véhicules se déplacent à la même vitesse (zone 3).

Une schématisation de cette modélisation est illustrée à la Figure 5.5. Les vitesses $S1$, $S2$ et $S3$ qui y figurent représentent les vitesses en écoulement libre de différents véhicules, du plus rapide au plus lent, qui sont calculées à partir du modèle de vitesse.

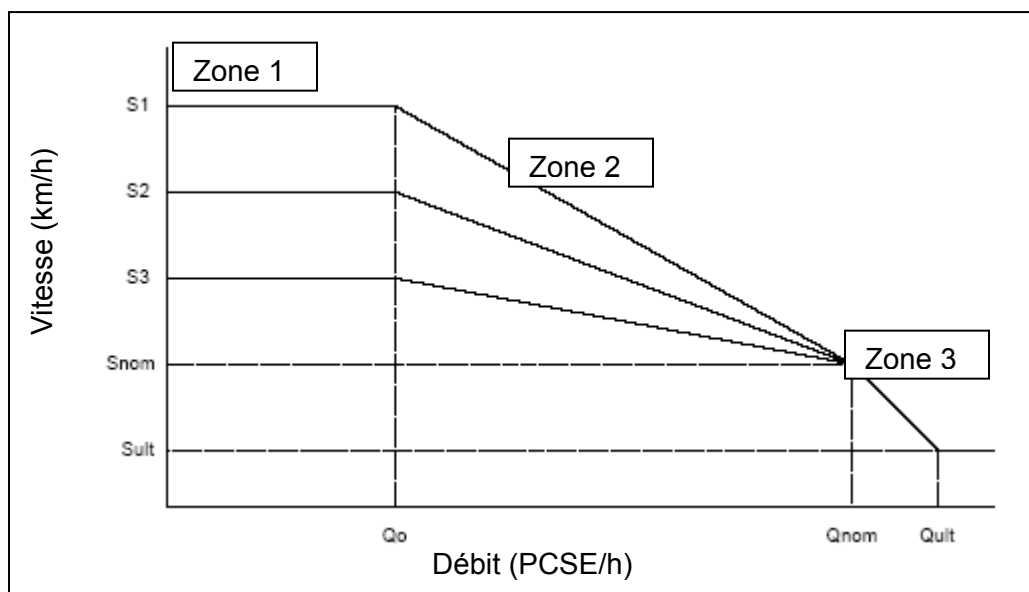


Figure 5.5 Modèle HDM-4 de la vitesse en fonction du débit.

Tiré de Bennett et Greenwood (2003)

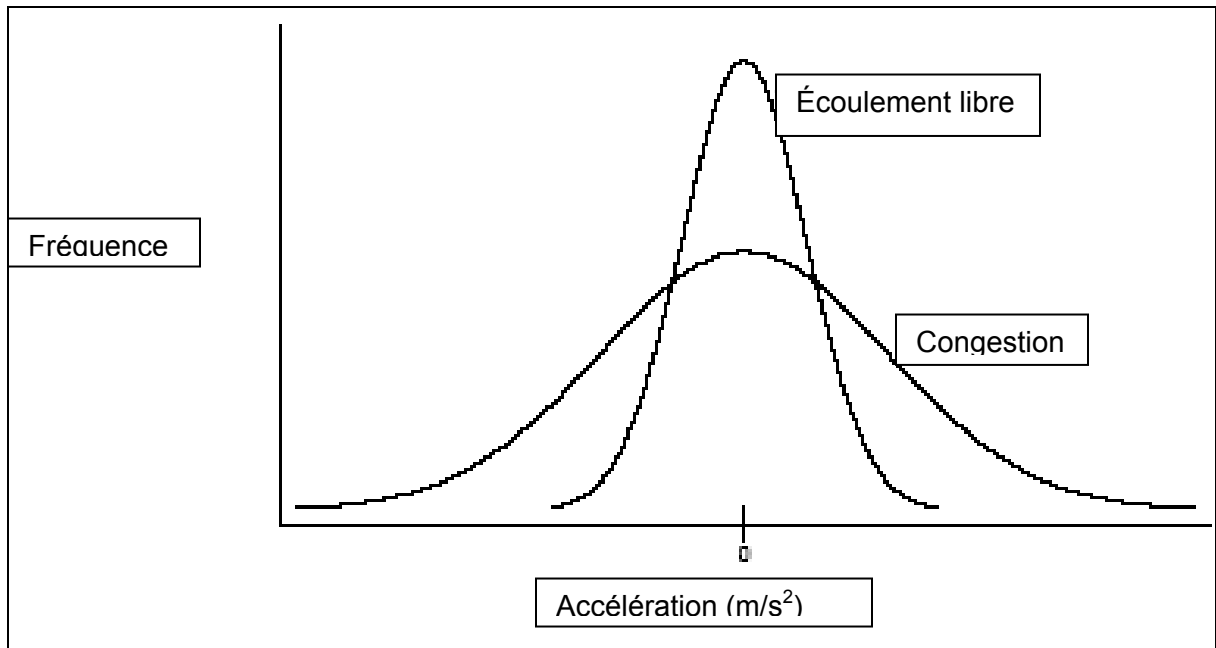
Le point où tous les véhicules ont atteint la même vitesse de déplacement correspond au débit et à la vitesse à capacité nominale (Q_{nom} et S_{nom}). La vitesse à la capacité nominale correspond à 85% de la vitesse en écoulement libre du véhicule le plus lent. Cette vitesse correspond au niveau de circulation caractérisé par un déplacement à vitesse constante sur une période de temps importante. La capacité nominale est exprimée par une proportion de la capacité ultime plus ou moins importante selon le nombre de voies de la chaussée. Dans cet état de la circulation, le taux de décroissance de la vitesse est toujours linéaire mais plus important lorsque le débit de la capacité ultime (Q_{ult}) n'est pas atteint. La capacité ultime représente l'état de la circulation où le débit est maximum. Au-delà de cet état, l'augmentation de la densité de la circulation se traduit par une diminution du débit. Le modèle déduit les vitesses (S) en fonction du débit (Q) de façon arithmétique en utilisant le produit croisé.

5.5.4 Cycles induits de changements de vitesse

Certaines études empiriques ont été réalisées afin de permettre une modélisation de l'effet des interactions des véhicules sur les usagers se traduisant par des cycles de changements de vitesses (i.e. accélération et décélérations). La présence des véhicules les plus lents influence les déplacements des autres véhicules. Les accélérations (et décélérations) influencent les coûts aux usagers (coûts d'exploitation des véhicules et temps de transport) et sont pris en compte par le modèle. Évidemment, la vitesse de déplacement moyenne sur une section ne correspond pas à la vitesse instantanée en tout point sur cette section; elle n'est pas constante.

L'amplitude des accélérations varie selon la densité de la circulation; lorsqu'il y a état de congestion, l'amplitude moyenne des accélérations est moins importante et la distribution de ces amplitudes est plus étalée par rapport à des conditions en écoulement libre. Ceci se traduit par des cycles d'accélérations plus fréquents qui engendrent des coûts aux usagers plus importants.

À la page suivante, la Figure 5.6 illustre ce phénomène en présentant une distribution des amplitudes des accélérations pour l'état de congestion et en écoulement libre. Les valeurs négatives d'accélérations correspondent à des décélérations.



**Figure 5.6 Fréquences de l'amplitude des accélérations
selon les conditions de la circulation.**

Adapté de Bennett et Greenwood (2003)

Le bruit dans la distribution de l'amplitude des accélérations (i.e. les écarts par rapport à la moyenne) est un indicateur de l'importance des changements de vitesses. La possibilité d'évaluer l'amplitude de ce bruit en fonction des caractéristiques de la route et de la circulation permet d'en déduire les effets sur les coûts aux usagers. Le modèle différencie le bruit dit « naturel » dépendant du conducteur et de la route (plus précisément le tracé, les abords, la limite prescrite et l'Uni) et le bruit engendré par les interactions dans la circulation. L'équation 5.17 présente le calcul du bruit total.

$$\sigma_a = (\sigma_{at}^2 + \sigma_{an}^2)^{(1/2)} \quad (5.17)$$

- σ_a bruit de l'accélération par type de véhicule en période de trafic (m/s^2),
- σ_{at} bruit de l'accélération dû aux interactions des véhicules (m/s^2),
- σ_{an} bruit de l'accélération naturelle par type de véhicule (m/s^2).

Selon la Figure 5.5, l'état où le bruit est minimum correspond au point limite de vitesse en écoulement libre (Q_0). Il s'agit d'un état de la circulation où on peut assumer qu'il n'y a que

du bruit dit « naturel » dans la distribution des valeurs de l'accélération. L'état où le bruit dû à la circulation est maximum est, par conséquent, l'état où le bruit total est maximum. Il se produit lorsque la capacité ultime est atteinte. Le modèle détermine ce bruit en fonction d'un ratio bruit-bruit maximum qui est dérivé à partir d'une équation de régression paramétrée avec le ratio débit-capacité. Le bruit maximum est imputé par défaut au logiciel en fonction du véhicule (le bruit varie selon le ratio masse du véhicule-puissance du moteur) et de la classe fonctionnelle de la route. Ces valeurs, qui peuvent être modifiées par l'utilisateur, ont été validées lors de trois études empiriques : en Inde (NDLI, 1997), en Indonésie (HTC, 1999) et en Thaïlande (HTC, 1997).

L'hypothèse défendue lors du développement du modèle est que la distribution des amplitudes suit une distribution normale. Les expérimentations mentionnées ont permis de valider cette hypothèse malgré certains écarts qui sont causés par le fait que les amplitudes des décélérations soient plus sensibles au comportement du conducteur que celle des accélérations. Ces dernières sont gouvernées par la performance du véhicule. La FIGURE 5.7 illustre ce phénomène.

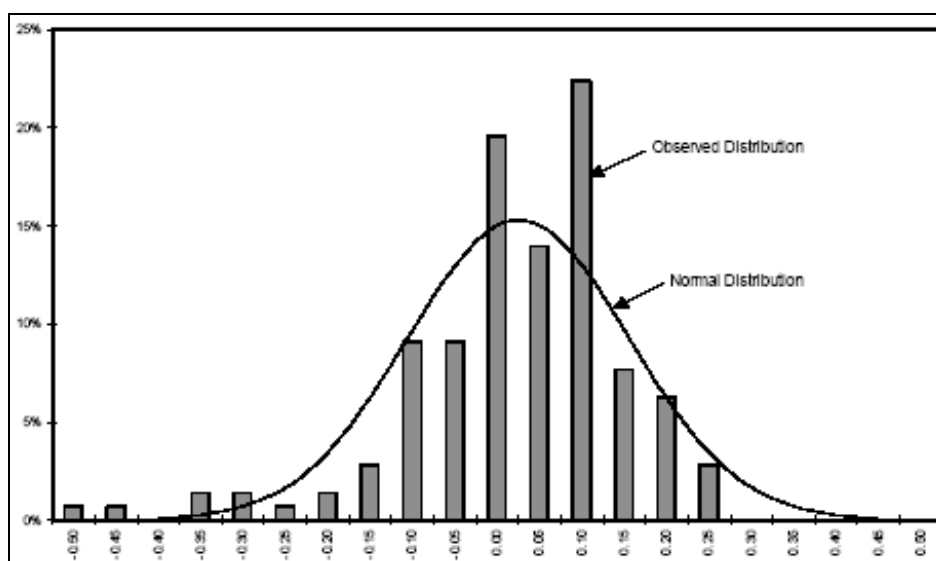


Figure 5.7 Distribution observée des fréquences de l'amplitude des accélérations.

Tiré de Bennett et Greenwood (2003)

Le modèle de la capacité du HDM-4 permet d'évaluer les effets de la circulation sur les usagers et la collectivité en ce qui concerne les coûts d'exploitation des véhicules. En effet, la modélisation des cycles d'accélérations-décélérations induits par les interactions des véhicules est utilisée pour calculer la consommation marginale qui en est tributaire en terme de carburant, de pièces de rechange et d'usure des pneus.

CHAPITRE 6

MODÈLES DES COÛTS D'EXPLOITATION DES VÉHICULES

Les modèles de coûts d'exploitation des véhicules du HERS et du HDM-4 portent sur la consommation des ressources matérielles (carburant, huile, pièces de rechange, capital) et humaines (main d'œuvre). Chacun des systèmes a été développé selon une philosophie différente.

Tel que décrit au chapitre 2, les modèles du HERS-ST sont de nature probabiliste et suivent la logique des différentes études économiques et statistiques réalisées dans ce domaine aux États-Unis pendant les dernières décennies. À partir des ces études, des équations utilisant des facteurs d'ajustement ont été développées en fonction de diverses plages de valeurs et pour des paramètres spécifiques.

Les modèles de HDM-4 sont de nature mécanique et probabiliste, ou probabiliste structurée, et proviennent du développement de modèles antérieurement utilisés par des administrations routières, par des centres de recherches en transport ainsi que par différentes études soutenues par la Banque Mondiale et d'autres organisations internationales.

À la page suivante, le Tableau 6.1 présente une énumération des modèles principaux sous-jacents aux deux systèmes.

Tableau 6.1
Modèles des systèmes HERS-ST et HDM-4

HERS-ST	HDM-4
Modèle général mécanique	
	Forces sur le véhicule
Modèles de vitesse et de déplacement	
Vitesse	Vitesse libre
	Effet du volume sur le débit
Demande induite	
Modèles de coûts d'exploitation des véhicules²⁶	
Consommation de carburant	Consommation de carburant
Consommation de l'huile du moteur	Consommation de l'huile du moteur
Consommation des pneus	Consommation des pneus
Service et entretien	Consommation des pièces de rechange et main d'œuvre d'entretien
Dépréciation	Utilisation et vie utile
	Capital (dépréciation et intérêts)
Modèles du temps	
Temps des occupants	Temps du conducteur
	Temps des passagers
Valeur de l'inventaire	Temps d'attente de la marchandise
Modèle des effets de travaux	
	Effets des travaux
Modèles des accidents²⁷	
Coûts des accidents	Coûts des accidents
Modèles des effets sur l'environnement²⁸	
Coûts externes	Émissions des véhicules
	Impacts du bruit
	Analyse de la consommation d'énergie

²⁶ Les modèles de coûts d'exploitation concernant les effets des zones de travaux sur les coûts aux usagers sont exclus de cette étude.

²⁷ Les modèles HERS et HDM-4 concernant les coûts des accidents sont exclus de cette étude.

²⁸ Les modèles HDM-4 concernant les impacts du bruit et l'analyse de la consommation d'énergie sont exclus.

6.1 Modèles du système HERS-ST

Les modèles HERS-ST des coûts d'exploitation des véhicules sont de nature probabiliste et ils permettent de calculer des coûts reliés à la consommation de carburant, de lubrifiant et de pneus, à l'entretien et aux réparations ainsi qu'à la perte de valeur des véhicules.

Les modèles consistent en des équations générales de taux de consommation suivant une logique développée par le TRDF en 1980 (Zaniewski, 1982), qui ont été actualisés par l'utilisation de facteurs d'ajustement à la fin des années 90 (Cambridge Systematics, 2002b). Les facteurs d'ajustement reflètent les conditions du revêtement et l'évolution de la technologie. Les coûts unitaires proviennent de l'étude fédérale d'allocation des coûts réalisée en 1997 (FHWA, 1997).

L'architecture des équations générales de coûts est commune à toutes les composantes.

Le calcul des taux de consommation s'obtient à partir de la vitesse des véhicules, de la géométrie de la route, des conditions du revêtement et de la distance moyenne parcourue entre les arrêts (ADTBS).

La Figure 6.1 illustre l'architecture des calculs des coûts d'exploitation des véhicules par le système HERS-ST.

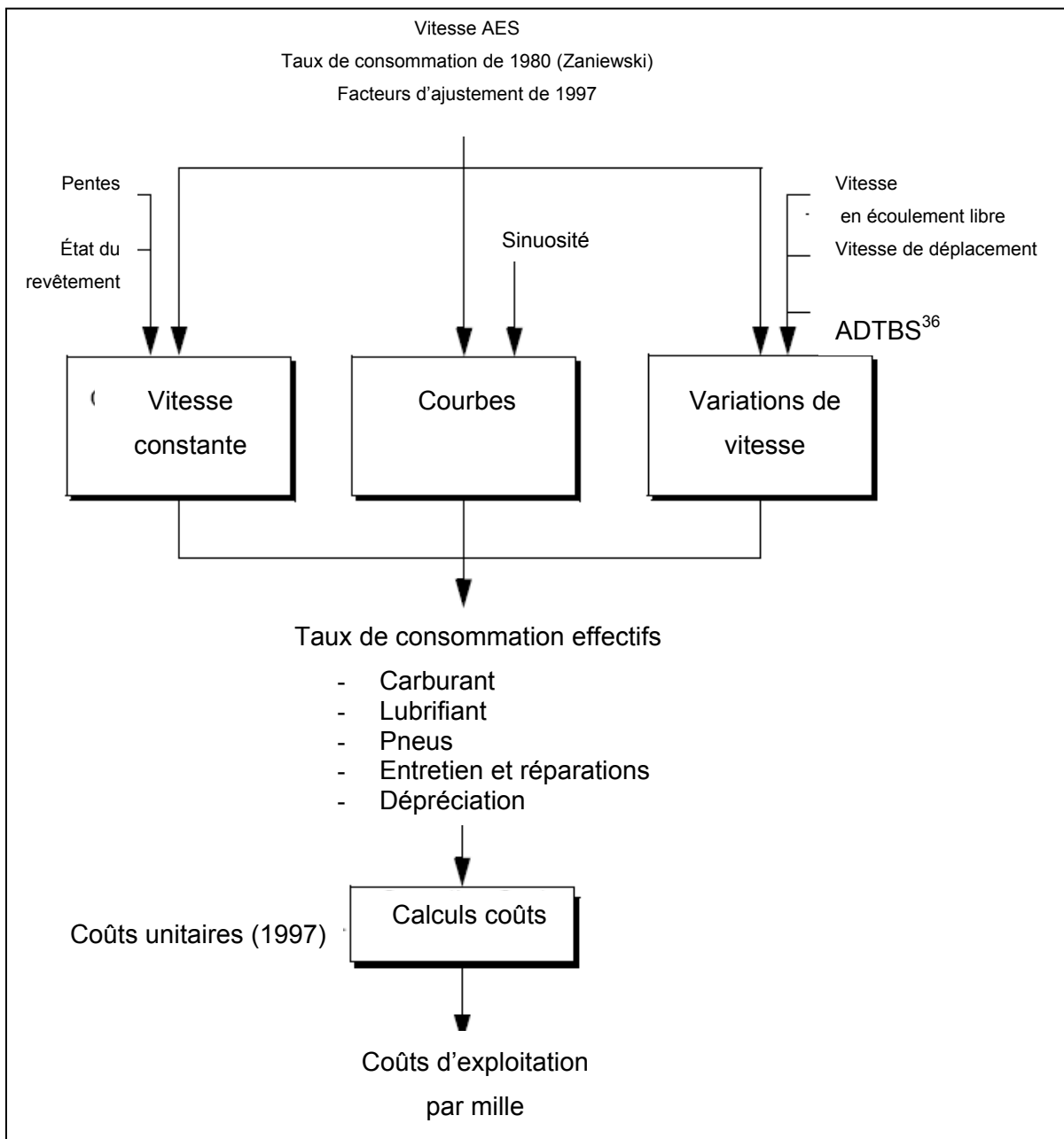


Figure 6.1 Méthodologie de calcul des coûts d'exploitation des véhicules dans HERS-ST.

Adapté de FHWA (2000)

Le Tableau 6.2 présente la logique des équations générales qui servent à modéliser les coûts d'exploitation des véhicules à vitesse constante ainsi que les coûts marginaux causés par les variations de vitesses et par les courbes.

Tableau 6.2

Logique générale des équations des coûts d'exploitation (HERS-ST)

	Pondération		Taux		Facteur 1		Coût		Facteur 2
Vitesse constante	Facteur de pondération (si requis)		Taux de consommation à vitesse constante		Facteur d'ajustement condition du revêtement				
Variations de vitesse		X	Taux de consommation du aux variations de vitesses	X		X	Coût unitaire par type de véhicule	/	Facteur d'ajustement du taux de consommation (technologie)
Courbes	Facteur de pondération (si requis)		Taux de consommation du à l'alignement horizontal						

Le Tableau 6.2 illustre bien la logique des équations de coûts obtenues à partir de taux de consommation calculés, de coûts unitaires et de différents facteurs d'ajustement et de pondération. Les calculs des CEV à vitesse constante ($CSOPCST_{vt}$; équation 6.1), de ceux dus aux variations de vitesses ($VSOPCST_{vt}$; équation 6.2) ainsi que de ceux causés par la sinuosité de la route ($COPCST_{vt}$; équation 6.3) sont l'objet des équations présentées ci-dessous. Ces coûts sont calculés de manière distincte, pour chaque véhicule représentatif, et sont additionnés de façon pondérée en fonction des poids prédéterminés dans HERS-ST; se référer au Tableau 6.6.

$$\begin{aligned}
 CSOPCST_{vt} = & CSFC \times PCAFFC \times COSTF_{vt} / FEAF_{vt} \\
 & + CSOC \times PCAFOC \times COSTO_{vt} / OCAF_{vt} \\
 & + 0.01 \times CSTW \times PCAFTW \times COSTT_{vt} / TWAF_{vt} \\
 & + 0.01 \times CSMR \times PCAFMR \times COSTMR_{vt} / MRAF_{vt} \\
 & + 0.01 \times CSVD \times PCAFVD \times COSTV_{vt} / VDAF_{vt}
 \end{aligned}
 \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned}
 VSOPCST_{vt} = & VSFC \times COSTF_{vt} / FEAF_{vt} \\
 & + VSOC \times COSTO_{vt} / OCAF_{vt} \\
 & + VSTW \times COSTT_{vt} / TWAF_{vt} \\
 & + VSMR \times COSTMR_{vt} / MRAF_{vt} \\
 & + VSVD \times COSTV_{vt} / VDAF_{vt}
 \end{aligned}
 \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned}
 COPCST_{vt} = & CFC \times COSTF_{vt} / FEAF_{vt} \\
 & + 0.01 \times CTW \times COSTT_{vt} / TWAF_{vt} \\
 & + 0.01 \times CMR \times COSTMR_{vt} / MRAF_{vt}
 \end{aligned}
 \quad (6.3)$$

Le Tableau 6.3 présente un sommaire des différents paramètres entrant dans les calculs des CEV dans les trois équations générales.

Tableau 6.3

Paramètres des équations de base (HERS-ST)

Composantes	Taux de consommation des ressources			Facteurs d'ajustement pour les conditions du revêtement	Coûts unitaires des ressources (Tableau 6.4)	Facteurs d'ajustement d'efficacité (Tableau 6.3)
	Vitesse constante	Variations de vitesse (excès)	Courbes (excès)			
Carburant	CSFC	VSFC	CFC	PCAFFC	COSTF _{vt}	FEAF _{vt}
Lubrifiant	CSOC	VSOC	-	PCAFOC	COSTO _{vt}	OCAF _{vt}
Pneus	CSTW	VSTW	CTW	PCAFTW	COSTT _{vt}	TWAF _{vt}
Entretien et réparations	CSMR	VSMR	CMR	PCAFMR	COSTMR _{vt}	MRAF _{vt}
Dépréciation	CSVD	VSVD	-	PCAFVD	COSTV _{vt}	VDAF _{vt}

6.1.1 Taux de consommation des composantes

Les taux de consommation des composantes, c'est-à-dire le carburant, le lubrifiant, la dépréciation, les pneus ainsi que l'entretien et les réparations, sont obtenus à partir de systèmes d'équations calculant les taux qui ont été originalement développés par le TRDF (Zaniewski, 1982) pour les différentes composantes, et cela pour chaque véhicule représentatif. Le modèle des coûts d'exploitation des véhicules de HERS-ST sélectionne des équations en fonction des différents paramètres pour les équations de calculs d'un taux à vitesse constante ainsi que des taux marginaux reliés aux cycles de changements de vitesse et à la sinuosité du tracé de la route.

6.1.1.1 Vitesse constante

Les taux de consommation à vitesse constante sont calculés à partir des paramètres de la pente (GR) et de la vitesse effective moyenne (AES); à l'exception de la composante de la dépréciation dont le calcul ne tient compte que de la vitesse. Les taux de consommation des cinq composantes sont calculés pour chaque véhicule. Certaines des équations ont été révisées en 2000 lors d'une étude de révision des modèles (Cambridge Systematics, 2002b).

6.1.1.2 Cycles de changements de vitesse

Le modèle évalue les taux de consommation marginaux reliés aux cycles de changements de vitesse pour les cinq composantes de coûts d'exploitation. Ces calculs proviennent des équations développées par le TRDF et s'appliquent aux sections de route munies de dispositifs de contrôle de la circulation. Le paramètre utilisé par le système d'équation est la vitesse maximale des véhicules pendant le cycle de changement de vitesse (CSMAX).

6.1.1.3 Sinuosité du tracé en plan de la route

Les calculs des taux de consommation marginaux dus à la sinuosité du tracé de la route ont complètement été révisés en 2000 par *Cambridge Systematics Inc* (Cambridge Systematics, 2002b). Les effets des courbes sont uniquement calculés dans le cas de la consommation de carburant, de pneus et pour estimer leur effet sur l'entretien et les réparations des

véhicules. Les paramètres utilisés pour la sélection et les calculs des taux sont la vitesse effective moyenne (AES) et le rayon de courbure mesuré en degrés (DCA).

6.1.2 Coûts unitaires

Les coûts unitaires des différentes composantes des CEV proviennent des résultats de l'étude «*Highway Cost Allocation Study*» (HCAS) réalisée en 1997 (FHWA, 1997), de statistiques américaines obtenues à l'échelle nationale, d'indices économiques et d'une étude d'actualisation du modèle HERS. Ces coûts sont en dollars US de 1997 et sont figés dans le code du système HERS-ST. Les quantités sont exprimées par des unités de mesure du système impérial. Les coûts unitaires des différentes ressources pour chaque véhicule sont présentés dans le Tableau 6.4.

Tableau 6.4

Coûts unitaires d'exploitation des véhicules (HERS-ST)
(Adapté FHWA, 2000)

Véhicules		Carburant	Lubrifiant	Pneus	Entretien et réparations	Dépréciation	
Catégorie	Type	(USD ²⁹ /gal. US)	(USD/pinte)	(USD/unité)	(USD/ mille)	(USD/ véhicule)	
Véhicules à quatre pneus	Petites automobiles	0,871	3,537	45,2	84,1	18 117	
	Automobiles moyennes et grandes	0,871	3,537	71,5	102,1	21 369	
	Camionnettes et vanettes	0,871	3,537	78,8	129,8	23 028	
Véhicules lourds	Porteurs	Camions « 6 roues »	0,871	1,429	190,1	242,9	34 410
		Camions comportant 3 essieux et +	0,762	1,429	470,7	343,5	75 702
	Semi-remorques	Camions articulés 3 ou 4 essieux	0,762	1,429	470,7	355,8	87 690
		Camions articulés 5 essieux et +	0,762	1,429	470,7	355,8	95 349

²⁹ USD: dollar des États-Unis (1997)

Le Tableau 6.5 indique la provenance des différentes informations utilisées pour l'évaluation des coûts unitaires intégrés au système HERS-ST.

Tableau 6.5

Logique d'allocation des coûts unitaires d'opérations

Véhicules		Carburant	Lubrifiant	Pneus	Entretien et réparations	Dépréciation
Catégorie	Type					
Véhicules à quatre pneus	Petites automobiles	Coût économique de l'essence (au détail)	Revision to HERS 1997 (Cambridge systematics) et Indice du prix à la consommation (fluides)	Revision to HERS 1997 (Cambridge systematics) et Indice du prix à la consommation (fluides)	Revision to HERS 1997 (Cambridge systematics) et Indice du prix à la consommation (fluides)	Cambridge systematics et US DoC
	Automobiles moyennes et grandes					
	Camionnettes et vanettes					Hypothétique
Véhicules lourds	Porteurs	Camions « 6 roues »	Coût économique du diesel (au détail)	Revision to HERS 1997 (Cambridge systematics) et Indice du prix à la consommation (fluides)	Revision to HERS 1997 (Cambridge systematics) et Indice du prix à la consommation (fluides)	Blue book
		Camions comportant 3 essieux et plus				
	Semi-remorques	Camions articulés 3 ou 4 essieux				HCAS 1997
		Camions articulés à 5 essieux et +				

6.1.3 Facteurs d'ajustement pour les taux de consommation

La liste de facteurs d'ajustement pour les taux de consommation utilisés par le modèle de HERS-ST est présentée au Tableau 6.6. Ces facteurs ont été établis lors d'une étude produite par la firme «Cambridge Systematics Inc.» (Cambridge Systematics, 2002b) vouée à une actualisation des modèles précédemment développés par le TRDF (Zaniewski, 1982).

Tableau 6.6

Facteurs d'ajustement des taux de consommation (HERS-ST)

Véhicules		Carburant	Lubrifiant	Pneus	Entretien et répar.	Dépréciation
Catégorie	Type					
Véhicules à quatre pneus	Petites automobiles	1,536	1,05	1,0	1,0	1,3
	Automobiles moyennes et grandes	1,536	1,05	1,0	1,0	1,3
	Camionnettes et vanettes	1,536	1,05	1,0	1,0	1,3
Véhicules lourds	Porteurs	Camions « 6 roues »	1,207	1,05	1,0	1,3
		Camions comportant 3 essieux et plus	1,167	1,05	1,0	1,3
	Semi-remorques	Camions articulés 3 ou 4 essieux	1,167	1,05	1,0	1,3
		Camions articulés à 5 essieux et +	1,167	1,05	1,0	1,3

Les facteurs d'ajustement pour le calcul des coûts en carburant tiennent compte de statistiques de consommation des véhicules ainsi que de l'âge de la flotte. Ces facteurs d'ajustement ont été attribués en fonction du type de carburant généralement utilisé par chacune des catégories de véhicules représentatifs. Le facteur concernant la consommation de lubrifiant est uniforme pour tous les véhicules et a été déterminé de la manière similaire à ceux concernant la consommation de carburant. La consommation de pneus ainsi que le coût d'entretien et de réparations des véhicules sont caractérisés par des facteurs d'ajustement unitaires. Dans ce cas, il a été considéré que les différents indices économiques reflétaient l'augmentation de la durabilité des pneus et la baisse de la fréquence d'entretien des véhicules puisqu'ils avaient été caractérisés par une faible augmentation pendant la période étudiée. Enfin, une augmentation généralisée de la durée de vie utile des véhicules de l'ordre de 38% a été posée pour la détermination du facteur d'ajustement relié à la dépréciation des véhicules (FHWA, 2000).

Une synthèse des hypothèses utilisées pour le développement des différents facteurs d'ajustements des taux de consommations est présentée dans le Tableau 6.7.

Tableau 6.7

Logique d'évaluation des facteurs d'ajustement

Véhicules		Carburant	Lubrifiant	Pneus	Entretien et répar.	Dépréciation
Catégorie	Type					
Véhicules à quatre pneus	Petites automobiles	Modèle de consommation et donnée d'efficacité énergétique	Réduction générale de la consommation en lubrifiants par la flotte	Indice du prix à la consommation et l'indice du prix à la production	Réduction des besoins en entretien des véhicules	Estimé à partir de l'augmentation de la durée de vie des automobiles
	Automobiles moyennes et grandes					
	Camionnettes et vanettes					
Véhicules lourds	Unitaire	Données d'efficacité énergétique et inventaire de la flotte				
	Camions « 6 roues »					
	Camions comportant 3 essieux et plus					
	Articulés					
	Camions articulés 3 ou 4 essieux					
	Camions articulés à 5 essieux et +					

6.1.4 Facteurs d'ajustement liés à l'état du revêtement

Les différents facteurs d'ajustement, sont utilisés pour la modélisation des coûts marginaux liés à l'état du revêtement, en fonction de l'indice PSR. Le facteur d'ajustement est le même pour la consommation de carburant et de lubrifiant. Ce facteur ainsi que celui concernant la consommation en pneus sont calculés de façon distincte pour les véhicules à quatre roues et pour les camions. Les autres facteurs d'ajustement sont calculés séparément pour chaque composante et à partir de systèmes à trois équations caractérisant respectivement les véhicules à quatre roues, les camions unitaires et les camions articulés.

6.2 Modèles du système HDM-4

Les modèles HDM-4 sont empiriques structurés et sont caractérisés par une logique propre à chacun qui est tributaire de diverses études de développement présentées dans le chapitre 3. Dans certains cas, ces modèles sont inspirés d'applications existantes. C'est le cas pour le modèle de consommation de carburant qui est fortement inspiré de celui de l'«*Australian Road Research Board*» (ARRB). Dans d'autres cas, ils sont à l'avant-garde des techniques de modélisation des coûts aux usagers. Ces modèles reposent sur des paramètres comme la vitesse des véhicules, la géométrie de la route, l'état du revêtement et de plusieurs caractéristiques des véhicules.

6.2.1 Modèle de la consommation de carburant

Le modèle de consommation de carburant de HDM-4 est basé sur le modèle «*Australian Road Fuel Consumption Model*» (ARFCOM) développé par l'ARRB. Ce modèle a été préféré à celui de HDM-III et à celui développé en Afrique du sud. Sommairement, le modèle ARFCOM est de nature mécanique et il établit des prédictions de consommation à partir de la puissance du moteur requise (P_{tot}) au-delà d'un minimum de consommation correspondant à celle engendrée à la vitesse de révolution minimale du moteur en marche. Le modèle de la consommation de carburant de HDM-4 est une amélioration du modèle australien. Il comporte des modifications en ce qui a trait à la modélisation de la vitesse de révolution du moteur, de la puissance requise pour assurer le fonctionnement des accessoires et de la friction interne du moteur.

La consommation instantanée de carburant, exprimée en ml/s, est calculée à partir de l'équation suivante (Bennett, 2003) :

$$IFC = \max (FC_{\min}, \xi P_{\text{tot}} (1 + dFUEL)) \quad (6.4)$$

où

IFC :	consommation instantanée de carburant (ml/s)
FC _{min} :	consommation minimale de carburant (ml/s)
ξ :	facteur d'efficacité de transmission de la puissance (ml/kW/s)
P _{tot} :	puissance totale requise (kW)
dFUEL :	consommation additionnelle de carburant due aux cycles de changements de vitesses

6.2.1.1 Consommation minimale de carburant (FC_{min})

Dans la version la plus récente du modèle, la consommation minimale de carburant correspond à la quantité de carburant consommé lorsque le moteur fonctionne au ralenti (*Idle speed*). Cette énergie est utilisée pour assurer le fonctionnement des accessoires (ventilateur, servo-direction, alternateur, etc.) et pour contrecarrer les forces de friction interne du moteur. La consommation de carburant lorsque le moteur fonctionne au ralenti (α) dépend de la cylindrée du moteur et est obtenue à partir de l'équation 6.5.

$$\alpha = 0,220 \text{ DENG} - 0,0193 \text{ DENG}^2 \quad (6.5)$$

où	α	consommation de carburant à la vitesse de révolution minimale du moteur (ml/s)
	DENG	cylindrée du moteur (l)

6.2.1.2 Facteur d'efficacité de transmission de la puissance (ξ)

Le calcul du facteur d'efficacité de transmission de la puissance du moteur au système de propulsion se fait à l'aide de l'équation 6.6. L'amplitude de la décroissance proportionnelle

de l'efficacité du moteur à haut régime (ehp) et le facteur d'efficacité de base du moteur (ξ_b) sont dépendants du type de carburant utilisé.

Le facteur d'efficacité de la transmission de la puissance est calculé à partir de l'équation 6.6.

$$\xi = \xi_b (1 + ehp (P_{tot} - P_{eng}) / P_{rat}) \quad (6.6)$$

où	ξ	facteur d'efficacité de transmission de la puissance (ml/kW/s)
	ξ_b	facteur d'efficacité de base du moteur (ml/kW/s)
	ehp	décroissance proportionnelle de l'efficacité à haut régime
	P_{tot}	puissance totale requise (kW)
	P_{eng}	puissance requise pour contrecarrer la friction interne du moteur (kW)
	P_{rat}	puissance nominale du moteur

6.2.1.3 Puissance totale requise (P_{tot})

La puissance totale générée par le moteur doit être supérieure aux forces qui s'opposent au déplacement³⁰ et doit également être suffisante pour contrecarrer les forces de frictions internes du moteur et pour permettre le fonctionnement des accessoires du véhicule (direction assistée, alternateur, système de refroidissement, climatiseur). Le modèle de la consommation de carburant de HDM-4 tient compte de la puissance fournie par le véhicule. Cette puissance est calculée de façon différente selon que le moteur fournisse une puissance nette pour permettre la propulsion du véhicule (équation 6.7) ou que la somme des forces externes permette au véhicule de se déplacer sans utiliser la puissance du moteur (équation 6.8).

Le modèle tient compte de la contribution de la gravité au fonctionnement du moteur dans les pentes descendantes.

³⁰ Se référer au modèle traitant des forces qui s'opposent au déplacement.

L'uni du revêtement est indirectement considéré par l'équation du fait que le modèle des forces agissant sur le déplacement du véhicule tient compte de l'indice IRI.

$$P_{tot} = P_{tr} / edt + P_{accs} + P_{eng} \quad \text{si } P_{tr} \geq 0 \quad (6.7)$$

$$P_{tot} = P_{tr} edt + P_{accs} + P_{eng} \quad \text{si } P_{tr} < 0 \quad (6.8)$$

où	P_{tot}	puissance totale requise (kW)
	P_{tr}	puissance requise pour contrecarrer les forces s'opposant au mouvement du véhicule (kW)
	edt	facteur d'efficacité de la transmission
	P_{accs}	puissance requise pour le fonctionnement des accessoires (kW)
	P_{eng}	puissance requise pour contrecarrer la friction interne du moteur (kW)

La puissance requise pour le fonctionnement des accessoires ainsi que celle requise pour contrecarrer la friction interne du moteur sont dépendantes de la vitesse de révolution du moteur et de certains paramètres mécaniques liés à la friction du moteur et au fonctionnement des accessoires qui ne sont pas présentés ici (Bennett, 2003).

6.2.1.4 Consommation additionnelle de carburant due aux accélérations (dFUEL)

Les effets de la congestion sur la consommation de carburant sont modélisés à partir de la proportion marginale de carburant consommée en raison de la congestion, c'est-à-dire les cycles de changements de vitesse (équation 6.9).

Les interactions entre les véhicules causent une augmentation de la consommation de carburant qui est reliée aux cycles de changements de vitesses qui sont induits en période de congestion. La modélisation de ces interactions est présentée dans le chapitre traitant de la capacité. Les effets de la congestion sur la consommation de carburant ont été validés par des études menées en Inde (HTC, 1999) et en Nouvelle-Zélande (Bennett, 2002).

La consommation marginale de carburant attribuable au niveau de service est calculé à partir de l'équation 6.9.

$$dFUEL = FCCONG / FCSTEADY - 1 \quad (6.9)$$

où	dFUEL	consommation additionnelle de carburant due aux cycles de changements de vitesses (ml/km)
	FCCONG	consommation de carburant lorsqu'il y a congestion (ml/km)
	FCSTEADY	consommation de carburant à vitesse constante (ml/km)

La consommation moyenne de carburant pour une section est exprimée en litres par 1000 kilomètres à partir des calculs de consommation instantanée et de la longueur de la section.

6.2.2 Modèle de la consommation de l'huile du moteur

Le modèle de consommation de l'huile du moteur du HDM-4 est basé sur deux aspects : le fonctionnement du moteur et la contamination de l'huile. Les taux de consommation sont exprimés en litres par 1000 kilomètres.

Le taux de consommation lié à la contamination de l'huile du moteur est calculé à partir de la distance parcourue entre les changements d'huile et du volume de lubrifiant (capacité du moteur). Des valeurs par défaut pour les différents véhicules représentatifs ont été imputées au modèle.

Le taux de consommation engendré par le fonctionnement du moteur est calculé à partir d'une équation dépendante de la consommation de carburant (en l/1000 km) et de la perte de lubrifiant en fonction de la consommation de carburant (en $I_{lubrifiant}/I_{carburant}$).

L'uni et les cycles de changement de vitesse sont considérés par le modèle puisque la consommation de lubrifiant est directement dépendante de la consommation de carburant.

Le modèle de consommation de lubrifiant inclus dans le HDM-4 est calculé à partir des équations 6.10 et 6.11.

$$\text{OIL} = \text{OILCONT} + \text{OILOPER SFC} \quad (6.10)$$

$$\text{OILCONT} = \text{OILCAP} / \text{DISTCHNG} \quad (6.11)$$

où	OIL	consommation de lubrifiant (l/1000 km)
	OILCONT	perte de lubrifiant due à la contamination (l/1000 km)
	OILOPER	consommation de lubrifiant due à l'opération (l/l _{carburant})
	SFC	consommation de carburant (l/1000 km)
	OILCAP	capacité du moteur (l)
	DISTCHNG	distance entre les changements d'huile (km)

Le coût unitaire d'huile servant à calculer le coût de consommation de lubrifiant est exprimé pour un litre de lubrifiant et doit inclure le coût du lubrifiant ainsi que celui de la main d'œuvre.

6.2.3 Modélisation de l'usure des pneus

La modélisation de l'usure des pneus développée pour le système HDM-4 est de nature probabiliste et mécaniste structurée. Ceci permet, à la fois, une représentation physique de l'usure des pneus et une prise en compte des politiques d'utilisation de ce type de ressource. Certains coefficients sont utilisés afin de mettre en relief les résultats des études empiriques. Ce type d'études s'avère être le meilleur outil afin de représenter les pratiques d'utilisation des pneus par les gestionnaires des différentes flottes de véhicules. Parmi ces études, on compte celles qui ont été réalisées en Inde (HTC, 1999), au Brésil (GEIPOD, 1982), en Australie (Bennett, 1998) et aux États-Unis (FHWA, 2003).

Le modèle calcule un nombre équivalent de pneus consommés par 1000 km parcourus (*EQNT*) en fonction d'un facteur empirique de modification de la longévité des pneus. Par ce calcul, le nombre de pneus neufs, le nombre de pneus rechapés ainsi que la distance parcourue par une carcasse de pneu pendant sa vie utile sont pris en compte. Ces valeurs sont déterminées à partir de l'usure par frottement de la gomme et de l'usure par fatigue de

la structure de la carcasse du pneu. Le coût unitaire d'un pneu neuf est défini par l'utilisateur tandis que le coût pour le rechapage d'un pneu est obtenu en fonction d'une fraction de la valeur d'une unité neuve qui est imputée à l'outil sous la forme d'un pourcentage. L'équation 6.12 présente le calcul du nombre équivalent de pneus consommés.

$$EQNT = (1 + PREC \cdot NR) / (DISTOT) + 0,0027 \quad (6.12)$$

où	EQNT	nombre équivalent de pneus consommés
	PREC	ratio de coûts des pneus réchappés-neufs
	NR	nombre de rechapages
	DISTOT	distance parcourue par une carcasse (en 1 000 km)

Le nombre de rechapage (NR) est déterminé à partir d'un indice modifié de rugosité de surface ($Rlmod$) de la chaussée en mètre par kilomètre. Selon le type de véhicule, cet indice correspond à l'indice IRI moyen de la section ou à une valeur minimale de 7 mètres par kilomètres.

$$NR = \max(0, NR0 \exp(-0,03224 \cdot Rlmod) - 1) \quad (6.13)$$

où	NR	nombre de rechapages
	NR0	nombre de rechapages par défaut
	Rlmod	indice modifié de rugosité (m/km)

La distance parcourue par une carcasse de pneu ($DISTOT$) est calculée à partir du nombre de rechapages, du volume de gomme usable et du taux d'usure de la gomme. L'équation 6.14 sert à calculer la distance totale parcourue par une carcasse de pneu.

$$\text{DISTOT} = ((1 + \text{NR}) \text{VOL}) / \text{TWT} \quad (6.14)$$

où	DISTOT	distance parcourue par une carcasse de pneu (en milliers de km)
	NR	nombre de rechapages
	VOL	volume usable de gomme (dm ³)
	TWT	taux d'usure de la gomme (dm ³ /1000km)

Le taux d'usure de la gomme (*TWT*) est déterminé par une modélisation mécanique tenant compte d'un taux de base et d'un taux qui varie en fonction de l'énergie tangentielle imposée au pneu. Cette énergie se décompose en trois types de forces : circonférentielle, tangentielle et normale. L'équation de détermination de la force tangentielle tient compte des variations de la vitesse de déplacement du véhicule (*dFUEL*) tandis que celle concernant les sollicitations latérales est tributaire de la sinuosité du tracé de la route, exprimé par un nombre de degrés par kilomètre. Le calcul du taux d'usure de la gomme se fait à l'aide de l'équation 6.15. Les forces circonférentielle, latérale et normale sont réparties également pour chaque roue du véhicule. Les équations de forces ne sont pas présentées dans ce texte et il faut se référer à la littérature traitant du modèle des forces s'opposant au déplacement pour les informations complémentaires (Bennett, 2003).

$$\text{TWT} = (\text{CFT}^2 + \text{LFT}^2) / \text{NFT} \quad (6.15)$$

où	TWT	taux d'usure de la gomme (dm ³ /1000km)
	CFI	force circonférentielle (N)
	LFT	force latérale (N)
	NFT	force normale (N)

Un facteur empirique de modification de la durée de vie du pneu est déterminé par l'addition de trois sous facteurs qui sont tributaires du type de véhicule, du type de pneu et de la congestion. Le facteur concernant le type de pneu est obtenu par le modèle en fonction du type de revêtement, de l'uni du revêtement (IRI) et du type de pneu identifié par l'utilisateur. Le facteur relié à la congestion tient compte du rapport volume-capacité qui est calculé par le modèle relatif au volume de circulation (chapitre précédent).

L'outil HDM-RUE (HIMS, 2004) permet de calibrer aux conditions locales le taux d'usure de la gomme, en dm^3 par 1000 kilomètres, à partir d'une durée de vie moyenne d'un pneu définie au préalable. Cette durée doit être associée à l'état de la chaussée et la vitesse de déplacement spécifique. Le modèle calibre le paramètre d'usure en fonction des entrées précédentes.

Le coût total d'usure des pneus est déterminé à partir du coût équivalent par unité, du nombre d'unités et du facteur de modification de la durée de vie des pneus.

6.2.4 Modélisation des coûts d'entretien et de réparation

L'évolution des coûts des composantes dans le temps se fait en fonction du manufacturier, de la politique d'entretien du propriétaire et des coûts d'entretien. La modélisation des coûts d'entretien dans HDM-4 a été obtenue à partir des relevés effectués au Brésil (GEIPOD, 1982) et en Inde (CRRRI, 1982), d'une étude menée en Nouvelle-Zélande (Bennett, 2002) et à la suite d'une table de concertation dirigée par le TRL au Royaume-Uni qui consistait en une revue de la littérature sur le sujet (Kerali et Odoki, 2000). Suite à la tenue de cet événement, des améliorations aux modèles existants ont été proposées, notamment en ce qui concerne les paramètres utilisés pour la modélisation et la prise en compte des changements technologiques.

Le modèle de consommation des pièces de rechange adopté pour le système tient compte du kilométrage cumulé du véhicule, de l'uni de surface du revêtement et des effets des interactions de la circulation. Ces derniers sont représentés par une proportion du paramètre $dFUEL$ calculé dans le modèle de capacité qui estime les effets des accélérations. La valeur du kilométrage cumulé est calculée à partir de l'âge médian pour chaque type de véhicule. L'uni de surface du revêtement est ajusté de façon à déterminer un seuil minimum de l'indice IRI affectant la consommation des pièces. Ce seuil est fixé par défaut à un IRI de 3 mais il peut être modifié par l'utilisateur. Il a été jugé que, pour une valeur IRI inférieure à trois, la suspension et les pneus amortissaient la majorité des chocs causés par les irrégularités du revêtement. La valeur de la consommation des pièces est exprimée par une fraction de la valeur de remplacement du véhicule pour chaque tranche

de 1000 kilomètres parcourues. Le calcul de la consommation en pièces détachées est présenté par l'équation 6.16.

$$\text{PARTS} = (\text{K0pc} (\text{CKM}^{\text{kp}} (\text{a0} + \text{a1 RI})) + \text{K1pc}) (1 + \text{CPCON dFUELavg}) \quad (6.16)$$

où	PARTS	consommation en pièces (fraction / 1000 km)
	CKM	kilomètres cumulatifs (km)
	RI	indice de rugosité utilisé par le modèle (m/km)
	CPCON	facteur d'élasticité pour la congestion (défaut = 0,1)
	dFUELavg	consommation additionnelle moyenne de carburant due à la congestion (ml/km)
	K0pc	facteur de rotation (défaut = 1)
	K1pc	facteur de translation (défaut = 1)
	a0 et a1	coefficients de régression

Le modèle du nombre d'heures de main d'œuvre est dépendant du modèle de consommation des pièces puisqu'il utilise le résultat de celui-ci afin de déterminer ce nombre d'heures. Afin de permettre son adaptation à des pratiques d'entretien locales, cette valeur est également déterminée à partir de certains facteurs proposés par défaut mais qui sont modifiables. Le coût de main d'œuvre est calculé à partir d'un coût unitaire déterminé par l'utilisateur. Le nombre d'heures de main d'œuvre est obtenu par l'équation ci-dessous.

$$\text{LH} = \text{K0lh} (\text{a0 PC}^{\text{a1}}) + \text{K1lh} \quad (6.17)$$

où	LH	consommation en main d'œuvre (fraction / 1000 km)
	PC	consommation en pièces (fraction / 1000 km)
	K0lh	facteur de rotation (défaut = 1)
	K1lh	facteur de translation (défaut = 0)
	a0 et a1	coefficients de régression

6.2.5 Modélisation de la vie utile

La durée de vie utile d'un véhicule est un paramètre requis pour le calcul du coût en capital. La vie utile d'un véhicule peut être calculée selon deux méthodes : la méthode de la vie utile constante et la méthode de la vie utile optimale.

La première méthode ne tient pas compte de la vitesse du véhicule et des conditions de surface de la chaussée. Les données d'entrée sont celle de la durée de la vie utile moyenne du véhicule et celle du kilométrage annuel moyen parcouru. Ces dernières peuvent être entrées directement ou calculées par le logiciel à partir d'un échantillon de données annuelles et de l'âge du véhicule. Des valeurs par défaut sont proposées par le logiciel pour chacun des types de véhicules représentatifs.

La seconde méthode permet de représenter les effets des conditions de surface de la chaussée sur la vie utile d'un véhicule. La durée de vie optimale devient alors une fraction de la durée de vie constante qui est exprimée en pourcentage. Cette fraction est calculée à l'aide d'une équation comportant un facteur d'ajustement des conditions de surface de la chaussée basé sur l'indice de rugosité international (IRI) ainsi que sur deux coefficients de régression. Le développement de cette équation est basé sur les données provenant d'une étude portant sur une flotte de véhicules en Thaïlande (HTC, 1997).

6.2.6 Modélisation du coût en capital

Les coûts en capital modélisés par HDM-4 incluent les coûts de la dépréciation nette et des intérêts. La dépréciation est obtenue à partir d'une valeur résiduelle calculée en fonction des conditions de la chaussée tandis que l'intérêt est tributaire de l'utilisation du véhicule.

La valeur résiduelle des véhicules est proportionnelle aux conditions de surface de la chaussée quantifiée par l'indice de rugosité international (IRI). L'hypothèse retenue est qu'un véhicule utilisé dans des conditions de rugosité de l'ordre de cinq mètres par kilomètre aura une valeur résiduelle de 15% de sa valeur de remplacement tandis que cette valeur baissera à 5% dans le cas où les conditions de surface sont de l'ordre de 15 mètres par

kilomètre (Bennett, 2003). Ces fractions de la valeur résiduelle sont celles incorporées par défaut dans le logiciel mais peuvent être changées par l'utilisateur.

Le coût de dépréciation par 1000 km est calculé en multipliant la dépréciation par le coût de remplacement excluant les pneus. La dépréciation du véhicule qui est proportionnelle à son utilisation, en kilomètre, sera obtenue en soustrayant la valeur résiduelle exprimée sous forme de fraction de la valeur de remplacement du véhicule sans les pneus. La dépréciation obtenue s'exprime en pourcentage de la valeur de remplacement du véhicule par 1000 km. Les données d'intrant nécessaires sont la valeur de remplacement du véhicule, la valeur d'un pneu ainsi que le nombre de pneus.

Les coûts des intérêts se calculent à partir d'un facteur du coût d'intérêts et de la valeur de remplacement; celle qui est définie par l'utilisateur. Le facteur du coût d'intérêts est pondéré à partir de l'utilisation annuelle moyenne du véhicule exprimée en heures, de la vitesse moyenne de déplacement et du taux d'intérêt fixé. Ce dernier est défini par l'utilisateur tandis que les deux autres items sont générés par des calculs internes du logiciel qui ont déjà été présentés. Le résultat du produit du facteur de la pondération du taux d'intérêt et de la valeur de remplacement représente les coûts d'intérêts par 1000 kilomètres parcourus.

CHAPITRE 7

MODÈLES DE TEMPS DE DÉPLACEMENT

La valeur du temps de déplacement pour chaque type de véhicule représentatif du système HERS-ST est codée en dur en fonction de données spécifiques à la réalité des transports aux États-Unis. L'outil HDM-4 calcule de façon distincte les valeurs du temps de l'équipage, du temps de déplacement relié au travail, du temps de déplacement relié à d'autres activités ainsi que celle du temps de retard de la marchandise. Pour chaque véhicule, les coûts unitaires et taux d'occupation sont entrés par l'utilisateur.

7.1 Temps des passagers et de l'équipage

Les valeurs du temps de déplacement des passagers et de l'équipage sont traitées de façon simultanée par HERS-ST et de façon distincte dans le cas de HDM-4. Les deux méthodes d'évaluation des coûts sont présentées dans le texte qui suit.

7.1.1 Modèles HERS-ST

La valeur du temps de déplacement est modélisée par HERS-ST pour chacune des catégories de véhicules. Ces valeurs sont obtenues à l'aide d'une équation simple se traduisant par le quotient du temps de parcours d'une section, exprimé en heures, par la valeur unitaire du temps pour chaque type de véhicule, exprimée en USD de 1995 par heure (FHWA, 2003).

Le temps de parcours d'une section pour chaque type de véhicule représentatif est obtenu à partir de la longueur de la section et de la vitesse effective moyenne du véhicule (chapitre 5).

La valeur totale du temps est obtenue en distribuant le débit total de façon pondérée pour chaque type de véhicules selon la classe fonctionnelle de la section dont les valeurs sont présentées dans le chapitre 11.

Le coût unitaire du temps inclus la valeur du temps des passagers pour les déplacements dans le cadre d'activités professionnelles et personnelles, le nombre moyen de passagers, la fraction de la dépréciation dépendant de l'âge du véhicule et le coût de l'inventaire, c'est-à-dire de la marchandise transportée (FHWA, 2003).

Le Tableau 7.1 présente les détails relatifs à la détermination de la valeur du temps utilisé par le système HERS-ST. Les valeurs utilisées tiennent compte des pratiques du «*Department of Transportation*» (US DOT) et des résultats d'enquête réalisées à propos de l'origine et de la destination des véhicules routiers. Les calculs de la dépréciation ont été faits à partir de statistiques concernant la flotte de véhicules des États-Unis, les distances moyennes parcourues, une utilisation en fonction de la catégorie de véhicules et des valeurs de remplacement des véhicules (FHWA, 2003). Les valeurs sont exprimées en dollars US de 1995 pour chacun des véhicules représentatifs du système.

Tableau 7.1

Valeurs du temps de déplacement de HERS-ST (USD de 1995)
(Tiré de FWHA, 2003)

	Small Auto	Med. Auto	4-Tire Truck	6-Tire Truck	3-4 Axle Truck	4-Axle Comb.	5-Axle Comb.
Business Travel							
Value per Person	\$ 18.80	\$ 18.80	\$ 18.80	\$ 16.50	\$ 16.50	\$ 16.50	\$ 16.50
Avg. Occupancy	1.43	1.43	1.43	1.05	1.0	1.12	1.12
Vehicle	\$ 1.09	\$ 1.45	\$ 1.90	\$ 2.65	\$ 7.16	\$ 6.41	\$ 6.16
Inventory	-	-	-	-	-	\$ 0.60	\$ 0.60
Personal Travel							
Value per Person	\$ 8.50	\$ 8.50	\$ 8.50	-	-	-	-
Avg. Occupancy	1.67	1.67	1.67	-	-	-	-
Percent Personal	89%	89%	75%	-	-	-	-
Avg Value per Vehicle	\$ 15.71	\$ 15.75	\$ 17.84	\$ 19.98	\$ 23.66	\$ 25.49	\$ 25.24

7.1.2 Modèles HDM-4

Les modèles du HDM-4 tiennent compte de trois types de passagers en ce qui concerne le calcul de la valeur du temps utilisé dans les transports:

- les passagers effectuant leur déplacement dans le cadre de leurs activités professionnelles, les membres de l'équipage;
- les passagers occupant un emploi et dont le déplacement est lié à leurs activités professionnelles, les travailleurs et les étudiants;
- les passagers dont le déplacement se fait dans le cadre d'activités de loisirs ou pour des raisons personnelles.

La valeur du temps des passagers est calculée à partir du nombre de passagers à bord du véhicule, de la proportion de passagers se déplaçant dans le cadre d'activités professionnelles et de la vitesse de déplacement du véhicule sur la section. Les coûts unitaires de la valeur du temps de déplacement reliés au travail et aux loisirs peuvent être déterminés selon la disposition à payer des employeurs et des citoyens. C'est l'approche suggérée par la littérature pour déterminer la valeur du temps de déplacement (Bennett, 2003).

La valeur du temps pour l'équipage doit tenir compte des salaires, des avantages sociaux et des allocations de voyage, nourriture et hébergement, et être définie par l'utilisateur. Le calcul du temps de l'équipage tient compte de cette valeur et de la vitesse moyenne du véhicule sur la section. La vitesse de déplacement correspond à la vitesse (S) introduite dans le chapitre 5.

7.2 Valeur de l'inventaire

Dans le cadre de ce mémoire, la valeur du temps de l'inventaire est traitée de façon distincte pour répondre aux préoccupations particulières soulevées par le ministère des Transports du Québec. La valeur du temps de l'inventaire de HERS-ST est considérée intégralement avec les autres valeurs du temps (se référer à la section précédente) tandis que celle du modèle HDM-4 est évaluée distinctement.

7.2.1 Modèles HERS-ST

La méthode HERS-ST pour estimer la valeur des délais d'acheminement de l'inventaire repose sur un coût unitaire unique pour deux types de véhicules lourds articulés de plus d'une unité : les véhicules comportant 4 essieux et ceux comportant 5 essieux et plus. Ce coût a été obtenu par le produit de la masse moyenne de marchandise transportée par les véhicules, exprimée en livres, par le coût unitaire massique moyen de la marchandise transportée par le type de véhicule, exprimé en USD par livre, et par le taux d'intérêt attribuable au financement de l'inventaire. Il s'agit du taux préférentiel bancaire divisé par le nombre d'heures compris dans une année. Les données utilisées représentent celles caractérisant les véhicules à 5 essieux et sont exprimées en dollars US de 1995. La valeur du temps pour la marchandise résultante est de 0,60 USD (1995). L'hypothèse utilisée est que cette valeur caractériserait également la marchandise transportée par les autres véhicules lourds.

7.2.2 Modèles HDM-4

La détermination du temps d'attente de la marchandise est faite à partir de la vitesse effective du véhicule sur une section. Le coût horaire de la marchandise est déterminé par l'utilisateur pour chaque type de véhicule représentatif. Il est également possible d'attribuer un facteur de temps d'utilisation privée pour un type spécifique de véhicule afin de pondérer la valeur du temps de transport des marchandises et, ainsi, de représenter une possible réalité du marché. Selon Bennett (2003), le coût unitaire devrait être évalué en fonction de la valeur totale de la marchandise transportée, de la proportion de cette marchandise qui est sensible au retard ainsi que du coût d'opportunité.

CHAPITRE 8

MODÉLISATION DES ÉMISSIONS DES VÉHICULES

Le modèle exogène des effets des émissions polluantes du système HERS-ST évalue les coûts globaux des dommages causés par les gaz d'échappement des véhicules. Ces émissions sont établies en fonction de la classe fonctionnelle de la route et de la vitesse effective moyenne des véhicules. Ces coûts sont calculés dans le cas d'émissions ayant des effets sur la santé publique. Les modèles de prédictions des émissions intégrés à HDM-4 quantifient les émissions ayant des conséquences sur la santé humaine et sur le climat. Ils sont de nature empirique et, pour la plupart, sont directement corrélés à la consommation de carburant. Le modèle d'émissions de dioxyde de carbone repose sur un principe stœchiométrique.

Le Tableau 8.1 présente la liste des émissions quantifiées par les différents modèles.

Tableau 8.1

Types de polluants modélisés par les deux systèmes

Type de polluant	Modèle HERS-ST	Modèles HDM-4
Monoxyde de carbone (CO)	X	X
Dioxyde de carbone (CO ₂)		X
Oxydes d'azote (NO _x)	X	X
Oxydes de soufre (SO _x)	X	
Dioxyde de soufre (SO ₂)		X
Hydrocarbures (HC)		X
Plomb (Pb)		X
Matières particulaires (PM)	X	X
Composés organiques volatiles (COV)	X	
Poussières	X	

8.1 **Modèle HERS-ST**

Le modèle des coûts des émissions des véhicules de HERS-ST a été développé afin de quantifier les effets de la pollution engendrée par les véhicules sur la santé publique et sur la propriété. Les émissions considérées par ce modèle sont le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatiles (COV), les oxydes d'azote (NO_x), les oxydes de soufre (SO_x), les matières particulaires de faible diamètre ($PM_{2,5}$) et les poussières générées par la circulation. Bien que le modèle MOBILE6 de la «*Environmental Protection Agency*» (EPA) des États-Unis le permette, le modèle HERS-ST ne considère pas les émissions de dioxyde de carbone dans ses prédictions. Les effets des émissions sur le climat ne sont pas quantifiés par la version américaine de ce système (FHWA, 2003).

Le modèle fonctionne à partir de tableaux de données des coûts globaux des émissions en fonction de la vitesse et de la catégorie du véhicule; c'est-à-dire les véhicules légers, les camions porteurs et les semi-remorques. Ces coûts sont exprimés en dollars US de 2000 par véhicule-mille parcouru (VMP). Les tableaux présentent des résultats pour des vitesses allant de 5 à 70 milles par heure (mph) par intervalles de 1 mph. La sélection des valeurs se fait à partir de la vitesse effective moyenne calculée par HERS-ST qui est multipliée par le nombre de véhicule-mille parcouru annuellement sur la section. Les valeurs sont disponibles pour chaque classe fonctionnelle et pour chaque type de véhicule représentatif. Les coûts totaux annuels obtenus sont actualisés par le modèle et utilisés en vue d'effectuer l'évaluation des bénéfices des interventions.

La méthodologie de base adoptée pour la production des tables de coûts est présentée dans les sections qui suivent. Ces données ont été générées par des modèles externes au système HERS-ST.

8.1.1 Processus de détermination des effets des émissions

La Figure 8.1 illustre la logique de modélisation des coûts des dommages des émissions sur la santé publique qui a été réalisée à l'aide des modèles MOBILE6 et PART5 de l'EPA. Les différentes étapes du processus de calcul des coûts unitaires des émissions par véhicule-mille sont expliquées dans les sections qui suivent.

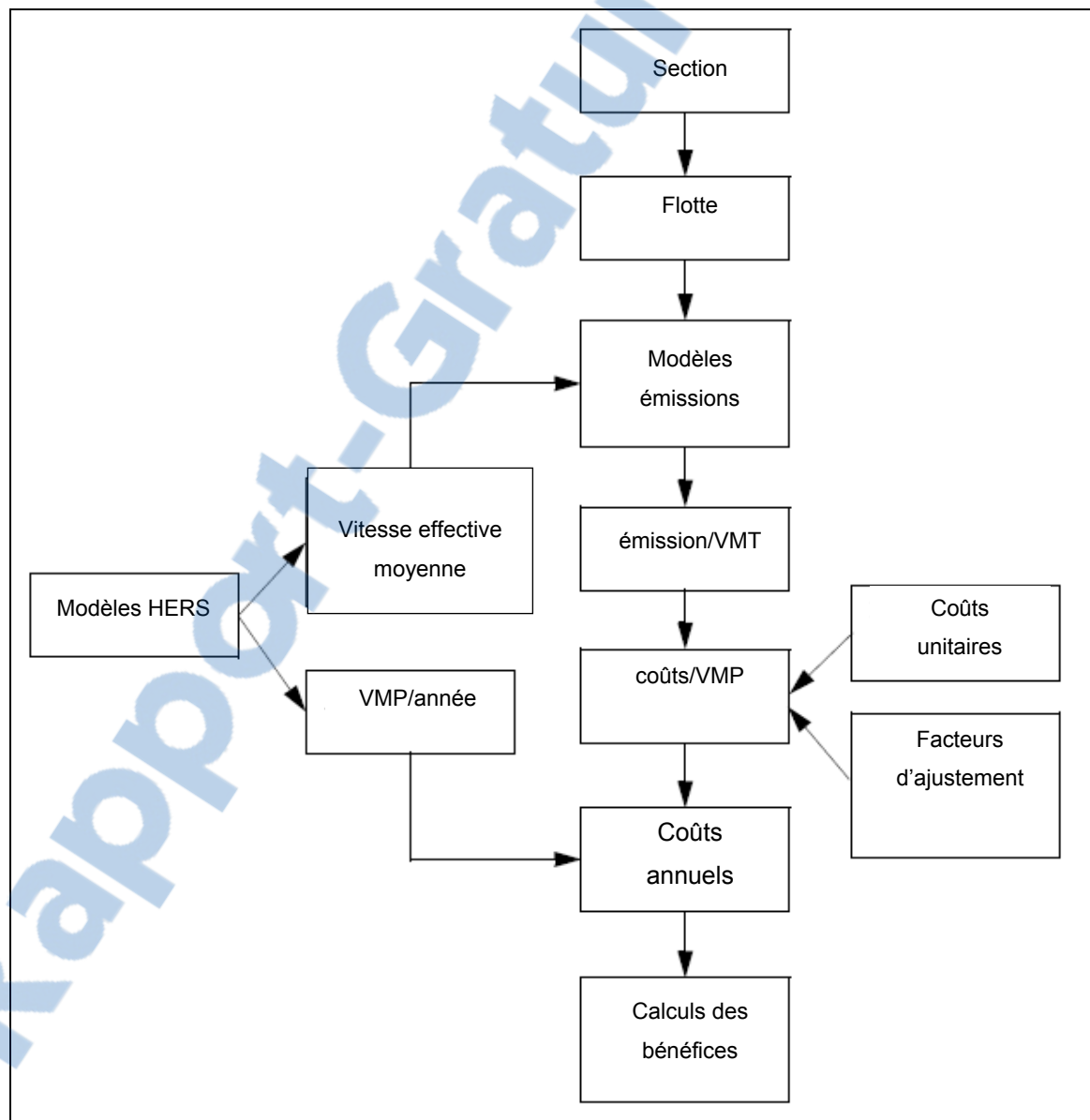


Figure 8.1 Logique de modélisation des coûts des émissions (HERS-ST).
Adapté de FHWA (2003)

8.1.1.1 Sections

Des simulations ont été effectuées selon une distribution de proportion des véhicule-mille parcouru par chaque type de véhicules de façon distincte pour chaque classe fonctionnelle du HERS-ST. Le nombre total de véhicule-mille parcouru sur une section est calculé par HERS-ST à partir de cette proportion. Le Tableau 8.2 présente les valeurs utilisées lors du processus.

Tableau 8.2

Proportion des déplacements des véhicules en fonction des classes fonctionnelles
(Tiré de FHWA, 2003)

Section Type	Four Tire Vehicles				Single Unit Trucks			Combination Trucks		
	Small Autos	Med/Lg Autos	Pickups & Vans	All Four Tire Vehicles	Six-Tire Trucks	3 + Axle SUTs	All Single Unit Trucks	3 - 4 Axles	5 or More Axles	All Combination Trucks
Rural Interstate	28.4%	34.2%	37.3%	100.0%	83.9%	16.1%	100.0%	7.4%	92.6%	100.0%
Rural OPA*	26.9%	32.4%	40.8%	100.0%	79.6%	20.4%	100.0%	9.4%	90.6%	100.0%
Rural Minor Arterial	26.7%	32.2%	41.1%	100.0%	79.2%	20.8%	100.0%	11.7%	88.3%	100.0%
Rural Major Collector	25.7%	31.0%	43.3%	100.0%	77.5%	22.5%	100.0%	12.3%	87.7%	100.0%
Urban Interstate	30.4%	36.9%	32.7%	100.0%	81.5%	18.5%	100.0%	9.2%	90.8%	100.0%
Urban Other Fwy/ Exwy	31.4%	38.1%	30.5%	100.0%	82.1%	17.9%	100.0%	12.4%	87.6%	100.0%
Urban OPA*	29.5%	35.7%	34.7%	100.0%	80.8%	19.2%	100.0%	16.6%	83.4%	100.0%
Urban Minor Arterial	30.1%	36.4%	33.6%	100.0%	73.5%	26.5%	100.0%	26.5%	73.5%	100.0%

8.1.1.2 Véhicules

Les modèles HERS-ST, MOBILE6 et PART5 sont composés respectivement de 7, 23 et 12 types de véhicules représentatifs qui leur sont propres. L'attribution des taux d'émissions caractéristiques à chacun des véhicules représentatifs du système HERS-ST a été faite par des correspondances entre les différentes représentations du parc de véhicules. Les tableaux ci-dessous illustrent ces correspondances pondérées entre les véhicules du système HERS-ST et ceux des modèles de l'EPA.

Tableau 8.3

Équivalences des types de véhicules entre les modèles
MOBILE6 et HERS-ST
(Tiré de FHWA, 2003)

MOBILE6 Vehicle Class	Proportion of MOBILE6 Vehicle Class Included in HERS Vehicle Class:						
	Small Autos	Medium/ Large Autos	Pickups & Vans	Six-Tire Trucks	3+ Axle SUTs	3-4 Axle Combos	5+ Axle Combos
LDGV	0.9991	0.9179					
LDDV	0.0009	0.0008					
LDGT1		0.0813					
LDGT2			0.6835				
LDGT3			0.2142				
LDGT4			0.0984				
LDDT34			0.0040				
HDGV2B				0.8002			
HDDV2B				0.1998			
HDGV3					0.1778		
HDDV3					0.3733		
HDGV4					0.0284		
HDDV4					0.1756		
HDGV5					0.1311		
HDDV5					0.1138		
HDGV6						0.1689	
HDDV6						0.2876	
HDGV7						0.0781	
HDDV7						0.4654	
HDGV8A							0.0001
HDDV8A							0.1606
HDGV8B							0.0000
HDDV8B							0.8393
All Classes	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Tableau 8.4

Équivalences des types de véhicules entre les modèles PART5 et HERS-ST
(Tiré de FHWA, 2003)

PART5 Vehicle Class	Proportion of PART5 Vehicle Class Included in HERS Vehicle Class:						
	Small Autos	Medium/ Large Autos	Pickups & Vans	Six-Tire Trucks	3+ Axle SUTs	3-4 Axle Combos	5+ Axle Combos
LDGV	0.9991	0.9991					
LDGT1			0.7303				
LDGT2			0.2571				
HDGV				0.8002	0.3373	0.2470	0.0001
MC							
LDDV	0.0009	0.0009					
LDDT			0.0126				
2BHDDV				0.1998			
LHDDV					0.6627		
MHDDV						0.7530	
HHDDV							0.9999
BUSES							
All Classes	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

8.1.1.3 Modèles de simulations des émissions

Le modèle d'évaluation des coûts de la pollution de l'air engendrés par les émissions de la flotte de véhicules a été développé à partir de deux modèles de l'EPA : le modèle MOBILE6 et le modèle PART5. Le premier est responsable de la simulation des émissions d'états gazeux tels que le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatiles (COV) et l'oxyde d'azote (NO_x) en fonction de la vitesse effective moyenne des véhicules. Le modèle PART5 prédit les émissions sous forme de particules consistant en des oxydes de soufre (SO_x), des matières particulaires de faible diamètre ($PM_{2,5\mu m}$) et de la poussière générée par la circulation de façon indépendante à la vitesse des véhicules.

Les deux modèles basent leurs prédictions sur des simulations de différents cycles de conduite types des déplacements effectués pour chaque catégorie de véhicules (i.e urbain, rural). Les taux d'émissions ont été évalués en fonction du type de section à partir d'une plage de vitesses des véhicules allant de 5 à 70 milles par heure par intervalles de 5 milles par heure. Des interpolations ont été effectuées afin de produire les tableaux des émissions comportant des intervalles de 1 mph qui sont inclus dans le système HERS-ST. Les coûts des émissions par véhicule-mille parcouru ont été obtenus à partir de coûts par tonne US³¹ des effets sur la santé publique et sur la propriété (se référer au Tableau 8.5).

8.1.1.4 Coûts unitaires

Les coûts unitaires moyens des différents polluants qui sont déduits à partir de leurs effets sur la santé publique et la dégradation des infrastructures ont été calculés sur la base de coûts totaux estimés des effets sur la santé publique et à partir de différentes densités locales de populations. Des facteurs d'ajustement en fonction du milieu, urbain ou rural, où se trouve la section de route ont été produits.

³¹ 1 tonne US (ou tonne courte) = 0,90720 tonne métrique

Le Tableau 8.5 présente les coûts unitaires ainsi que les facteurs de pondération qui ont été utilisés lors du processus d'évaluation des coûts par véhicule-mille.

Tableau 8.5
Coûts unitaires des polluants (HERS-ST v.3.0)
(Adapté de FHWA, 2003)

Polluant	Coûts des dommages (2000 USD/ton)	Facteurs d'ajustement (milieu)	
		Urbain	Rural
Monoxyde de carbone	100	1,0	0,5
Composés volatiles organiques	2 750	1,5	1,0
Oxydes d'azote	3 625	1,5	1,0
Dioxyde de soufre³²	8 400	1,5	1,0
Matières particulaires fines	4 825	1,0	0,5
Poussières	4 825	1,0	0,5

Les valeurs incluses dans le tableau précédant proviennent d'une vaste étude sur les coûts sociaux engendrés par l'utilisation des véhicules (Delucchi, 1998). Selon Delucchi (1998), la monétarisation des effets attribuables à la pollution de l'air qui est due à l'utilisation des véhicules inclut les éléments suivants :

- mortalité et morbidité humaine due aux émissions particulières des véhicules;
- mortalité et morbidité humaine due aux autres émissions des véhicules;
- mortalité et morbidité humaine due aux polluants des procédés en amont³³;
- mortalité et morbidité humaine due aux émissions de poussières;
- dommages matériels dus à tous les types d'émissions des véhicules.

³² Les coûts des dommages causés par les émissions de dioxyde de soufre a été attribué aux émissions plus générales d'oxyde de soufre qui sont modélisées par le système.

³³ La définition exacte des composantes incluses dans le procédé en amont de l'utilisation des véhicules motorisés aux États-Unis, à savoir la production des véhicules, du carburant et des autres ressources entrant dans l'exploitation des véhicules, ne sont pas clairement définies dans Delucchi (1998) consultée et reposent sur plusieurs hypothèses qui ne sont pas présentées dans ce chapitre.

Toutefois, d'autres effets de la pollution de l'air due à l'utilisation des automobiles qui ont été quantifiés par Delucchi (1998) ne sont pas incorporés au HERS-ST. C'est le cas des effets de la pollution de l'air due aux véhicules liés au smog, aux changements climatiques, aux dommages causés aux cultures ainsi qu'aux forêts sur le territoire des États-Unis.

Dans la procédure ayant mené à l'établissement des tableaux de coûts du HERS-ST, les coûts marginaux des effets des émissions, exprimés en \$US par kilogramme, ont été déterminés à partir de l'étude. Ces coûts ont été estimés selon certaines hypothèses en fonction d'une estimation de l'importance des effets des émissions. Les différentes émissions monétarisées par tonne US produite ont été combinées et rapportées par véhicule-mille parcouru selon des estimations des véhicule-milles totaux parcourus aux États-Unis (FHWA, 2003).

8.2 Modèles HDM-4

Les différents modèles de prédiction des émissions intégrés à HDM-4 découlent d'une évaluation qui a été faite à partir des modèles développés par les administrations suédoise (SNRA³⁴), britannique (ETSU³⁵) et états-unienne (EPA). Dans un premier temps, le modèle suédois a été adapté pour la première version de l'outil HDM-4 et, par la suite, a été modifié afin d'inclure des équations provenant des modèles de l'ETSU et d'études menées par le *Transport Research Board* aux États-Unis. Les modèles pour les émissions de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures (HC) et d'oxydes d'azote (NO_x) proviennent de ces dernières tandis que ceux concernant les émissions de dioxyde de soufre (SO₂), de plomb (Pb) et de dioxyde de carbone (CO₂) sont inspirés de ceux de l'ETSU. Les matières particulaires (PM) sont également considérées par HDM-4.

Il existe deux types de modèles : les modèles dépendant de la consommation de carburant et celui reposant sur une certaine stabilité chimique des matières émises. La structure des équations pour les émissions sortant du système d'échappement des véhicules est la même pour tous les types d'émissions directement dépendantes du carburant consommé. Cette équation de base (équation 8.1) consiste en une multiplication des émissions provenant du moteur par la fraction d'émissions non traitée par le catalyseur (équation 8.2). Dans la plupart des cas, cette fraction est dépendante du taux de consommation de carburant déterminé à partir du modèle présenté dans le chapitre portant sur les coûts d'exploitation des véhicules.

$$TPE_i = EOE_i \cdot CPF_i \quad (8.1)$$

où	TPE _i	émissions du système d'échappement (émission de type <i>i</i>)
	EOE _i	émissions du moteur (émission de type <i>i</i>)
	CPF _i	fraction non traitée par le catalyseur (émission de type <i>i</i>)

³⁴ SNRA : Administration nationale suédoise des routes

³⁵ ETSU : *Energy Technology Support Unit*, maintenant *Future Energy Solutions* (Royaume-Uni)

$$CPF_i = [1 - \varepsilon_i \exp(-b_i \text{ IFC MassFuel})] \min \left[\left(1 + \frac{r_i}{100} \text{ LIFE} \right), \text{MDF}_i \right] \quad (8.2)$$

où	CPF_i	fraction non traitée par le catalyseur (émission de type i)
	ε_i	efficacité maximale du catalyseur pour l'émission i
	b_i	coefficient stœchiométrique (catalyseur)
	IFC	consommation instantanée de carburant (ml/s)
	MassFuel	masse du carburant (g/ml)
	r_i	facteur de détérioration relié à l'âge pour l'émission i (%/an)
	LIFE	âge du véhicule (année)
	MDF_i	facteur maximum de détérioration pour l'émission i

Le Tableau 8.6 présente les différentes équations de calculs des émissions par le moteur ainsi que la description des paramètres constitutifs de ces dernières.

Tableau 8.6

Équations dépendantes de la consommation de carburant et paramètres

Modèles d'émissions		Paramètres des équations	
Émission	Équation	Paramètre	Description
HC	$EOE_{HC} = a_{HC} FC + \frac{r_{HC}}{v} 1000$	FC	Consommation de carburant (ml/km)
CO	$EOE_{CO} = a_{CO} FC$	r_{HC}	Constante tenant compte de la combustion incomplète
NO _x	$EOE_{NOx} = \max \left[a_{NOx} \left(FC - \frac{FR_{NOx}}{v} 1000 \right), 0 \right]$	$a_{HC}, a_{CO}, a_{NOx}, a_{SO_2}, a_{Pb}, a_{PM}$	Constantes d'émission (g _{émission} / g _{carburant})
SO ₂	$EOE_{SO_2} = 2 a_{SO_2} FC$	FR_{NOx}	Seuil sous lequel les émissions de NO _x sont négligeables
Pb	$EOE_{Pb} = Prob_{Pb} a_{Pb} FC$	v	Vitesse du véhicule (m/s)
PM	$EOE_{PM} = a_{PM} FC + \frac{r_{PM}}{v} 1000$	Prob_Pb	Proportion de plomb émis

La prédiction des émissions en dioxyde de carbone (CO₂) est basée sur une hypothèse reposant sur des notions de stœchiométrie (i.e. balance du carbone). En effet, on considère que, pour une partie des émissions de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures et de matières particulaires, les atomes de carbone se fixent à ceux d'oxygène pour produire du CO₂. L'équation 8.3 sert au calcul des émissions de dioxyde de carbone à la sortie du système d'échappement tandis que l'équation 8.4 modélise la consommation instantanée de carburant.

$$\text{TPE}_{\text{CO}_2} = 44.011 \left(\frac{\text{FC}}{12.011 + 1.008 a_{\text{CO}_2}} - \frac{\text{TPE}_{\text{CO}}}{28.011} - \frac{\text{TPE}_{\text{HC}}}{13.018} - \frac{\text{TPE}_{\text{PM}}}{12.011} \right) \quad (8.3)$$

où	FC	consommation de carburant (ml/km)
	TPE _{CO₂}	émissions en CO ₂ du système d'échappement
	TPE _{CO}	émissions en CO du système d'échappement
	TPE _{HC}	émissions en HC du système d'échappement
	TPE _{PM}	émissions en PM du système d'échappement
	a _{CO₂}	paramètre représentant un ratio d'atomes d'hydrogène par rapport au carbone dans le carburant

$$\text{FC} = \frac{\text{IFC} \text{ MassFuel} 1000}{v} \quad (8.4)$$

où	IFC	consommation instantanée de carburant (ml/s)
	MassFuel	masse du carburant (g/ml)
	V	vitesse du véhicule (m/s)

Comme il est possible de le constater à partir des équations précédentes, les quantités d'émissions des différents polluants sont tributaires de la vitesse des véhicules.

La Figure 8.2 présente les résultats d'une simulation effectuée pour le véhicule représentatif «passager car » de HDM-4.

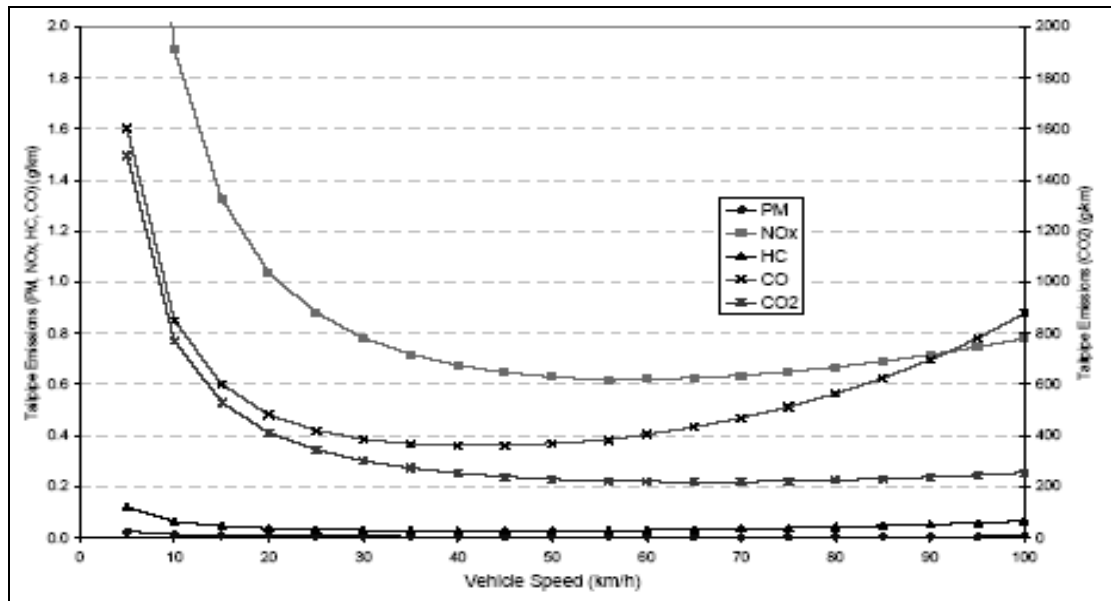


Figure 8.2 Émissions du système d'échappement d'une voiture particulière en fonction de la vitesse de déplacement.

Tiré de Bennett et Greenwood (2003)

Les modèles pour les différents types d'émissions nécessitent l'emploi de coefficients qui proviennent d'études empiriques. Des valeurs pour ces coefficients sont incluses par défaut dans le logiciel HDM-4 mais elles peuvent être modifiées. Toutefois, les émissions étant principalement tributaires des véhicules, ces coefficients n'ont pas à être adaptés en fonction de la géographie ou du climat puisque ces paramètres sont pris en compte par les autres modèles du HDM-4.

CHAPITRE 9

CARACTÉRISTIQUES DES TRONÇONS ROUTIERS

9.1 Système HERS-ST

Au sein des modèles du système HERS-ST, plusieurs paramètres des tronçons influent sur la vitesse de déplacement des véhicules, les coûts aux usagers et les émissions. Tels qu'ils ont été présentés dans Roy et *al.* (2006), les paramètres alimentant les modèles du HERS-ST font partie des données des sections incluses dans le Fichier Maître Réseau (FMR) généré par le MTQ. Le regroupement en familles de sections homogènes n'est pas justifié en vue de l'expérimentation du HERS-ST.

Les principales données devant être modifiées dans le système sont celles relatives à la distribution des débits des sept classes prédéterminées de véhicules.

9.2 Paramètres de modélisation obtenus du Système de gestion des chaussées (GCH-6011)

La sélection des paramètres de modélisation entrant dans les équations éventuelles des coûts aux usagers doit se faire à partir des champs de données disponibles dans le Fichier Maître Réseau (FMR). Les champs spécifiques au FMR qui sont pertinents aux modèles de coûts aux usagers sont présentés dans cette section.

Le **super classe fonctionnelle** sert de critère dans la sélection des équations dans le but de tenir compte des différentes distributions des types de véhicules caractérisant chacune des classes de routes. Lorsque les données disponibles à cet effet ne sont pas désagrégées en fonction de chaque classe, on retient une distribution uniforme de la flotte pour tout le réseau. Toutefois, l'incorporation de ce paramètre dans l'architecture des équations assurera leur mise à jour éventuelle.

La donnée de la **limite de vitesse** est le second critère de sélection des équations de coûts aux usagers. Ce paramètre assurera une meilleure représentativité des coûts aux usagers; ces derniers étant grandement influencés par la vitesse de déplacement des véhicules.

Le **DJMA** est utilisé comme coefficient à chacune des équations des coûts aux usagers. Ce débit sera pondéré en vue de la détermination des coûts annuels aux usagers de chaque section.

Le **pourcentage de camion** est utile pour la pondération des coûts à l'utilisateur en fonction de la proportion de véhicules lourds sur chaque section.

La valeur de l'**IRI** est utilisé comme variable indépendante entrant dans les équations de régression produite à l'aide des modèles des résultats du HDM. Le paramètre IRI est directement utilisé dans les différents modèles du HDM-4.

9.3 Paramétrage des tronçons routiers du HDM-4

Les simulations seront faites selon l'hypothèse qu'il n'y a pas de coûts additionnels de fonctionnement des véhicules reliés aux interactions de ces derniers dans des conditions de débits élevés (i.e. cycles de changements de vitesse induits). Bien que cette méthodologie ne soit pas idéale et non représentative des conditions réelles, certaines raisons ont justifié son adoption :

- 1) les interventions liées à l'amélioration de la capacité ne font pas partie de la mission du Service des chaussées;
- 2) l'architecture du système GCH-6011 et du FMR pose certaines limitations relativement à la flexibilité d'une éventuelle procédure de modélisation des coûts aux usagers;
- 3) dans le cadre d'une gestion ciblée vers l'axe Conservation, un indicateur des coûts aux usagers représentatifs des conditions de fonctionnement des véhicules sans entrave par la circulation a l'avantage de faciliter la comparaison des bénéfices tributaires aux interventions entre plusieurs sections.

La variable principale entrant dans les équations de coûts aux usagers est l'IRI. Aussi, la prise en compte des indicateurs relatifs aux défauts de surfaces du revêtement est fortuite

puisque leur influence sur les coûts de fonctionnement des véhicules est déjà considérée dans la mesure de l'IRI

Bien que les caractéristiques géométriques des tronçons routiers ne soient pas les paramètres ayant le plus d'importance dans le cadre des analyses économiques du Service des chaussées, certaines valeurs se doivent d'être utilisées lors des simulations à l'aide du HDM-4.

Ainsi, une série de huit familles de chaussées est proposée en vue de la production des équations des coûts d'exploitation des véhicules en fonction de l'état du revêtement présentés dans le Tableau 9.1.

Tableau 9.1

Familles de routes à modéliser pour le SC

	Milieu	Type de route	Vitesse prescrite
1	Rural	Autoroute	100
2		Autres routes	90
3			70
4			50
5	Urbain	Autoroute	100
6		Autres routes	90
7			70
8			50

Les autres caractéristiques attribuées aux chaussées et à l'environnement de la route ont la même valeur dans tous les cas. Les principaux paramètres qui sont énumérés ci-dessous ont une influence directe sur le modèle de prévision de la vitesse de déplacement, sur le calcul des forces agissantes sur les véhicules et, par conséquent, sur plusieurs composantes des coûts de fonctionnement:

- largeur des voies, largeur des accotements et dégagement latéral : utilisation des valeurs moyennes attribuées pour chaque classe fonctionnelle;
- macrotexture du revêtement³⁶ : 0,7 mm;
- altitude de la route : 200m;
- facteur limitatif de la vitesse de déplacement lié au contrôle policier : 1,15³⁷.

³⁶ Il s'agit de la valeur recommandée par le service des chaussées (DLC).

³⁷ Il s'agit d'un coefficient du modèle de prévision de la vitesse en régime libre qui a été présenté dans le chapitre 5. Concrètement, il s'agit de la valeur proportionnelle du dépassement de la vitesse affichée qui est adopté par le conducteur moyen en réaction aux politiques de contrôle de la vitesse appliquées par les autorités. La valeur adoptée pour la présente étude est de 15%.

CHAPITRE 10

CLASSIFICATION DES VÉHICULES

Le chapitre qui suit traite exclusivement de l'établissement d'une classification référentielle des véhicules en vue des analyses qui seront réalisées à l'aide du HDM-4. Les discussions qui y sont incluses permettent de présenter la réflexion qui a été faite en vue de définir les classes de véhicules à préconiser pour l'étude. La classification proposée est construite en fonction de la définition des coûts d'utilisation des véhicules et elle tient compte des classifications existantes.

10.1 Choix des critères de classifications

Les différents types de classifications de véhicules identifiées en Amérique du Nord ou ailleurs sont établies sur la base de paramètres tels que la longueur maximale, le nombre d'essieux, la masse brute, le type de carrosserie et le type d'utilisation des véhicules (i.e. automobile privée, autobus, camion). Dès lors, une réflexion devait être posée relativement au type(s) de paramètre(s) à préconiser afin d'établir la classification la plus pertinente possible pour la prise en compte des coûts aux usagers de la route

La démarche est, en partie, basée sur les classifications existantes. Par conséquent, les sections qui suivent présentent quelques classifications en usages au Québec et ailleurs ainsi que la classification proposée.

10.2 Classification HPMS/HERS

Les sept véhicules représentatifs du système HERS-ST sont les mêmes que ceux inclus dans le système précurseur à ce dernier; le système «*Highway Performance and Monitoring System*» (HPMS). Ces classes découlent de celles adoptées lors d'études précédentes sur les coûts de fonctionnements des véhicules (Zaniewski, 1982) telles que présentées dans le cadre du premier rapport d'étape du présent mandat.

À titre de rappel, les véhicules représentatifs du HERS-ST sont les suivantes :

- automobile compacte;
- automobiles intermédiaires et grand format;
- camionnette;
- camion porteur comportant 2 essieux (roues doubles);
- camion porteur comportant 3 essieux ou plus;
- camion semi-remorque comportant 3 ou 4 essieux;
- camion semi-remorque comportant 5 essieux ou plus.

10.3 Classification incluse dans les normes du MTQ

La classification présentée dans le Tome I des Normes du ministère des Transports (MTQ, 2007a), qui comporte 11 classes de véhicules, a été établie sur la base de celle de l'Association des Transports du Canada (ATC) à laquelle deux types de véhicules ont été ajoutés. La fonction de cette classification se situe au niveau de l'aménagement géométrique des routes et des intersections. L'adoption de ce type de classification n'a pas été jugée pertinente en vue de l'établissement des coûts d'exploitation des véhicules circulant au Québec.

10.4 Autres classifications en usage au Québec

Un relevé des études de comptages réalisés au Québec met en évidence le fait qu'un nombre relativement élevé de systèmes de classification y sont utilisés. En règle générale, ces classifications font référence soit à la longueur, soit au nombre d'essieux des véhicules. Elles peuvent également incorporer des critères liés à la configuration générale du véhicule et à son type d'utilisation, c'est-à-dire commerciale ou non commerciale.

Le Service de la Modélisation et des Systèmes de Transports (SMST) (Fournier, 2006) a fournis une énumération des différents systèmes de classifications de comptage utilisés dans la région de Montréal. La communication inclut aussi un système de correspondance entre les différents types de classification effectué pour répondre aux besoins du SMST.

Les deux principaux systèmes de classification de comptages en usage au MTQ sont présentés dans les tableaux qui suivent. Le premier système fait référence à la longueur des véhicules tandis que le second est relatif au nombre d'essieux.

Tableau 10.1

Classification de comptages
selon la longueur

Classification avec boucles (CIR6002)
1. 0 - 6,09 m
2. 6,1 - 7,59 m
3. 7,6 - 13,69 m
4. 13,7 - 19,79 m
5. 19,8 m et +

Tableau 10.2

Classifications de comptages
selon le nombre d'essieux

Classifications en usage (essieux)	
Manuelle	CIR6002-FHVA
15. Motocyclette	1. Motocyclette
1. Veh. légers privés	2. Veh. légers
2. Veh. légers et remorque	3. Veh. légers et remorque
16. Veh. légers identifiés commer.	
3. Veh. récréatifs	
4. Autobus	4. Autobus
5. Camion, 1 unité 2 essieux	5. Camion, 1 unité 2 essieux
6. Camion, 1 unité 3 essieux	6. Camion, 1 unité 3 essieux
7. Camion, 1 unité 4 essieux	7. Camion, 1 unité 4 essieux
8. Camion, 2 unités 4 essieux	8. Camion, 2 unités 4 essieux
9. Camion, 2 unités 5 essieux	9. Camion, 2 unités 5 essieux
10. Camion, 2 unités 6+ essieux	10. Camion, 2 unités 6+ essieux
11. Camion, 3 unités 5 essieux	11. Camion, 3 unités 5 essieux
12. Camion, 3 unités 6 essieux	12. Camion, 3 unités 6 essieux
13. Camion, 3 unités 7+ essieux	13. Camion, 3 unités 7 essieux
14. Veh. lourd et lent	

10.5 Classification du FHWA

Le système du «*Federal Highway Administration*» (FHWA) utilise comme critère de classification le nombre d'essieux et le nombre d'unités d'un véhicule. Le système est, entre autre, utilisé dans le cadre d'études sur la tarification routière ce qui pourrait s'avérer pertinent pour une étude sur les coûts d'utilisation des véhicules.

10.6 Classification adoptée pour l'étude HCAS de 1997 (FHWA)

L'étude «*Highway Cost Allocation Study*» (HCAS) réalisée en 1997 (FHWA, 1997) propose une classification basée sur celle du FHWA de laquelle sont désagrégées les différentes catégories de véhicules lourds selon les différentes plages de masse totale en charge (MTC). Les résultats de cette étude mettent en relief l'influence de la charge sur les coûts de fonctionnement des véhicules.

Ce type de classification a été adopté dans le cadre de l'Examen de la Totalité des Coûts (ETC) en transport au Canada (TC, 2008) qui a été menée par Transports Canada en collaboration avec les administrations provinciales et territoriales.

10.7 Classification du HDM-4 et du NZ-VOC

Les 11 véhicules représentatifs inclus par défaut au HDM-4 ont été définis par l'étude menée en 1995 (NDLI, 1995) à partir d'une revue des classifications adoptées lors d'études réalisées dans différents pays. Cette classification inclut les motocyclettes ainsi que différentes catégories d'autobus mais comporte certaines limites tant qu'à la caractérisation des camions lourds.

La classification adoptée pour le modèle Néo-Zélandais de coûts de fonctionnement des véhicules (NZ-VOC) comporte certaines similarités avec celle du HDM-4 tout en ayant des variantes dans le choix des véhicules représentatifs. En effet, un nombre plus important de véhicules, soit 22, y est inclus. En ce qui concerne les camions porteurs et les semi-remorques, une représentation plus complète et plus représentative d'une flotte moderne est présentée. Aussi, cette classification est orientée de façon plus distinctive vers la

configuration des essieux des véhicules en comparaison avec celle du HDM-4 qui est plus orientée vers le type d'utilisation des véhicules. Ainsi, le système Néo-Zélandais a l'avantage de permettre une meilleure compatibilité avec l'équipement de comptage automatisé utilisé par plusieurs administrations routières.

10.8 Agence pour la protection de l'environnement (EPA)

L'EPA mène des études sur la consommation de carburant et les émissions des véhicules. Dans cette optique, l'EPA a mis sur pieds certaines classifications pour des fins de modélisation environnementale. D'ailleurs, deux de ses modèles ont été utilisés de façon exogène pour le paramétrage du système HERS-ST. Les critères de classifications adoptés par l'EPA sont le type de véhicule, le type de carburant utilisé ainsi que le poids technique de la charge maximale d'un véhicule isolé³⁸ (PNBV).

10.9 Systèmes de classification de l'industrie du transport

L'industrie du transport et, plus particulièrement, les gestionnaires de flottes de véhicules commerciaux et institutionnels disposent de quelques systèmes de classifications.

L'association «*American Trucking Association*» (ATA) classe les véhicules lourds en huit catégories selon le PNBV. Cette classification est également utilisée lors d'études sur la consommation de carburant menées par la FHWA.

À la page suivante, le Tableau 10.3 présente la classification de l'ATA.

³⁸ Selon l'Office québécois de la langue française, l'expression poids technique maximal d'un véhicule isolé est la traduction de l'expression anglaise «*Gross Vehicle Weight Rating*».

Tableau 10.3

Classification de l'ATA

	Classe	Masse (lbs)
Camions commerciaux légers	Classe 1	0-6000
	Classe 2	6001-10000
Camions moyens	Classe 3	10001-14000
	Classe 4	14001-16000
	Classe 5	16001-19500
	Classe 6	19501-26000
Camions lourds	Classe 7	26001-33000
	Classe 8	33001-150000

De ces types de système de classification, celui qui présente le niveau de détails le plus élevé est celui de l'association «*National Association of Fleet Administrators*» (NAFA). Il est utilisé par les gestionnaires de parcs de véhicules pour les opérations de balisage de flotte. Les différentes classes de véhicules sont réparties en fonctions des mêmes catégories de PNBV que celles du système de l'ATA; lesquelles sont désagrégées en des centaines de catégories selon le type de carrosserie et d'utilisation des véhicules circulant sur la route et hors route.

Bien que n'étant pas, à prime abord, pertinents pour une utilisation par une administration routière, les systèmes de classifications présentés par l'industrie peuvent faciliter une intégration des données d'utilisation et économiques des véhicules avec celles des classifications des systèmes de gestion des infrastructures routières.

10.10 Sommaire des classifications existantes

Le tableau qui suit dresse la liste des classifications de véhicules identifiées dans ce mémoire ainsi que les critères de classification qui leur sont propres :

Tableau 10.4

Tableau comparatif des différents systèmes de classification

		Industrie	NZ-VOC	HDM-4 (DÉFAUT)	HERS	MTQ (compt. manuel)	MTQ-ATC	SAAQ-SMST	MOBILE6	PART5	HCAS1997														
Véhicules légers	M	Motocyclettes				15. Motocyclette			MC	MC	AUTO														
						2. Automobile avec rem.	CAR/RT																		
		Two-seater	Voiture	Petite voiture	Petites automobiles	1. Automobile	CAR	AUTO	LDxV	LDxV		AUTO													
		Mini compacte																							
		Sous compacte																							
		Compacte																							
		Petite familiale	Voiture moyenne	Voiture moyenne	Automobiles moyennes et grandes																				
		Intermédiaire																							
		Familiale interm.																							
		Grand format	Grosse voiture	Grosse voiture																					
		Gd format familiale																							
	SUV 4RM	SUV 4x4	Quatre roues motrices	Camionnettes et vannes																					
	SUV 2RM	Utilitaires	Véhicule de livraison léger																						
	Truck-chassis																								
	Mini van.																								
	Mini van. 4WD	Van	Véhicule de service léger										VAN (fourg.)												
	Van. cargo																								
	Van. passager																								
	«Pick-up» compact	Camions légers	Camion léger																						
	«Pick-up» comp. 4RM																								
	«Pick-up»																								
	»Pick-up» 4RM																								
Camionnettes et autres																									
	Porteurs	Camions lourds	6-roues <5T	Camion moyen	Camions « six roues »	5. Camion 1 unité 2 ess.	SU	CA	HDDV2b / HDGV2b	HDGV / 2BHDDV	SU2														
			6-roues >5T			6. Camion 1 unité 3 ess.			HDxV3@5	HDGV / LHDDV	SU3														
			3 essieux	Camion lourd	Camions comportant 3 essieux et plus (unité)	7. Camion 1 unité 4 ess.			SU4+																
			4 essieux																						
		Semi-remorques	Tracteurs routiers	Art 3 essieux	Camion articulé	Camions articulés à 3 ou 4 essieux	8. Camion 2 unités 4 ess. -		WB-15 / WB-17 / TST		HDxV6@7	HDGV / MHDDV	CS3												
				Art 4 essieux			9. Camion 2 unités 5 ess.						CS4												
				Art 5 essieux			10. Camion 2 unités 6 ess. +		A-TRAIN				CS5T / CS5S												
				Art 6 essieux			11. Camion 3 unités 5 ess. -						CS6												
				A train		Camions articulés à 5 essieux et plus	12. Camion 3 unités 6 ess.		B-TRAIN				DS5												
				B train			13. Camion 3 unités 7 ess. +						DS6												
									DS7 / DS8+																
							DS8+																		
Trains		HT + remorque 2 essieux							CT3,4																
		HT + remorque 3 essieux							CT5																
		HT + remorque 4 essieux							CT6+																
4										TRPL															
Autobus		Autobus 2 essieux	Minibus	Bus léger	4. Autobus	SU	AB	HDDBT / HDBT / HDDBS	Buses	BUS															
	Autobus 3 essieux	Autobus inter cité		I-BUS																					
			Autobus inter cité			A-BUS																			
Autre			autres			14. Véhicule lourd																			
						3. Véhicule récréatif																			

10.11 Classification proposées pour l'étude

Pour l'évaluation des coûts aux usagers à l'aide du HDM-4, il serait intéressant d'adopter une classification qui s'inspire des pratiques du ministère des Transports. Cela assurerait une correspondance relativement évidente avec les données gérées par la Division de la circulation (Direction du laboratoire des chaussées).

La classification suivante est recommandée en vue des simulations du système HDM-4 :

- 1) automobile compacte;
- 2) automobile intermédiaire;
- 3) automobile de grand format;
- 4) véhicules utilitaires sport (VUS);
- 5) fourgonnette;
- 6) camionnette;
- 7) camion porteur de 2 essieux;
- 8) camion porteur de 3 essieux;
- 9) camion porteur de 4 essieux;
- 10) camion semi-remorque de 5 essieux ou moins;
- 11) camion semi-remorque de 6 essieux;
- 12) camion semi-remorque de 7 essieux et plus;
- 13) train routier (3 unités et généralement 8 essieux).

10.12 Correspondance entre la classification proposée et celle du HERS-ST

Dans le but de comparer les résultats des modélisations effectuées par le HERS-ST et le HDM-4, une correspondance entre les systèmes de classification concernés est présentée au Tableau 10.5.

Tableau 10.5

Correspondance entre la classification proposée et celle du HERS-ST

PROPOSÉE		HERS-ST	
1	Automobile compacte	Compacte	véhicules légers
2	Automobile intermédiaire	Intermédiaire et grande	
3	Automobile grand format		
4	Camionnette	camionnettes	
5	Fourgonnette		
6	VUS		
7	Camion porteur 2 essieux	camions 6 roues	camions porteurs
8	Camions porteur 3 essieux	camions 3-4 essieux	
9	Camions porteur 4 essieux		
10	Camion semi-remorque 5 ess.	3-4 essieux	camions semi-remorques
11	Camion semi-remorque 6 ess.	5 essieux et plus	
12	Camion semi-remorque 7 ess.		
13	Train routier		

CHAPITRE 11

DISTRIBUTION DE LA FLOTTE DE VÉHICULES

11.1 Données de circulations disponibles (SOS)

Les données fournies par la Division de la circulation (DLC) sont agrégées au niveau de trois catégories de véhicules soit les véhicules légers, les camions porteurs et les camions de plus d'une unité. Ces données ont permis d'affecter des distributions des types de véhicules en fonction de la classe fonctionnelle de la route. Les données ont été fournies pour la période de pointe et en tout temps. La distribution agrégée des véhicules a été utilisée pour la production coûts d'exploitation des véhicules en fonction de l'état de la chaussée.

Le Tableau 11.1 présente les différentes proportions de ces trois catégories de véhicules, en tout temps, selon le milieu et la classe fonctionnelle de la route.

Tableau 11.1

Distribution par catégorie des véhicules
en fonction la classe fonctionnelle
(Tiré de Beaulieu, 2006b)

Type de route/véhicule		Véhicules légers	Camions porteurs	Semi-remorques
RURAL	Autoroute	89,3%	3,5%	7,2%
	National	90,1%	3,9%	6,0%
	Régionale	93,3%	3,7%	3,0%
	Collectrice	87,3%	4,8%	7,9%
URBAIN	Autoroute	93,2%	3,2%	3,6%
	National	93,2%	3,2%	3,6%
	Régionale	93,7%	3,9%	2,4%
	Collectrice	94,5%	3,8%	1,7%

11.2 Données de l'enquête 1999

Certaines données de comptages de camions lourds ont été fournies par la Direction du Transport Routier et des Marchandises (DTRM). Ces données sont tirées de l'Enquête routière nationale de 1998 (ERN, 1998) et, selon les informations obtenues, elles n'incluraient possiblement pas l'ensemble du transport intra régional. Dans une certaine mesure, cela pourrait entraîner une sous-estimation de la proportion des transports qui est effectuée par des camions porteurs et une surestimation des ensembles tracteurs et semi-remorques.

Les données présentées dans les tableaux qui suivent ont été extraites de celles compilées par la DTRM sur la base de l'étude origine-destination réalisée en 1998 (ERN, 1998).

Tableau 11.2

Fréquence par type de véhicules lourds
(Tiré de Plourde, 2006a)

Type de camion/nombre	nombre	%
Porteur	67,841	29.8%
Porteur et 1 remorque	2,431	1.1%
Tracteur et 1 remorque	145,935	64.1%
Tracteur et 2 remorque	11,606	5.1%

Tableau 11.3

Fréquence par type de véhicule lourd et par nombre d'essieux
(Tiré de Plourde, 2006a)

Type de camion/nombre d'essieux	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	total
Porteur	65.9%	28.3%	5.8%									100%
Porteur et 1 remorque		0.7%	26.2%	34.3%	30.5%	7.5%	0.8%					100%
Tracteur et 1 remorque		0.6%	3.2%	47.6%	25.7%	22.8%	0.1%					100%
Tracteur et 2 remorque				2.2%	3.3%	5.8%	79.0%	6.8%	1.1%	0.7%	1.1%	100%

11.3 Données obtenues du SMST

Les données suivantes sont tirées d'une extraction de la base de la Société de l'Assurance Automobile du Québec (SAAQ) réalisée par le Service de la modélisation et des systèmes de transports afin d'être utilisées dans le cadre des simulations dans le MOBILE6 QC. Ces résultats pourraient être utiles pour la validation du traitement des données acquises de ce Service.

Tableau 11.4

Extraction des véhicules enregistrés au Québec
(Tiré de Babin, 2004)

	Masse	Classe	Nombre	%
1	8501-10000lbs GVWR	HDDV2b	498	0.13%
2	10000-14000lbs GVWR	HDDV3	76	0.02%
3	8501-10000lbs GVWR	HDGV2b	367	0.10%
4	14001-16000lbs GVWR	HDGV4	16	0.00%
5	0-6000lbsGVWR	LDDT12	220	0.06%
6	6001-8500lbsGVWR	LDDT34	570	0.15%
7	Passenger car	LDDV	1,628	0.42%
8	0-6000lbsGVWR/0-3751LVW	LDGT1	8,558	2.23%
9	0-6000lbsGVWR/3751-5750LVW	LDGT2	85,885	22.33%
10	6001-8500lbsGVWR / 0-5750 ALVW	LDGT3	8,875	2.31%
11	6001-8500lbsGVWR / 5750+ ALVW	LDGT4	641	0.17%
12	Passenger car	LDGV	277,199	72.09%
13		N/A	5,391	1.40%
		TOTAL	384,533	100%

11.4 Données de circulations requises pour le HERS-ST

Pour le HERS-ST, des données sur la distribution de la circulation sont requises pour les sept différentes catégories de véhicules en fonction de la classe fonctionnelle et du milieu³⁹. Le Tableau 11.5 dresse la liste des données de circulation requises pour le système HERS-ST.

³⁹ La classe *Other Freeways and Expressways* ne s'applique pas au réseau routier québécois.

Tableau 11.5
Données de circulation requises pour le HERS-ST

	Classe fonctionnelle	Véhicules légers		Camions porteurs			Semi-remorques	
		petite	int./grand	pick up/vans	6-pneus	3+ ess.	3-4 ess.	5+ ess.
Rural	Interstate							
	OPA							
	Minor arterial							
	Major collector							
Urban	Interstate							
	Other Fwy/Exwy							
	OPA							
	Minor arterial							
	Major collector							

Les données sur la distribution de la flotte désagrégée telles que présentées dans le tableau précédent n'étant pas disponibles, il a été convenu avec le MTQ de retenir, pour chacune des trois catégories de véhicules, une distribution obtenue des bases de données de la SAAQ et de la ERN de 1998. Ainsi, les données présentées dans le Tableau 11.5 selon trois types de véhicules ont été désagrégées en utilisant celles transmises par la DTRM (Tableau 11.2 et Tableau 11.3). Toutefois, il semble possible que cette méthodologie soit plus pertinente dans le cas des classes fonctionnelles les plus stratégiquement importantes puisque les sites de l'enquête O-D de 1999 ont été concentrés sur les corridors les plus importants.

CHAPITRE 12

VÉHICULES REPRÉSENTATIFS

12.1 Définition du véhicule représentatif

Deux méthodologies sont possibles en vue de caractériser les véhicules de chacune des classes qui doivent servir à la modélisation des coûts aux usagers. Il s'agit de l'adoption d'un modèle représentatif existant, c'est-à-dire un modèle disponible sur le marché, ou de la définition d'un véhicule composite représentatif. La deuxième méthode consiste en la définition des caractéristiques moyennes pondérées pour chaque catégorie de véhicule.

Bien que la première méthode permette d'assurer une certaine corrélation entre les différentes caractéristiques du véhicule lors de la modélisation, cette méthodologie possède certaines limites quant à représentativité relative à l'ensemble des véhicules d'une même classe. Par exemple, les différentes versions du modèle *Civic* de *Honda* représenteraient plus de 13,2%⁴⁰ des automobiles de la catégorie des compactes sans que ces caractéristiques intrinsèques ne soient nécessairement représentatives de l'ensemble de ces véhicules.

La méthodologie préconisant la définition d'un véhicule composite assure une meilleure représentativité en ce qui a trait à la caractérisation des véhicules. Cette méthodologie consiste à définir les caractéristiques moyennes pondérées d'une série constituée des modèles les plus fréquents. Ainsi, une proportion plus importante des véhicules est représentée par le véhicule composite ainsi déterminé. Cette méthode nécessite le traitement d'une quantité importante de données.

⁴⁰ Selon le traitement des données de la SAAQ qui a été effectué successivement par le SMST ainsi que dans le cadre de la présente recherche (Roy et al., 2007a).

12.2 Base de données de la SAAQ

Le SMST a fourni une extraction de la base de données de la flotte de véhicules motorisés immatriculés à la SAAQ pour l'année 2004 sur l'ensemble du territoire québécois. Tel que rapporté dans un courriel transmis par Pierre Fournier (Fournier, 2006) :

« cette extraction de 4 342 509 véhicules représente 83,4% de l'ensemble des véhicules motorisés immatriculés au Québec ».

De plus, seulement les automobiles, les camions et les autobus y ont été retenus. Les véhicules non considérés sont les véhicule-outils, les motoneiges, les motocyclettes, les cyclomoteurs, les véhicules dont le lieu d'utilisation est restreint et les véhicules qui ne roulent que sur le territoire des ports et des aéroports.

Tableau 12.1

Véhicules en circulation au Québec

Type	Nombre	% véh. légers	% total
Véh. Légers	4226494	100%	97.3%
Automobiles	2877381	68.1%	66.3%
Fourgonnettes	489099	11.6%	11.3%
Sport utilitaires	334832	7.9%	7.7%
Camionnettes	316124	7.5%	7.3%
inconnu	209058	4.9%	4.8%
Camions lourds	99187	-	2.3%
Autobus	16828	-	0.4%
Total	4342509	-	100%

La base de données fournie une bonne base pour le travail de définition des véhicules représentatifs légers. La validation des différents modèles selon quatre catégories de véhicules (i.e. automobile, fourgonnettes, VUS et camionnettes) facilite l'exploitation des données contenues dans la table.

Pour ce qui est des véhicules lourds, les données contenues dans la base de données n'étaient pas validées. De plus, sur la base d'une analyse sommaire, le champ

Nb essieux max est caractérisé par des irrégularités en ce qui a trait au nombre d'essieux de certains modèles de camions. Conséquemment, ces dernières n'ont pu être utilisées telles quelles pour la définition des véhicules représentatifs.

Les méthodologies pour la définition des véhicules représentatifs sont présentées dans les sections qui suivent alors que les explications relatives aux champs de la base de données de la SAAQ se retrouvent dans Roy et *al.* (2007a).

12.3 Définition des véhicules légers « composites »

Les données des enregistrements de véhicule auprès de la SAAQ ont été utilisées afin d'effectuer des regroupements des véhicules les plus représentés pour chaque catégorie. Ces catégories ont été déterminées conformément à ce qui est présenté dans le chapitre 11. Le poids de chaque modèle de véhicule a été déterminé en vue de définir les caractéristiques de chacun d'entre eux. Les démarches relatives à cette caractérisation sont clarifiées dans le chapitre 13. Dans le cas des automobiles, les informations des constructeurs automobile et de l'EPA ont été utilisées afin d'imputer aux entrées de véhicules dont la valeur dans le champ de validation « **CLÉ** » est A (automobile) selon les trois classes déterminées (Fournier, 2006). Cela a été fait pour tous les modèles dont l'occurrence était de 1000 véhicules et plus. Des détails supplémentaires sont présentés dans des tableaux présentés en annexe du rapport Roy et *al.* (2007a).

12.4 Sélection des modèles représentatifs pour les camions

La classe des camions porteurs de deux essieux est celle qui semble être la plus hétérogène au niveau des véhicules et de leurs caractéristiques intrinsèques. De façon générale, les camions inclus dans cette catégorie peuvent faire partie des classes 3 à 7 du système de l'ATA. Leur masse, leur usage ainsi que leur coût d'exploitation peuvent être, par conséquent, très variables. Afin de caractériser cette classe de camions, la moyenne de

chaque paramètre de deux modèles ont été utilisés à titre référentiel. Le premier modèle est le *Hino FB1715/18174x2* (classe ATA 4) et le second est le *International 4900 4x2*⁴¹ (classe ATA 7). En incluant leurs différentes variantes, ces séries de modèles représentent ensemble 12,2% des camions deux essieux inclus dans la base de données fournie par la SAAQ.

Dans le cas des autres classes de camions, c'est-à-dire les camions porteurs et les semi-remorques de plus de 2 essieux, un seul modèle de référence a été sélectionné. Il s'agit des modèles suivants :

- camion porteur de 3 essieux : *Ford LTN8000 6x4*;
- camion porteur de 4 essieux : *International 4400 6x4*;
- semi-remorque de 5 essieux : tracteur *International 9200 4x2*;
- semi-remorque de 6 essieux : tracteur *International 9400 6x4*;
- semi-remorque de 7 essieux : tracteur *International 9400 6x4*;
- train routier : tracteur *International 9400 6x4*.

⁴¹ Ce modèle a été remplacé par le *International 4400 4x2*.

CHAPITRE 13

CARACTÉRISTIQUES DES VÉHICULES REPRÉSENTATIFS

13.1 Paramètres de modélisation du HERS-ST

Les modèles de coûts de fonctionnement des véhicules du HERS-ST ne requièrent pas un paramétrage au niveau des caractéristiques de ceux-ci étant donné la nature empirique des équations qui les composent. Toutefois, certaines caractéristiques liées à l'utilisation des véhicules peuvent être utilisées en vue de la quantification de la dépréciation temporelle et du temps de transport.

13.2 Paramètres de modélisation du HDM-4

L'exploitation des modèles de coûts aux usagers du HDM-4 nécessite la détermination de différentes caractéristiques pour chacun des véhicules représentatifs adoptés. Selon Paterson et Bennett (2000), les paramètres les plus sensibles des modèles des effets sur les usagers du HDM-4 sont les suivants :

- masse totale en charge (MTC);
- vie utile et/ou vie économique;
- kilométrage annuel;
- heures annuelles d'utilisation et de conduite seulement;
- pourcentage d'utilisation personnelle;
- puissance du moteur;
- puissance de freinage;
- diamètre des pneus;
- volume de gomme à l'usure d'un pneu;
- coefficient d'aérodynamisme;
- vitesse de révolution du moteur.

À cette liste de paramètres s'ajoute d'autres données physiques et mécaniques devant être considérés dans la caractérisation des classes de véhicules qui seront utilisées en vue des simulations à être effectuée à l'aide du HDM-4. Ces caractéristiques sont définies dans les sections qui suivent.

13.3 Méthode d'attribution des caractéristiques des véhicules

Similairement à ce qui est indiqué à la section 12.3, les modèles constitutifs des différentes classes ont été pondérés en fonction de leur occurrence afin de permettre la caractérisation des véhicules représentatifs. Les moyennes pondérées des valeurs de différentes caractéristiques des modèles ont ainsi été déterminées. L'attribution de ces valeurs a été faite à partir des données fournies par les fabricants pour trois années de référence : 1995, 2000 et 2003.

Dans le cas des véhicules lourds, des sondages auprès des concessionnaires et des commerçants ont fourni les informations nécessaires. Dans certains cas, les paramètres ont pu être identifiés à partir d'études concernant le marché.

Une liste exhaustive des modèles de véhicules identifiés est intégrée dans le rapport Roy et *al.* (2007a).

13.4 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des véhicules incluent les dimensions, la masse et le nombre d'essieux. Les méthodes employées pour en déterminer les valeurs sont présentées dans les sections qui suivent.

Une synthèse de ces valeurs est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 13.1
Synthèse des paramètres physiques (HDM-4)

Véhicule		Caractéristiques physiques				
		Nombre de roues (#)	Nombre d'essieux (#)	Masse en charge (t)	Aire frontale (m2)	Coeff. aérodyn. (#)
1	Automobile compacte	4	2	1.31	2.14	0.33
2	Automobile intermédiaire	4	2	1.61	2.23	0.33
3	Automobile grand	4	2	1.81	2.32	0.34
4	Camionnette	4	2	2.19	2.77	0.50
5	Fourgonnette	4	2	2.05	2.71	0.53
6	VUS	4	2	2.01	2.91	0.37
7	Camions porteur 2 essieux	6	2	7.78	5.00	0.60
8	Camions porteur 3 essieux	10	3	15.84	8.50	0.70
9	Camions porteur 4 essieux	12	4	20.91	8.50	0.70
10	Camion semi-remorque 5 essieux	18	5	31.51	9.00	0.80
11	Camion semi-remorque 6 essieux	18	6	37.44	9.00	0.80
12	Camion semi-remorque 7 essieux	18	7	43.10	9.00	0.80
13	Train routier	18	8	49.34	9.00	0.80

13.4.1 Dimensions de grandeur

Les dimensions des véhicules (i.e. largeur, hauteur et dégagement par rapport au niveau du sol) ont été déterminées selon les données des constructeurs. Les calculs relatifs à la détermination de l'aire frontale ont été faits selon la méthodologie présentée dans Paterson et *al.* (2000); les calculs prenant en compte la largeur et la hauteur des véhicules ainsi que le dégagement sous le pare-choc. .

Dans le cas de certains camions lourds, le dégagement moyen sous le pare-choc a été mesuré à partir de l'inventaire de camions d'un concessionnaire. Les autres dimensions ont été déterminées à partir de la documentation rendue disponible par les constructeurs.

13.4.2 Coefficient d'aérodynamisme

Les coefficients d'aérodynamisme des véhicules légers ont été obtenus des fabricants tandis que les valeurs incluses dans HTC (2002) et Bennett, C.R. (2003) ont été utilisées pour les véhicules lourds.

13.4.3 Masse

La base de données de la SAAQ inclue la **masse nette** des véhicules qui est exprimée en kilogrammes. Ces masses incluent la charge de l'équipement incorporé à un véhicule; c'est pour cette raison que les données des fabricants relatives à la masse nette n'ont pas été utilisées. Les masses des remorques ont été déterminées à partir des données des manufacturiers et de celles présentées dans TC (2003).

Ensuite, pour les véhicules légers, les **masses totales en charge** (MTC) estimées des passagers, du carburant et de la marchandise ont été attribuées. Ces masses estimées ont été fixées à 150 kilogrammes dans le cas des automobiles et à 300 kilogrammes pour les VUS et les fourgonnettes alors qu'elles sont estimées à 400 kilogrammes pour les camionnettes.

La MTC pour chaque type de camions a d'abord été estimées à l'aide de la masse nette des véhicules à laquelle a été ajouté le chargement moyen en fonction de la configuration des essieux telle que fournie par l'enquête O-D de 1999 qui ont été fournis par la DTRM.

Une révision de ces valeurs a été faite selon les résultats présentés dans CDAT (2006) en ce qui a trait au taux de chargement estimé moyen pour les camions. Les taux de chargements moyens arrondis qui ont été utilisés pour les calculs sont présentés dans le Tableau 13.3.

Les valeurs du **poids technique maximum d'un véhicule isolé** (ou PNBV) ont été déterminées à partir des données des fabricants. Ces valeurs ont été utilisées pour valider celles de la MTC ainsi que pour le calcul de la puissance de freinage qui est présentée plus loin dans le présent chapitre.

Le Tableau 13.2 présente une synthèse des valeurs utilisées pour le calcul de la masse en charge.

Tableau 13.2

Calcul de la masse totale en charge des camions (tonnes métriques)

Configuration	Nombre essieux	Masse nette du camion	Masse nette remorque(s)	Taux de charge	Masse du chargement	MTC
1 unité	2	5.40		30%	2.38	7.78
	3	9.40		40%	6.44	15.84
	4	10.20		45%	10.71	20.91
2 unité	5	8.60	6.42	60%	16.49	31.51
	6	9.10	8.00	60%	20.34	37.44
	7	9.10	9.40	60%	24.60	43.10
3 unités	8	9.10	12.25	60%	27.99	49.34

13.4.4 Nombre d'essieux et nombre de roues

Un nombre d'essieux de chaque véhicule a été attribué sur la base de la classification des véhicules proposée.

Le nombre de pneus, ou de roues, a été attribué en fonction des configurations les plus fréquentes au Québec.

13.5 Paramètres mécanique

Les paramètres mécaniques des véhicules servent pour les modèles des forces agissantes sur les véhicules ainsi que ceux de la consommation de carburant et de lubrifiant. Ils ont trait aux caractéristiques et aux performances des moteurs et du groupe motopropulseur.

Le Tableau 13.3 dresse la liste des paramètres mécaniques les plus sensibles.

Tableau 13.3
Synthèse des paramètres mécaniques (HDM-4)

Véhicule	Paramètres mécaniques						
	Cylindrée du moteur (L)	Vitesse maximale du moteur (rpm)	Puissance effective du moteur (kW)	Puissance de freinage (kW)	Puissance nominale du moteur (hp)	Vitesse du moteur au ralenti (rpm)	Cons. en essence au ralenti (ml/s)
1 Automobile compacte	1.85	5692.62	57.0	23.76	119.8	800.00	0.25
2 Automobile intermédiaire	2.65	5491.08	74.8	26.53	176.5	800.00	0.36
3 Automobile grand	3.72	5639.01	89.8	28.45	229.3	800.00	0.48
4 Camionnette	4.37	4694.24	86.9	29.60	218.6	700.00	0.48
5 Fourgonnette	3.39	5181.42	83.2	28.92	205.4	700.00	0.37
6 VUS	3.28	4035.03	74.2	29.25	174.4	700.00	0.48
7 Camions porteur 2 essieux	6.00	2700.00	140.0	70.00	200.0	700.00	0.37
8 Camions porteur 3 essieux	8.00	2400.00	171.5	255.00	245.0	500.00	1.12
9 Camions porteur 4 essieux		2100.00	217.0	255.00	310.0	500.00	1.12
10 Camion semi-remorque 5 essieux		2100.00	304.5	255.00	435.0	500.00	1.12
11 Camion semi-remorque 6 essieux		2100.00	287.0	255.00	410.0	500.00	1.12
12 Camion semi-remorque 7 essieux		2100.00	269.5	255.00	385.0	500.00	1.12
13 Train routier		1800.00	367.5	255.00	525.0	500.00	1.12

13.5.1 Cylindrée du moteur

La cylindrée du moteur a été établie à partir des modèles les plus représentatifs pour chacune des catégories de véhicules adoptées. Les données fournies par les constructeurs ont été utilisées.

13.5.2 Puissance nominale du moteur

Les données fournies par les constructeurs à propos de la puissance nominale des moteurs ont été utilisées. Dans le cas particulier des camions⁴², les puissances ont été déterminées selon le moteur préalablement sélectionné et sur la base des informations fournies par les concessionnaires en ce qui a trait aux puissances les plus fréquemment préconisées par les

⁴² Les plages de valeurs de la puissance maximale offerte par l'industrie peuvent être importantes pour un même moteur.

acheteurs en 2005 lors du choix des véhicules. Les puissances fournies en HP (système SAE) ont été converties en kilowatts pour utilisation dans le HDM-4.

13.5.3 Puissance effective du moteur

La valeur de la puissance effective du moteur a été attribuée aux différents véhicules en fonction d'équations sélectionnées en conformité avec la méthodologie présentée dans Paterson et Bennett (2000) et par Bennett et Greenwood (2003).

13.5.4 Puissance de freinage

La puissance de freinage a été attribuée aux différents véhicules en utilisant les équations fournies par Bennett et Greenwood (2003) qui définit la puissance moyenne de freinage en fonction du PNBV du véhicule (Roy et al., 2007a).

13.5.5 Vitesse maximale de révolution du moteur

La vitesse maximale de révolution du moteur a été établie selon la moyenne pondérée pour chaque classe de véhicules légers. Dans le cas des véhicules lourds, la vitesse maximale de révolution a été définie à partir des données fournies par les constructeurs.

13.5.6 Vitesse de révolution du moteur au ralenti

La vitesse de révolution du moteur au ralenti⁴³ a été établie à partir des données par défaut qui sont présentées dans Paterson et Bennett (2000) et HTC (2002).

⁴³ L'expression « vitesse du moteur fonctionnant au ralenti » est utilisée comme traduction de l'expression anglaise *idle speed*.

13.5.7 Type de carburant utilisé

Dans le HERS-ST, l'essence a été attribuée comme étant le type de carburant utilisé par les automobiles et les camions de 4 et 6 roues. Le diesel a été attribué aux camions porteurs de 3 essieux et plus et aux camions articulés. Les mêmes valeurs ont été attribuées pour la recherche faisant l'objet de ce mémoire.

Dans le cas du HDM-4, la même logique a été appliquée à l'exception de la classe des camions porteurs de 2 essieux. Sur la base des informations obtenues de la Direction du transport routier (DTRM) et du SMST, les camions de cette classe sont caractérisés en très grande majorité de moteur diesel. Bien que cette classe soit caractérisée par une grande proportion de véhicules propulsés par des moteurs à essence, un seul type de carburant a été affecté. La deuxième colonne du Tableau 13.4 présente les informations fournies par la DTRM.

Tableau 13.4

Type de carburant utilisé par les camions
(Tiré de Gonthier, 2005)

Nombre d'essieux	NB de camions lourds	% diesel selon l'immatriculation	% de consommation diesel
2 essieux	50 170	79,1	15,74
3 essieux	18 963	93,4	8,53
4 essieux	7 487	95,9	3,70
5 essieux	13 694	98,9	22,03
6 essieux et plus	27 496	99,4	44,57
Total	117 810	89,5	94,6

13.5.8 Consommation de carburant à la vitesse de révolution du moteur au ralenti

Dans un premier temps, l'équation⁴⁴ présentée dans Bennett et Greenwood (2003) a été utilisée afin d'estimer la consommation de carburant à la vitesse de révolution minimale du moteur en marche. Toutefois, les résultats obtenus semblant relativement peu satisfaisants ($R^2=0.6$), les paramètres par défaut présentés dans HTC (2002) ont été retenus. La nature des simulations effectuées afin d'estimer la consommation en carburant ne justifie pas un étalonnage plus poussé puisque ce paramètre est sensible dans le cas où les simulations sont faites dans des conditions de circulation dense.

13.5.9 Consommation de carburant (valeur nominale)

Différentes valeurs de la consommation de carburant ont été identifiées dans la littérature. Ces valeurs font référence aux taux de consommation d'essence établie en laboratoire sur des véhicules neufs ou, à tout le moins, peu avancés en âge. Ces cotes de consommation sont publiées par des organismes tels que l'EPA, le laboratoire «*Oak Ridge National Laboratories*»⁴⁵ (ORNL), Transports Canada et l'Office de l'Efficacité Énergétique (OEE) qui relève du ministère canadien des Ressources Naturelles. Ces valeurs s'expriment selon des cycles de conduite, sur autoroute et en ville, ou une combinaison de différents cycles et, selon le cas, peuvent être pondérées afin d'assurer une représentativité par rapport à la consommation réelle. Certaines valeurs de référence de la consommation moyenne sont présentées dans le Tableau 13.5.

⁴⁴ Paramètre évalué sur la base de la cylindrée du moteur.

⁴⁵ Organisme du gouvernement des États-Unis d'Amérique

13.5.9.1 Facteur de pondération de la consommation de carburant

Dans le Tableau 13.5, les données sur la consommation ont été utilisées pour l'estimation des facteurs d'ajustement de la consommation de carburant à intégrer à HERS-ST à partir des valeurs de références de l'année 1980. Il s'agit de l'année pour laquelle les modèles de consommation de carburant ont été développés.

Tableau 13.5

Données sur la consommation de carburant

carburant	Véhicules légers			
	compacte	int./grande	Total auto.	camionnette
EPA 1980 (mi/gal)	27	22.45	-	17
EPA 1980 (L/100km)	8.8	10.5	9.74	13.9
CME 2001	8.6	9.7	-	11.4
Facteur calculé	1.019	1.086	-	1.221
OEE 2001	9.3	11.8	-	14.8
Facteur calculé	0.942	0.893	-	0.940
Compilation (données du SMST)	-	-	8.9	12.8
Facteur calculé	-	-	1.089	1.088
Facteurs (HERS-ST v.4.0)	0.862	1.061	-	1.198

carburant	Camions porteurs		Semi-remorques	
	6-roues	3 essieux	3-4 essieux	5 essieux
EPA 1980 (mi/gal)	7	7.62	5.07	-
EPA 1980 (L/100km)	33.8	31.0	46.7	-
CME 2001	-	-	-	-
Facteur calculé	-	-	-	-
OEE 2001	15.0	26.2	40.0	40.0
Facteur calculé	2.253	1.185	1.166	-
Compilation (données du SMST)	-	-	-	-
Facteur calculé	-	-	-	-
Facteurs (HERS-ST v.4.0)	1.507	0.909	2.746	3.479

Les valeurs des facteurs d'ajustement calculées à partir des données de CME (2001) sont recommandées pour les trois catégories de véhicules légers puisque qu'elles se comparent avantageusement aux données obtenues du SMST (Babin, 2006b).

Dans le cas des camions porteurs, l'estimation des facteurs de pondération à partir des données de l'OEE semble défendable suite à une première analyse. Ces facteurs ont été validés lors de l'analyse des résultats présentés dans le chapitre 17.

Les facteurs estimés pour les semi-remorques reposent sur des valeurs de références qu'il n'a pas été possible de documenter. Une analyse similaire à partir des mesures sur la route de la consommation de carburant pour une semi-remorque de 4 essieux tels que présentées dans Zaniewski (1982) n'a pas apportée un éclairage additionnel. Des courriels ont été envoyés à la FHWA en vue d'obtenir des informations complémentaires sur le sujet mais sont demeurés sans réponse jusqu'au moment de l'écriture de ce mémoire.

Par conséquent, les valeurs par défaut pour les facteurs d'ajustement sont recommandées même si, à première vue, elles semblent tenir compte de l'évolution de l'efficacité énergétique des moteurs sans considérer l'aspect de l'accroissement important de la cylindrée et de la puissance des moteurs par rapport à 1980.

13.6 Caractéristiques des pneus

Les caractéristiques des pneus servent à la modélisation de leur usure ainsi qu'à celle des forces agissantes sur les véhicules. Ces caractéristiques incluent les dimensions des pneus et certaines données sur leur utilisation.

Chaque caractéristique a été déterminée à partir des pneus d'origine fournis par les fabricant pour les différents modèles de véhicules. La valeur moyenne pour chaque caractéristique a été obtenue par moyenne pondérée selon le nombre de véhicules de chaque modèle immatriculé au Québec dans le cas des véhicules légers.

Tableau 13.6

Synthèse des paramètres des pneus (HDM-4)

		Paramètres des pneus			
		Nombre de rechapages (#)	Coûts du rechapage (%)	Diamètre des roues (m)	Volume de gomme (dm ³)
Véhicule					
1	Automobile compacte	0	0	0.60	1.30
2	Automobile intermédiaire	0	0	0.60	1.30
3	Automobile grand	0	0	0.66	1.30
4	Camionnette	0	0	0.70	1.40
5	Fourgonnette	0	0	0.70	1.40
6	VUS	0	0	0.70	1.40
7	Camions porteur 2 essieux	2	66	1.03	6.00
8	Camions porteur 3 essieux	2	38	1.03	8.00
9	Camions porteur 4 essieux	2	38	1.03	8.00
10	Camion semi-remorque 5 essieux	2	38	1.03	8.00
11	Camion semi-remorque 6 essieux	2	38	1.03	8.00
12	Camion semi-remorque 7 essieux	2	38	1.03	8.00
13	Train routier	2	38	1.03	8.00

13.6.1 Dimensions des pneus

Les dimensions de pneus ont été déterminées selon les modèles les plus représentés pour chaque classe de véhicule. Une liste des modèles de pneus les plus répandus sur le marché a été fournie par les fabricants de pneus.

Les différentes dimensions ont été déduites de la typologie utilisée par l'industrie telle que décrite dans Paterson et Bennett (2000). Ces caractéristiques ont été déterminées selon les pneus d'origine des différents modèles de véhicules considérés dans la présente recherche; soit selon une distribution pondérée pour les véhicules légers et en fonction du modèle représentatif pour les camions.

13.6.2 Diamètre des roues

Le diamètre de roues a été déterminé pour les modèles de pneus les plus représentatifs pour chaque classe de véhicule conformément à l'approche retenue à la section précédente. Le calcul du diamètre a été établi à partir de la typologie utilisée par l'industrie

et selon la méthode décrite dans Paterson et Bennett (2000). Ce paramètre a une influence sur la modélisation des coûts de consommation en carburant, en lubrifiant et en pneus par le HDM-4.

13.6.3 Volume de la gomme

Le volume de la gomme disponible a été déterminé à partir des dimensions des pneus selon les indications de Paterson et Bennett (2000). Les dimensions utilisées ont été celles calculés selon la typologie alors que certains paramètres par défaut, déterminés lors d'études néo-zélandaises (Bennett et Greenwood, 2003), ont été utilisés.

13.6.4 Paramètres d'utilisation des pneus

La durée de vie ainsi que les politiques de rechapages servent à modéliser la consommation en pneus. Les paramètres relatifs au rechapage ne sont pas pertinents dans le cas des véhicules légers. Par conséquent, aucune donnée n'a été amassée à ce sujet au cours de l'étude pour ces véhicules.

13.6.4.1 Durée de vie

Des données relatives à la durée de vie des carcasses de pneus et des rechapages ont été amassées auprès des fabricants de pneus et des exploitants de flotte de véhicules. Ce paramètre est relatif au type d'utilisation du véhicule (transport longue distance, transport régional ou utilisation «route/hors-route») ainsi qu'à la position du pneu sur le véhicule (direction, propulsion ou remorque). Ainsi, une durée de vie moyenne a été déterminée selon les données disponibles.

Le Tableau 13.7 présente certaines valeurs relatives au rechapage des pneus établies à partir d'une compilation des données pour différents camions prenant en compte une distribution proportionnelle des différentes valeurs selon le type d'utilisation (transport longue distance et régional; utilisation route/hors-route)⁴⁶.

Tableau 13.7

Données sur l'utilisation des pneus

	Porteurs	Semi-remorques	Trains
Coût moy. (\$)	200	200	200
Nombre de rechapages	2.5	2.5	2
Durée (km)	237 500	287 500	350 000

13.6.4.2 Nombre de rechapages

Le nombre de rechapages des pneus et la distance parcourue entre chaque rechapage ont été déterminés pour les véhicules lourds. Ces informations ont été déduites de façon similaire à la durée de vie des carcasses pour les raisons évoquées à la section précédente. Aussi, les politiques de rechapages des propriétaires de véhicules ont été sondés en vue de l'attribution des valeurs requises pour le HDM-4.

13.7 Utilisation des véhicules

Plusieurs paramètres concernant l'utilisation des véhicules ont une influence considérable sur les résultats de la modélisation des coûts aux usagers. Par conséquent, une attention particulière a dû être portée relativement aux données concernant la durée de vie, l'utilisation annuelle et la nature de l'utilisation des véhicules.

⁴⁶ L'allocation des valeurs a été faite à partir de la distribution des différents types de configuration de véhicules présentés par l'EVC1999, les types de transports relevés dans MTQ (2000) et les données transmises par un fabricant de pneus.

Le Tableau 13.8 présente les valeurs adoptées relativement à l'utilisation des véhicules.

Tableau 13.8
Synthèse des paramètres d'utilisation (HDM-4)

Véhicule		Paramètres liés à l'utilisation		
		Utilisation annuelle (km)	Utilisation annuelle (heures)	Vie utile (années)
1	Automobile compacte	18000	300	12
2	Automobile intermédiaire	18000	300	12
3	Automobile grand	18000	300	12
4	Camionnette	18000	300	13
5	Fourgonnette	18000	300	13
6	VUS	18000	300	13
7	Camions porteur 2 esieux	30000	1200	10
8	Camions porteur 3 esieux	35000	1200	7
9	Camions porteur 4 esieux	40000	1200	7
10	Camion semi-remorque 5 essieux	160000	2100	5
11	Camion semi-remorque 6 essieux	160000	2100	5
12	Camion semi-remorque 7 essieux	160000	2100	5
13	Train routier	160000	2100	5

13.7.1 Vie utile et vie économique

La durée de vie utile se définit comme étant la période de temps durant laquelle un véhicule sera utilisé. La durée de vie économique correspond à l'âge pour lequel la valeur résiduelle d'un véhicule est minimale alors qu'il est toujours rentable d'utiliser le véhicule par considération de l'ensemble des frais d'exploitation s'y rapportant. Autant la durée de vie économique que la durée de vie utile (ou optimale) peuvent être utilisées par HDM-4 pour des fins de modélisation. Le premier paramètre sera utilisé pour les véhicules lourds et le second dans le cas des véhicules légers; majoritairement à usage non commercial.

Dans le cas du HERS-ST, les données concernant la durée de vie économique sont utiles pour la modélisation des coûts liés à la dépréciation et au temps d'utilisation des véhicules. Par compte, il faut souligner que les deux systèmes préconisent des méthodologies de modélisation des coûts de dépréciation qui sont très différentes; les

résultats distincts à chacun des modèles risquent de ne pas correspondre. Cet aspect est démontré au chapitre 18.

La durée de vie des véhicules légers a été déterminée à partir des enregistrements de la base de données de la SAAQ. Les valeurs tirées de cette banque sont relativement similaires à celles qui ont été déduites de la statistique du kilométrage moyen déjà fournie à l'ÉTS par la CAA (CAA, 2002)⁴⁷ et à celles calculées à partir des données publiées par Desrosiers (2003)⁴⁸. Les trois méthodes comportent des incertitudes qui peuvent affecter la valeur de la durée de vie moyenne pour les véhicules en circulation sur le réseau : la première tient compte des véhicules qui sont sous-utilisés, la seconde n'est pas détaillée et la troisième est réalisée à partir d'une méthode qui n'est pas infaillible (HTC, 2002). Pour ces raisons, la valeur de l'âge moyen pour les véhicules légers a été estimée à 6,2 années et une durée de vie utile arrondie à 12 ans.

Les valeurs concernant les véhicules lourds ont été déduites des informations obtenues lors de sondages réalisés auprès de l'industrie qui ont été validées par certaines sources d'information identifiées sur le sujet (MoHT, 1996 et TC, 2003). Les valeurs déduites de la base de la SAAQ ne semblent pas concorder avec les réalités de l'industrie; dès lors, des durées de vie plus courtes ont été préconisées comme intrant aux modèles. Dans le cas des camions porteurs de 2 essieux, une valeur intermédiaire entre celles des véhicules légers et des camions lourds a été sélectionnée sur la base du jugement; les informations pertinentes n'ayant pas été identifiées.

⁴⁷ Selon la CAA, la valeur moyenne inscrite à l'odomètre des véhicules légers est de 120 000 km. L'âge moyen a été déduit selon l'hypothèse que ce type de véhicules parcourt annuellement une moyenne de 18 000 km.

⁴⁸ À titre indicatif, ces valeurs ont été déduites en suivant la méthodologie de calcul du taux de survie présentée par Zaniewski (1982) et par Bennett (2003). La méthode repose sur l'hypothèse du taux de survie du 3^e percentile de véhicules.

13.7.1.1 Ajustement du taux de dépréciation (HERS-ST)

À l'instar du taux de consommation d'essence sous-jacent aux modèles du HERS-ST, celui relié à la dépréciation des véhicules nécessite un ajustement en vu d'assurer une exploitation viable du système du FHWA.

La recherche de valeurs de référence et une réflexion conséquente sur le sujet ont mis en évidence la grande difficulté de la détermination des facteurs d'ajustement pour le paramétrage du HERS-ST. La discussion présentée dans cette section s'avère être une démonstration des difficultés rencontrées et ne prétend pas à l'exactitude de l'estimation des facteurs de dépréciation.

À partir des données de diverses sources, des estimations du facteur d'ajustement du taux de dépréciation sous-jacent aux équations des coûts en capital du HERS-ST ont été établies.

Le Tableau 13.9 présente un sommaire des estimations qui ont été posées.

Tableau 13.9

Estimation du facteur d'ajustement du taux de dépréciation

dépréciation	Flotte	Véhicules légers		
		compacte	int./grande	camionnette
Zaniewski (1982)	-	4.74	4.74	4.74
HERS (2004)	6.6	-	-	-
Desrosiers (2003)	-	5.8	5.8	6.7
Facteur calculé	-	1.224	1.224	1.414
CAA (2002)	-	6.7		
Facteur calculé	-	1.414		
Enregistrements SAAQ - médiane	7.6	6.3	6.3	5.7
Facteur calculé	1.152	1.329	1.329	1.203
dépréciation	Camions porteurs		Semi-remorques	
	6-roues	3 essieux	3-4 essieux	5 essieux
Zaniewski (1982)	4.93	4.63	4.1	4.1
HERS (2004)	-	-	-	-
Enregistrements SAAQ - médiane	8.7	8.7	6.6	6.6
Facteur calculé	1.765	1.879	1.610	1.610

Dans ce tableau, les valeurs de références pour l'année 1980⁴⁹ sont tirées de FHWA (2005) en ce qui concerne l'âge moyen de la flotte (6,6 années) et des valeurs présentées dans Zaniewski (1982) pour chacun des véhicules individuels.

À défaut d'information pertinente, la valeur de l'âge moyen des camionnettes pour 1980 a été attribuée aux automobiles pour les fins du calcul.

Les données ayant servies à évaluer l'âge moyen actuel pour les véhicules sont :

- les résultats du traitement des données sur le taux de survie des automobiles et des camionnettes qui sont tirées de Desrosiers (2003) (la méthodologie complète est présentée dans Roy (2007a);
- la donnée sur le kilométrage moyen fourni par l'association canadienne des automobilistes (CAA, 2002) et l'utilisation annuelle moyenne pour ce type de véhicule, soit 18 000 km;
- la médiane⁵⁰ de l'âge obtenu par traitement des données des enregistrements de la SAAQ de l'année 2003 pour les différentes catégories de véhicules.

Ainsi, en suivant la méthodologie d'actualisation du HERS-ST (FHWA, 2005), le facteur d'ajustement calculé pour la flotte en entier (1,152) semble sous-estimé comparativement à la valeur proposée par le système de la FHWA (1,41). Des valeurs semblables à ces dernières ont été obtenues des données de Desrosiers (2003) et de CAA (2002) dans le cas des véhicules légers.

⁴⁹ Ce qui correspond à l'année de développement des modèles d'estimation des coûts en dépréciation (Zaniewski, 1982).

⁵⁰ Selon les auteurs de Bennett et al. (2004), l'estimation de l'âge moyen des véhicule à partir de la médiane fourni des résultats comparables à ceux des autres méthodes d'estimation de l'âge moyen relevées dans le cadre de différentes études sur le sujet.

En ce qui concerne l'utilisation des valeurs de l'âge médian, on constate une probable sous-estimation dans le cas des véhicules légers et une surestimation pour les camions. Faute d'avoir identifié des valeurs satisfaisantes, la valeur du facteur d'ajustement proposée dans FHWA (2005), soit 1,41, est recommandée pour les camions; la situation de l'industrie du camionnage aux États-Unis étant, par hypothèse, considérée similaire à celle prévalant au Québec en ce qui concerne la durée de vie économique. Bien qu'il soit logique d'estimer que la longévité des véhicules soit inférieure au Québec comparativement aux États-Unis, la même valeur du facteur d'ajustement que celle qui a été proposée pour les camions pourra être utilisée en vue du paramétrage du HERS-ST. Ces valeurs pourront être utilisées sur un horizon intérimaire à l'acquisition d'informations complémentaires et pertinentes⁵¹.

13.7.2 Utilisation annuelle

L'utilisation des véhicules est relative au temps d'exploitation et à la distance parcourue annuellement par les différents véhicules. Ces données ont une grande influence sur l'estimation des coûts de fonctionnement et ceux relatifs à la dépréciation. Les différents paramètres proposés, soit le kilométrage annuel et les heures d'utilisation, se doivent d'être cohérents entre eux.

13.7.2.1 Kilométrage parcouru

Le kilométrage annuellement parcouru par les véhicules est très important. La source d'information préalablement favorisée fut celle de l'Enquête sur les Véhicules au Canada (EVC). En ce qui concerne les véhicules légers, un consensus semble établi autour d'une valeur de 18 000 kilomètres par année.

⁵¹ Les développeurs du HERS-ST n'ont pas donné suite aux demandes formulées dans le cadre de la recherche en ce qui a trait à la divulgation des valeurs de références utilisées pour la mise à jour des facteurs d'ajustement.

Toutefois, les réalités de l'industrie du transport semblent parfois différentes de celle reflétée par cette enquête, d'autres sources d'informations ont été identifiées. En somme, celles qui ont été utiles dans la caractérisation de ce paramètre sont : 1) l'Enquête sur les véhicules au Canada dans le cas des véhicules légers et les semi-remorques ainsi que 2) les valeurs de la DTRM et celles rapportées par Deloitte (2004) dans le cas des semi-remorques de moins de 5 essieux et les camions porteurs. Les sondages effectués auprès d'exploitants de flottes de semi-remorques ont fourni des valeurs légèrement supérieures. Les différentes valeurs ont également été comparées avec celles proposées dans d'autres études telles que celle sur les coûts d'utilisation des véhicules légers au Canada (TC, 2003), celle sur la situation des camionneurs au Québec (MTQ, 2000) et les valeurs adoptées pour le modèle BC VOC (MoHT, 1996). Un sommaire des différentes valeurs est présenté dans des tableaux à la section 13.7.2.3.

13.7.2.2 Nombre d'heures d'utilisation des véhicules

Le nombre d'heures d'utilisation par année des différents véhicules sert aux calculs des coûts liés à la dépréciation ainsi qu'à l'allocation des frais d'intérêt et généraux. Les valeurs proposées découlent d'hypothèses qui sont basées sur les valeurs identifiées lors d'une revue des publications sur le sujet. Les résultats du sondage effectué auprès des exploitants de flotte de camions ne sont pas considérés comme représentatifs pour l'ensemble des véhicules lourds circulant sur les routes du Québec.

Véhicules légers

Le nombre d'heures d'utilisation annuelle pour les véhicules légers qui a été adopté par HERS a été retenu. Selon cette approche, une valeur de 2 000 heures est obtenue d'une estimation du nombre maximum d'heures pendant lesquelles un véhicule peut être normalement utilisé.

Camions porteurs

L'estimation du nombre d'heures d'utilisation des camions porteurs comportant 2 essieux a été faite de manière similaire à celle visant les véhicules légers. Dans le cas des camions de

3 et 4 essieux, l'estimation du nombre d'heures d'utilisation a été obtenue en déterminant une moyenne pondérée tenant compte du nombre d'heures d'utilisation précédemment discuté (HERS), de celui proposé par l'étude Deloitte (2004) ainsi que de la proportion de véhicules immatriculés qui comportent une benne. L'hypothèse retenue est que les véhicules menus de ce type de configuration sont utilisés de façon saisonnière selon la fréquence présentée dans Deloitte (2004) tandis que les autres sont utilisés pendant toute l'année. La valeur ainsi estimée de 1 685 heures par année étant semblable à celle proposée par HERS pour les camions porteurs de 3 et 4 essieux (1 600 heures); cette dernière a été conservée pour les fins de la présente recherche.

Semi-remorques

L'étude réalisée pour le compte de la Direction de la mobilité en transport (MTQ, 2000) inclut certaines données concernant le nombre d'heures de travail, conduite et attente, des conducteurs de camions semi-remorques. Ces valeurs ont été rapportées pour une période d'une année en multipliant ce nombre par 52 semaines⁵² pour les camionneurs propriétaires et non propriétaires. La moyenne obtenue (2 756 heures) a été pondérée selon le type de camionneurs et arrondie pour en arriver à une valeur de 2 800 heures. Cette valeur est inférieure comparativement aux 3 000 heures proposées par le MoHT (MoHT, 1996) et aux résultats des sondages effectués dans le cadre de la présente recherche. Ces différences peuvent être attribuables au fait que les valeurs présentées dans ce mémoire proviennent de sondages d'exploitants de flotte qui, pour des objectifs de rentabilité, tendent à utiliser leurs véhicules au maximum. La moyenne d'utilisation pour tous les camions⁵³ pourrait être inférieure à la valeur présentée. Ainsi, ces valeurs plus grandes semblent représentatives

⁵² Bien que ce nombre de semaines soit supérieur à celui présenté dans MTQ (2000) qui lui représente le nombre de semaines travaillées par un conducteur, l'hypothèse demeure que les camions sont utilisés toute l'année.

⁵³ Il s'agit d'inclure l'ensemble des véhicules : les camionneurs propriétaires, les exploitants de véhicules «pour compte propre» et les transporteurs pour compte d'autrui.

de la situation qui prévaut dans l'industrie du transport longue distance plutôt que dans l'ensemble du transport par semi-remorque.

13.7.2.3 Nombre d'heures de conduite

Véhicules légers

Pour les véhicules légers, le nombre d'heures de conduite a été estimé à partir des valeurs de kilométrage moyen et de la vitesse moyenne de fonctionnement telle que présentée par Babin (2006b). La valeur ainsi calculée a permis d'estimer le nombre d'heures de conduite à environ 270. Une valeur de 300 heures de conduite annuelle est suggérée en vue de la modélisation.

Camions porteurs

Les valeurs liées à l'utilisation des camions porteurs semblent celles qui sont les plus ardues à estimer si l'on considère la panoplie d'usages et de types d'exploitation qui sont présents dans l'industrie du transport et qui caractérise cette catégorie de véhicule. Les différentes études consultées ne considèrent pas toutes la même définition de camion (i.e. camions moyen ou camions porteur). Certaines des valeurs rapportées sont basées sur des hypothèses (Gonthier, 2006 et TC, 2003) ou des méthodologies qui ne sont pas explicitement détaillées (MoHT, 1996, Deloitte, 2004 et HERS-ST v.4.0). L'Étude sur les Véhicules au Canada (EVC) présente une valeur basée sur l'échantillon de données le plus important.

Les différentes valeurs répertoriées lors de la revue de la littérature sont présentées, à la page suivante, dans le Tableau 13.10. La première valeur présentée a été calculée à partir des informations contenues dans le document portant sur un modèle exploratoire de l'utilisation du réseau routier (Babin, 2006b). La valeur adoptée pour le temps de conduite sur une année est de 1 200 heures pour toutes les classes de camions porteurs.

Tableau 13.10
Utilisation des camions porteurs

Camions porteurs				
Étude	Heures/an.	km/an.	Vitesse moy.	Commentaires ⁵⁴
Babin (2006)	597	40 000	67	Vitesse moyenne des véhicules
TC (2003)		80 000		Hypothèse (<i>Trucking Operating Costs in Canada</i>)
EVC		29 800		camions moyens, pour le Québec
MoHT (1996)	1243	40 000	32	Hypothèses
HERS-ST (v.4.0)	1600	38 464	24	Hypothèses
Gonthier (2006)		32 000		Estimation à partir des ventes de carburant pour les camions 4 essieux
Deloitte (2004)	1238	40 000	32	Sondage auprès de l'industrie

Semi-remorques

La source des données utilisées pour évaluer le nombre annuel d'heures de conduite pour les camions semi-remorques sont essentiellement les mêmes que dans le cas des camions porteurs sauf en ce qui concerne le sondage réalisé en 2000 pour le compte du MTQ (Léger, 2000). Cette source est intéressante du fait du niveau de détail fournis relativement aux questions posées aux répondants du sondage. Les valeurs d'utilisation des véhicules qui en ressortent mettent en relief leur possible sous-estimation par d'autres études. Le Tableau 13.11 résume les données d'utilisation amassées. La valeur adoptée pour toutes les classes de semi-remorques et les trains routiers est de 2 100 heures de conduite par année. Cette valeur est validée par l'utilisation des données de kilométrage annuel et de la vitesse de fonctionnement des camions sur le réseau du MTQ déduite par Babin (2006b).

⁵⁴ Les valeurs en italique sont des valeurs hypothétiques.

Tableau 13.11
Utilisation des semi-remorques

Semi-remorques				
Étude	Heures/an.	km/an.	Vitesse moy.	commentaires ⁵⁵
Babin (2006)	<i>2 051</i>	<i>160 000</i>	<i>78</i>	Vitesse moyenne des camions
TOC (2003)		160 000		Hypothèse
EVC		133 000		Valeur pour le Canada
MoHT (1996)	3 063	160 000	<i>52</i>	Hypothèses
HERS-ST (4.0)	2 200	106 736	<i>49</i>	Hypothèses
Leger (2000)	2 289	173 000	<i>76</i>	Sondage, conducteurs de tracteurs (Québec)
Leger (2000)	2 500	195 000	<i>78</i>	<i>Idem</i> , mais transport longue distance seulement.
Gonthier (2006)		103 000		Estimation selon consommation de carburant.

13.7.2.4 Proportion du temps d'utilisation du véhicule

Ce paramètre a été relevé pour des fins de validation des valeurs de la distance parcourue et du nombre d'heures d'utilisation ainsi que dans le cas du calcul détaillé des coûts en dépréciation. Pour le cas des semi-remorques, les résultats des sondages effectués dans le cadre de l'étude MTQ (2000) permettent de déduire un ratio de 84% du temps de travail réservés à la conduite⁵⁶; les 16% restant étant consacrés à l'attente, au chargement et au déchargement. Ces résultats laissent transparaître une plus grande productivité au niveau du temps de conduite comparativement à la valeur de 75% proposée pour la Colombie-Britannique dans MoHT (1996).

Dans le cas des camions porteurs, le ratio de 65% est présenté dans MoHT (1996) considéré comme étant représentatif de la situation du camionnage en raison du manque de sources d'informations valables sur le sujet.

⁵⁵ Les valeurs en italique sont des valeurs hypothétiques.

⁵⁶ Les heures consacrées à l'entretien et aux repas ne sont pas incluses dans le calcul.

CHAPITRE 14

COÛTS UNITAIRES

14.1 Coûts unitaires de nature économique

Le jeu de paramètres des coûts unitaires élaboré en vue de l'exploitation des systèmes de gestion tient compte des valeurs économiques seulement. Toutes les taxes et autres frais de nature similaire ont été déduits des valeurs identifiées.

Les sections qui suivent présentes plus en détail les recherches effectuées et la méthodologie adoptée pour l'allocation de chacun des coûts liés à la propriété et au fonctionnement des véhicules au Québec. Les valeurs relatives au temps d'utilisation sont présentées au Chapitre 15 tandis que celles qui concernent les émissions polluantes sont incluses au Chapitre 16.

14.2 Unités de mesure, facteurs de conversion et indicateurs économiques

Dans le cadre de la présente recherche, différentes valeurs ont dû être converties ou actualisées afin de pouvoir les utiliser ou les comparer entre-elles. Le système HERS-ST ainsi que certaines études identifiées provenant des États-Unis utilisent un système de mesure différent de celui officiellement utilisé au Canada. Aussi, l'actualisation de certaines valeurs identifiées a nécessité l'emploi des indices économiques transmis par Statistique Canada, le «*Bureau of Labour Statistics*» (BLS) et la Banque du Canada. Les facteurs de conversion de devises ont été obtenus depuis le site Internet du dernier organisme. Les facteurs et les indicateurs énumérés sont présentés dans Roy et *al.* (2007a).

14.3 Carburant

Les frais reliés à la consommation de carburant sont une composante importante des coûts d'exploitation des véhicules. Selon certaines études dont celle de Transports Canada (TC, 2003), ces frais peuvent représenter plus de 20% des coûts totaux d'exploitation de certains véhicules lourds.

14.3.1 Coût économique du carburant

La détermination du coût économique des carburants nécessite le retranchement des différentes taxes en vigueur au Québec. Pour l'année 2006, les différentes taxes sur le carburant ainsi que leur amplitude étaient les suivantes :

- la **Taxe d'accise du gouvernement fédéral**, 10 cents le litre sur l'essence et 4 cents le litre sur le diesel;
- la **Taxe générale du gouvernement du Québec**, 15,2 cents le litre sur l'essence et 16,2 cents le litre sur le diesel. Cette taxe est réduite dans un rayon de 20 kilomètres des frontières provinciales et états-uniennes. Elle est également réduite dans les régions dites «spécifiques» et «périphériques» afin de réajuster le prix du carburant qui est généralement plus élevé dans ces régions;
- la **Taxe pour le financement de l'Agence Métropolitaine de Transport (AMT)**, 1,5 cents le litre dans la région métropolitaine de Montréal;
- la **Taxe sur les Produits et Service (TPS)**, 6% prélevée sur le prix au détail après les taxes dont la valeur est fixe. La TPS a été réduite de 7% à 6% le 1^{er} juillet 2006;
- la **Taxe sur la Valeur du Québec (TVQ)**, 7,5% prélevée sur le prix de détail après TPS.

Étant donné que la taxe générale du Québec est variable selon la région et que la taxe de l'AMT n'est présente que dans la région de Montréal, il serait préférable de définir une taxe provinciale composite moyenne, c'est-à-dire incluant ces deux taxes, sur la base des quantités de carburant consommées dans les différentes régions. À défaut de détenir cette information du gouvernement québécois, une valeur intérimaire de 15,8 cents le litre pourra être utilisée pour l'essence. Cette valeur a été calculée par la Direction des analyses

économiques de Transports Canada dans le cadre du projet de l'Examen de la totalité des coûts en transports au Canada. Aucune valeur moyenne n'a été identifiée pour le carburant diesel.

Dans un autre ordre d'idée, une estimation de la valeur moyenne des rabais et des subventions s'appliquant aux transporteurs commerciaux n'a pas pu être effectuée. Par conséquent, cette réalité n'est pas reflétée par les valeurs proposées dans cette section.

Le Tableau 14.1 présente un exemple de calcul du coût économique de l'essence et du diesel pour les villes de Québec et Montréal. Les prix moyens à la pompe indiqués ont été obtenus de Statistique Canada et sont ceux des stations libre-service pour une période d'une année à partir de juin 2005.

Tableau 14.1

Exemple de calcul du coût économique des carburants

	Taxes et prix en cents			
	Québec		Montréal	
	Diesel	Essence	Diesel	Essence
Prix à la pompe	103.2	103.6	102.1	101.8
Taxe AMT	0.0	0.0	1.5	1.5
Taxe d'accise	4.0	10.0	4.0	10.0
Taxe générale	16.2	15.2	16.2	15.2
TPS (6%)	7.4	7.7	7.4	7.7
TVQ (7.5%)	9.8	10.2	9.8	10.2
Total TAXES	37.4	43.2	39.0	44.6
Coûts économique	65.8	60.4	63.1	57.2

14.3.2 Évolution du coût du carburant

Les prix moyen de chaque carburant a été compilé à partir des données fournies par Statistique Canada pour les villes de Québec et Montréal. Ces prix à la pompe représentent des moyennes mensuelles pour les stations libre-service.

La Figure 14.1 illustre l'évolution des prix à la pompe de l'essence sans plomb ordinaire et du diesel pour les villes de Québec et Montréal de janvier 2000 à mai 2006.

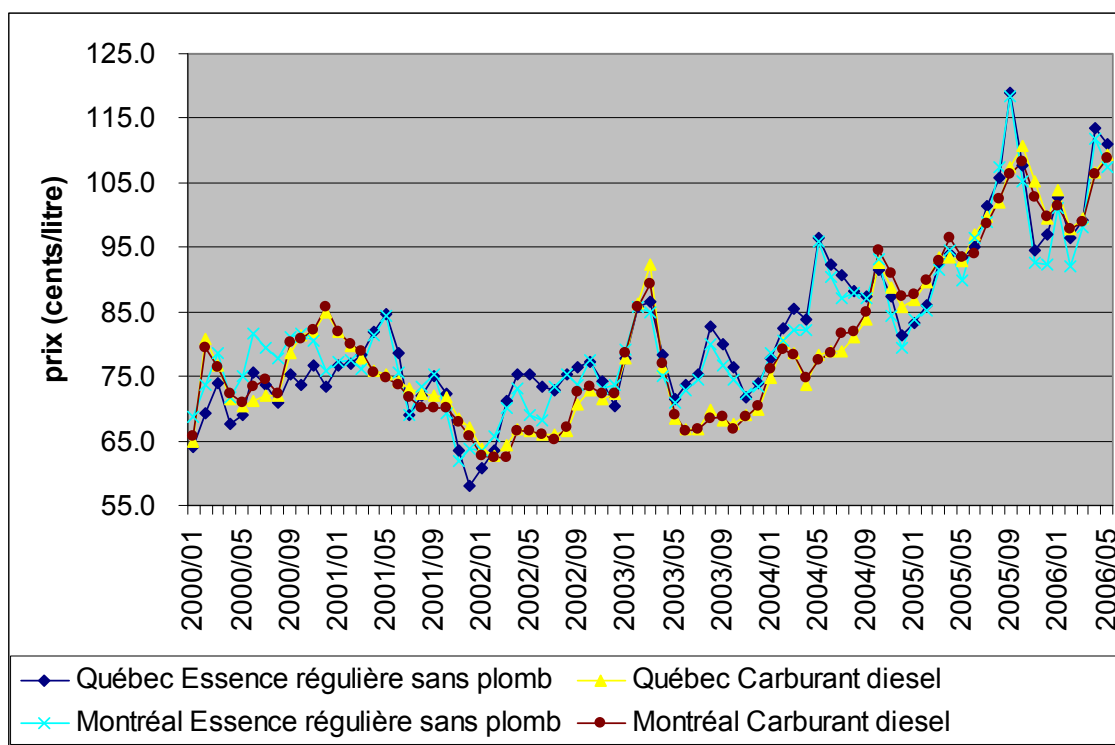


Figure 14.1 Graphique de l'évolution des prix à la pompe.
Tiré de Statistique Canada (2006)

Les prix moyens à la pompe tels qu'illustrés dans la Figure 14.1 sont présentés dans Roy (2007a).

14.3.2.1 Valeurs proposées

Le Tableau 14.2 présente les prix moyens des carburants calculés selon différentes périodes rétroactives au mois de mai 2006.

Tableau 14.2

Moyennes calculées du coût des carburants

Ville	Type de carburant	6 MOIS	1 ANS	2 ANS	5 ANS
Québec	Essence régulière sans plomb	103.3	103.6	96.3	83.7
Québec	Carburant diesel	102.8	103.2	95.2	81.0
Montréal	Essence régulière sans plomb	100.5	101.8	94.8	82.7
Montréal	Carburant diesel	102.1	102.1	95.2	80.8

(Moyennes calculées selon les données de Statistique Canada)

Les moyennes obtenues dans le tableau précédent suggèrent l'utilisation du coût moyen du carburant pour une période d'un an puisque, tel que le démontre la Figure 14.1, ce coût est très variable dans le temps et que, au moment de la livraison de l'étude octroyée par le MTQ, la situation mondiale au niveau de l'offre et la demande en énergie fossile laissait présager de nouvelles hausses.

En résumé des discussions présentées précédemment, les valeurs économiques proposées sont de **57,4** cents par litre pour l'essence et de **63,1** cents par litre pour le carburant diesel. Elles sont dérivées du prix moyen à la pompe des villes de Québec et Montréal sur une période d'une année à partir de juin 2005.

14.3.3 Taxes sur le carburant

La quantification des taxes sur l'essence pour l'ensemble du Québec est basée sur une valeur moyenne calculée par le Service de l'analyse économique de Transports Canada (TC, 2006). Dans le cas du carburant diesel, la moyenne des niveaux de taxation pour les villes de Québec et Montréal a été utilisée. Or, une fois les taxes de ventes ajoutées, les valeurs distinctives des taxes provinciales et fédérales pour les deux types de carburant ont été déterminées. Le Tableau 14.3 présente ces valeurs qui ont été calculées à partir des moyennes utilisées pour les coûts économiques du carburant. Ces valeurs sont utilisées par HERS-ST version 4.0 dans la méthodologie de prévision de la demande en transport et d'élasticité du prix des déplacements.

Tableau 14.3

Taxes sur le carburant (cents/litre)

Fédéral	Essence	Diesel	Québec	Essence	Diesel
Accise	10,0	4,0	Générale	15,8	16,8
TPS	9,0	8,7	TVQ	10,3	9,9
Total	19,0	12,7	Total	26,1	26,7

La valeur de la TPS a été ajustée à la baisse en 2007. Par conséquent, les facteurs de pondération pour les taxes de ventes tels que requis par le HERS-ST ont été ajustés en fonction des prévisions faites par le gouvernement fédéral. Les valeurs proposées se traduisent par une baisse relative des taxes estimée à 2,9% pour l'essence et à 3,1% pour le carburant diesel. Les facteurs proposés sont inclus dans le Tableau 14.4.

Tableau 14.4

Facteurs de pondération sur les taxes sur le carburant

Facteurs - taxes	Véhicules légers			Camions porteurs		Semi-remorques	
	compacte	int./grande	camionnette	6-roues	3 essieux	3-4 essieux	5 essieux
Période 1	100	100	100	100	100	100	100
Période 2	97	97	97	97	97	97	97
Période 3	97	97	97	97	97	97	97
Période 4	97	97	97	97	97	97	97

Bien que la possibilité d'autres baisses de taxes ait été abordée, la présente étude ne tient compte que de celle de 2007. De plus, la possibilité que le prélèvement aux pétrolières par le Gouvernement du Québec d'un montant de 1,5 cents par litre de carburant se convertisse par une augmentation du prix à la pompe ne justifie pas un ajustement des facteurs de pondération du niveau de taxation du litre de carburant.

Dans le contexte actuel, il n'est aucunement pertinent de prendre en considération ce prélèvement dans la quantification des taxes et l'ajustement du coût financier du carburant.

14.4 Lubrifiant

Le coût du lubrifiant a été établi par des sondages téléphoniques effectués auprès de détaillants de produits automobiles et de garagistes des véhicules légers et lourds. Une distinction a été faite en fonction du type de carburant du moteur, soit huile pour moteurs à essence et diesel. Dans le cas des moteurs fonctionnant au diesel, le coût du litre de lubrifiant a également été obtenu lors des sondages réalisés auprès d'exploitants de flotte de véhicules lourds puisque, pour des camions lourds, une grande partie de l'entretien se fait par l'exploitant.

Il est à noter que, dans le cas de HERS-ST, le coût unitaire du lubrifiant inclut celui de la main d'œuvre tandis que, dans le cas du HDM-4, seul le coût du litre de lubrifiant est considéré.

Les coûts déterminés lors des sondages sont les suivants :

- 5,00 dollars par litre pour le lubrifiant seulement (véhicule légers, HDM-4);
- 5,50 dollars par litre main d'œuvre incluse (véhicules légers, HERS-ST);
- 2,50 dollars par litre pour le lubrifiant seulement (camions lourds, HDM-4);
- 3,00 dollars par litre main d'œuvre incluse (camions lourds, HERS-ST).

14.5 Entretien et réparations

En ce qui a trait aux coûts reliés à l'entretien et aux réparations des véhicules, les deux systèmes étudiés présentent des philosophies de modélisation dissemblables. Par conséquent, la nature des paramètres de coûts recherchés est distincte selon chaque système. Le HDM-4 nécessite la détermination d'un taux horaire de la main d'œuvre d'entretien tandis que le HERS-ST s'opère sur la base d'un coût de base en entretien et réparations par mille milles parcourus.

14.5.1 Coût horaire de la main d'œuvre d'entretien

Le paramètre du taux horaire de la main d'œuvre d'entretien est nécessaire pour le calcul des coûts de fonctionnement des véhicules du HDM-4. Ce taux varie en fonction du type d'atelier de réparation (i.e. concessionnaire, atelier indépendant, atelier interne de l'exploitant), du type de mécanique (i.e. essence ou diesel) et de la région. Par déduction, on peut affirmer que le taux horaire pour les véhicules lourds est différent, c'est-à-dire plus élevé, que pour le cas des véhicules légers.

Afin d'identifier une valeur moyenne de tarif horaire de la main d'œuvre d'entretien pour les véhicules légers, un sondage a été effectué par téléphone auprès de différents types d'ateliers de réparations dans deux régions du Québec. Les coûts horaires de plus d'une vingtaine d'ateliers ont été relevés permettant d'obtenir une moyenne de 58,80\$ de l'heure. Une valeur moyenne de 60 \$ de l'heure a été adoptée pour les fins du paramétrage.

Dans le cas des véhicules lourds, les sondages effectués auprès des propriétaires de camions ont été combinés à ceux effectués auprès d'ateliers de réparations. Une problématique du relevé des coûts horaires de la main d'œuvre auprès des exploitants de flotte est que la valeur fournie peut omettre d'inclure les coûts reliés à l'équipement, aux bâtiments et à l'administration directement reliés aux opérations d'entretien et de réparations des véhicules. Ainsi, ces valeurs peuvent être sous-estimées. Ainsi, une valeur moyenne de 70 \$ de l'heure a été déduite à partir d'une plage de valeurs variant de 60 à 96 dollars de l'heure.

14.5.2 Coût moyen par 1000 véhicule-milles parcourus

La détermination d'un coût de base en entretien et réparations est nécessaire en vue du paramétrage du HERS-ST. L'identification de valeurs moyennes par 1000 véhicule-milles parcourus (VMP) pour chacun des sept types de véhicules du système mentionné constitue une des valeurs les plus difficiles à déterminer dans le cadre de la recherche. Une étude d'envergure sur ce type de coûts qui serait réalisée auprès de l'industrie du transport routier pourrait permettre l'étalonnage des modèles de coûts en entretien et en réparations. À cet effet, des sondages ont été effectués auprès de certains exploitants mais il peut s'avérer difficile d'assurer la représentativité de l'industrie dans son ensemble. Certaines valeurs relevées proviennent de sources d'informations différentes, telles que présentées ci-dessous.

Certaines associations de l'industrie de l'automobile et du camionnage, certaines revues spécialisées ainsi que d'autres organismes ont été rejoints afin de déterminer les valeurs moyennes des coûts d'entretien et des réparations pour différents types de véhicules. Aucune des organisations contactées ne peuvent fournir des valeurs à cet égard.

Les coûts inclus au système HERS-ST tels que présentés dans le premier rapport sont tirés d'une étude réalisée au États-Unis. Bien que la démarche puisse conduire à certaines imprécisions, ces coûts de base ont été actualisés et convertis en dollars canadiens de 2006 pour des fins de comparaison.

Les données compilées par Statistique Canada pour les véhicules légers sont très agrégées et ne permettent aucune distinction au niveau du type ou de l'âge du véhicule. Un coût de 545 \$ (CAD en 2000) par véhicule pour une année a été calculé par la direction des Analyses économiques de Transports Canada dans le cadre du projet de l'Examen de la totalité des coûts en transports au Canada. Dans le cadre de cette étude, un rapport récemment publié sur les coûts de fonctionnement des véhicules légers (Barton, 2006) se base sur les données précédemment décrites. Pour produire ces coûts, un outil utilisant des modèles similaires à ceux du HDM-4 a été utilisé mais peu de détails concernant l'étalonnage des modèles de consommation des pièces et de la main d'œuvre ont été

fournis. Aussi, le ratio du coût en pièces et de la main d'œuvre ne semble pas comparable à la situation prévalant au Québec.

Le rapport sur les coûts de fonctionnement des camions lourds (TC, 2004) fournit des coûts pour certains types de camions selon différentes configurations. Les coûts inclus dans le rapport ne représentent pas l'ensemble des types d'utilisations des camions au Canada mais fournis un ordre de grandeur des différents coûts dont ceux liés à l'entretien et aux réparations.

Le rapport annuel sur les coûts d'utilisation des véhicules de la CAA de 2005 (CAA, 2005) indique des coûts en entretien et en réparations, par tranche de 100 véhicule-kilomètres, de 24,80\$ et 28,70\$ pour une Chevrolet Cavalier et une Plymouth Voyageur. Tout indique que la méthodologie employée par la CAA sous estime ces coûts pour l'ensemble de la flotte compte tenu de l'âge relativement peu élevé des véhicules soumis à cet examen.

Le modèle *Transdec* utilisé par Transports Canada dans le cadre d'analyses avantages-coûts inclus certaines valeurs de coûts de l'entretien et des réparations des véhicules légers, des camions lourds et des autobus. Ces valeurs, rapportées dans un récent rapport produit pour le SMST (ADEC, 2006), sont présentées dans le Tableau 14.5.

La firme Desrosiers (Desrosiers, 2003) fourni également certaines valeurs en entretien et réparations pour les automobiles et les camionnettes légères. Ces valeurs sont basées sur celles publiées par la CAA mais elles sont désagrégées en fonction de l'âge du véhicule.

L'étude conjointe de l'Association Nationale des Camionneurs Artisans Inc. (ANCAI) et du MTQ (Deloitte, 2004) propose des valeurs des coûts d'entretien annuels pour les camions affectés au transport en vrac. Les configurations de véhicules présentées sont les camions porteurs 2 et 4 essieux ainsi que les tracteurs avec remorque comportant 2 essieux.

D'autres études, dont les coûts ont été actualisés et convertis, ont été identifiés au Canada et aux États-Unis. Il s'agit des résultats des sondages réalisés dans le cadre d'une étude de la Colombie-Britannique (MoHT, 1996), d'un rapport de la FHWA⁵⁷ (FHWA, 1997) et de l'Association américaine des automobilistes.

Le Tableau 14.5 expose les coûts en entretien et en réparations, exprimés en dollars par 1000 véhicule-kilomètres, pour différentes catégories de véhicules. À partir de l'indice des prix à la consommation⁵⁸, ces coûts ont été convertis en dollars canadiens de 2006 à des fins de comparaison. L'origine et l'année de réalisation de ces études sont également présentées.

⁵⁷ Selon les valeurs d'un rapport de *Jack Faucet* rapportée sur le site de l'institut «*Victoria Transport Policy Institute*» (www.vtpi.com).

⁵⁸ IPC Entretien, réparations et pièces automobiles (Statistiques Canada).

Tableau 14.5

Sommaire des coûts en entretien et en réparations (2006 CAD).

Étude		HERS-ST	CAA	BC-VOC	TOC in Canada	AAA
Type de véhicule		É.-U. 1997	Canada 2005	C.-Britannique 1992	Québec 2003	É.-U. 2001
auto	compacte	\$ 92.40	\$ 41.02	\$ 187.17	-	-
	intermédiaire	\$ 112.18	-	-	-	\$ 67.23
	grand format	\$ 112.18	-	\$ 291.40	-	\$ 70.68
camions légers	fourgonnette	\$ 142.61	\$ 47.47	\$ 114.87	-	\$ 67.23
	camionnette	\$ 142.61	-	\$ 210.24	-	-
	VUS	\$ 142.61	-	-	-	\$ 70.68
camions porteurs	2 essieux	\$ 266.88	-	-	\$ 259.07	-
	3 essieux	\$ 377.41	-	-	-	-
	4 essieux	\$ 377.41	-	-	-	-
semi-remorques	4-5 essieux	\$ 390.93	-	-	\$ 298.15	-
	6 essieux et +	-	-	-	\$ 366.81	-
	7 essieux et +	-	-	-	-	-
Train		-	-	-	\$ 384.29	-
Étude		Jack Faucett	Desrosiers	TransDEC	Deloitte	Moyenne arithmétique
Type de véhicule		É.-U. 1992	Canada 2003	Canada 1997	Québec 2004	
auto	compacte	\$ 93.38	\$ 89.01	\$ 125.92	-	\$ 104.82
	intermédiaire	\$ 98.77	\$ 89.01	\$ 125.92	-	\$ 98.62
	grand format	-	\$ 89.01	\$ 125.92	-	\$ 137.84
camions légers	fourgonnette	\$ 98.77	\$ 106.81	\$ 125.92	-	\$ 100.53
	camionnette	\$ 100.56	\$ 106.81	\$ 125.92	-	\$ 137.23
	VUS	-	\$ 106.81	\$ 125.92	-	\$ 111.51
camions porteurs	2 essieux	-	-	\$ 393.37	-	\$ 306.44
	3 essieux	-	-	\$ 393.37	\$ 313.87	\$ 361.55
	4 essieux	-	-	\$ 393.37	\$ 376.56	\$ 382.45
semi-remorques	4-5 essieux	-	-	\$ 393.37	\$ 384.65	\$ 366.77
	6 essieux et +	-	-	\$ 393.37	-	\$ 380.09
	7 essieux et +	-	-	\$ 393.37	-	\$ 393.37
Train		-	-	\$ 393.37	-	\$ 388.83

Suivant une analyse des différentes informations relevées, les valeurs préconisées en vue du paramétrage du HERS-ST sont 1) celles présentées par Desrosiers (2003) dans le cas des véhicules légers, 2) celles de l'étude «*Truck Operating Costs in Canada*» (TC, 2003) et de l'étude conjointe (Deloitte, 2004) pour les camions porteurs ainsi que 3) celles de TC (2003) et de «*Transdec*» en ce qui concerne les semi-remorques.

14.6 Pneus

Les coûts moyens des pneus pour les véhicules légers ont été déterminés à partir de sondages menés auprès de détaillants ainsi que sur la base d'une liste des prix de détails fournie par un fabricant de pneus. Plus d'une cinquantaine de typologies ont été identifiées et un prix moyen de détail a été calculé pour chacune d'entre elles. Les coûts ont été imputés à chacune des catégories de véhicules sur la base des typologies de dimensions des pneus d'origine fournis par les constructeurs. Des moyennes pondérées en fonction de la distribution des différentes typologies pour chaque catégorie de véhicules ont ainsi été réalisées.

Dans le cas des véhicules lourds, les dimensions des pneus ont été déduites des données fournies par les constructeurs. Les coûts des pneus ont été obtenus à partir des listes de prix au détail fournies par deux fabricants. Un montant de 10% du prix de détail a été retranché afin de représenter les rabais offerts à l'industrie par les fabricants.

14.7 Valeur à neuf des véhicules

La valeur de remplacement des véhicules constitue un paramètre de première importance dans le calcul des coûts d'exploitation des véhicules; principalement en ce qui a trait aux coûts de propriété.

Dans le cas des véhicules légers, la valeur à neuf a été établie à partir des modèles les plus représentatifs pour chaque catégorie de véhicules sur la base des PDSF⁵⁹ des versions de base pour les modèles de l'année 2003. Dans le cas des véhicules les plus grand, le champ du nombre de cylindres de la base de donnée de la SAAQ a été utilisé afin de déterminer le moteur le plus répandu pour chaque modèle de véhicule. Ainsi, les PDSF des versions équipées des moteurs identifiés de cette façon ont été sélectionnés.

⁵⁹ PDSF : prix de détail suggéré par le fabricant.

Dans le but de déterminer si le PDSF constitue une bonne valeur pour exprimer le coût économique assumé par les propriétaires de véhicules, une revue des sources d'information relatives au sujet a été accomplie. Selon Desrosiers (2002a), la valeur moyenne des transactions (toute taxe incluse) des véhicules au Canada serait de l'ordre de 20% à 25% plus élevée que le PDSF. Desrosiers (2002a) ajoute que, pour le Canada, la taxation⁶⁰ moyenne varie de 16% à 19% de la valeur avant taxes. Ces valeurs ont été déterminées pour les PDSF des versions sans option des modèles en vente au Canada. En assumant un taux de taxation de 19% pour le Québec, soit le taux maximum, ainsi qu'en considérant la médiane de la valeur moyenne supérieure au PDSF des transactions au Canada, soit 22,5%, on peut conclure que l'utilisation du PDSF est pertinente en vue du paramétrage des systèmes HERS-ST et HDM-4.

Malheureusement, des informations de même nature n'ont pas été identifiées dans le cas des camions lourds. Aussi, le nombre important de possibilités en ce qui a trait aux composantes équipant les camions lourds n'ont pas menées à la collecte des valeurs du PDSF en vue de caractériser les coûts unitaires. De plus, les prix des camions sont négociés en fonction de différents facteurs qui ne permettraient pas de définir les prix sur la base de cette valeur. La valeur à neuf pour les véhicules lourds a été déterminée selon les informations transmises par certains concessionnaires et ont été comparées à celles obtenues lors de sondages auprès d'exploitants ainsi qu'aux valeurs présentées dans certaines études (MoHT, 1996, MTQ, 2000, TC, 2003 et MTQ, 2006). Les valeurs transmises par les concessionnaires ont été généralement adoptées.

⁶⁰ Les taxes incluses sont celle relatives à la batterie, aux pneus, aux véhicules de luxe, à l'efficacité énergétique, à l'air climatisé ainsi que la TPS et les taxes provinciales.

14.8 Dépréciation

Les modèles de la dépréciation des véhicules utilisent la valeur de remplacement du véhicule (section 14.7) et la valeur résiduelle à la fin de la vie utile, ou économique, du véhicule pour le calcul des coûts qui en découlent.

14.8.1 Valeur résiduelle

Pour les fins de la modélisation à l'aide du HDM-4, les valeurs résiduelles minimale et maximale de tous les véhicules ont été fixées, respectivement, à 5% et 15% de la valeur de remplacement. Les sources d'information consultées à ce sujet n'ont pas mené à la détermination de valeurs cohérentes.

Dans le cas du HERS-ST, la valeur résiduelle utilisée pour le calcul de la dépréciation temporelle a été fixée à 15% conformément à la méthodologie originale.

14.8.2 Dépréciation liée au temps

Le paramétrage du HERS-ST implique la détermination d'un taux de dépréciation horaire dépendant. Ce taux correspond à la proportion de la dépréciation qui est liée au temps; soit le coût minimum de dépréciation. Afin de répondre à ce besoin, la méthodologie du HERS-ST a été suivie par l'attribution de valeurs de dépréciation liées au temps, exprimées en pourcentage de la valeur des véhicules, qui sont proportionnelles à celles présentées dans FHWA (2006). Les valeurs déduites sont incluses dans le tableau suivant :

Tableau 14.6

Valeurs horaires de la dépréciation liée au temps

Véhicules légers			Camions porteurs		Semi-remorques	
Compacte	int./grande	Camionnette	6-roues	3 essieux	3-4 essieux	5 essieux
1,03	2,03	1,92	5,84	11,82	9,95	10,98

14.9 Frais généraux

Les frais généraux sont des coûts fixes qui sont généralement indépendants de l'utilisation du véhicule. Ces coûts incluent principalement ceux reliés à l'immatriculation et aux régimes d'assurances publics et privés. Les frais généraux sont pris en compte par les modèles du HDM-4.

14.9.1 Frais d'immatriculation et du régime d'assurance collectif de la SAAQ

Les droits d'immatriculation et les frais reliés au régime d'assurance public du Québec sont perçus par la SAAQ. Les coûts qui ont été déterminés à partir des informations de la SAAQ et du rapport de Transports Canada (TC, 2004) sont les suivants :

- Pour les véhicules légers :
 - 255 \$ par année en région urbaine desservie par le transport en commun;
 - 225 \$ par année pour les autres régions urbaines et périurbaines;
 - 179 \$ par année pour les régions dites éloignées.
- Pour les camions lourds :
 - 594 \$ par année pour un camion de 2 essieux (3001kg à 4000kg);
 - 860 \$ par année pour un camion de 2 essieux (4001kg et plus);
 - 1 437 \$ par année pour camion de 3 essieux;
 - 2 001 \$ par année pour camion de 4 essieux;
 - 2 546 \$ par année pour camion de 5 essieux;
 - 3 345 \$ par année pour camion de 6 essieux et plus;
 - 67 \$ par année pour une remorque.

Une valeur moyenne de 240 \$ par année a été attribuée à tous les véhicules légers alors que les droits relatifs aux grosses cylindrées n'ont pas été considérés.

14.9.2 Frais d'assurance privée

Les coûts en assurance privée pour les véhicules légers ont été déterminés pour une cinquantaine de véhicules. Les coûts ont été obtenus pour un conducteur de sexe masculin âgé de 30 ans, sans points de démérite au dossier de conduite, avec une couverture de 1 000 000 \$ en responsabilité civile et un déductible de 500 \$ pour chaque réclamation. Une moyenne pondérée pour chaque catégorie de véhicule a été effectuée.

À défaut d'autres informations fiables, les coûts en assurance privée pour les camions lourds qui ont été retenus proviennent de l'étude des coûts de fonctionnement des camions au Canada (TC, 2004).

14.10 Taux d'intérêts

Les taux d'intérêts pour les véhicules légers, majoritairement à usage non commercial, et pour les véhicules lourds, à usage commercial, ont été déterminés sur la base de diverses sources d'informations présentées dans le tableau :

Tableau 14.7

Taux d'intérêt de différentes études

Étude	Année de référence	Véhicules légers	Véhicules lourds
MoTH (Col-Britannique)	1996	6.00%	8.00%
Transports Canada	2003	-	5.50%
CAA	2005	6.50%	-
Transports Canada	2006	5.77%	-
<i>Sondages</i>	2006	-	6% - 7%

La Figure 14.2 démontre l'évolution du taux d'intérêt de la Banque du Canada de 1996 à 2006.

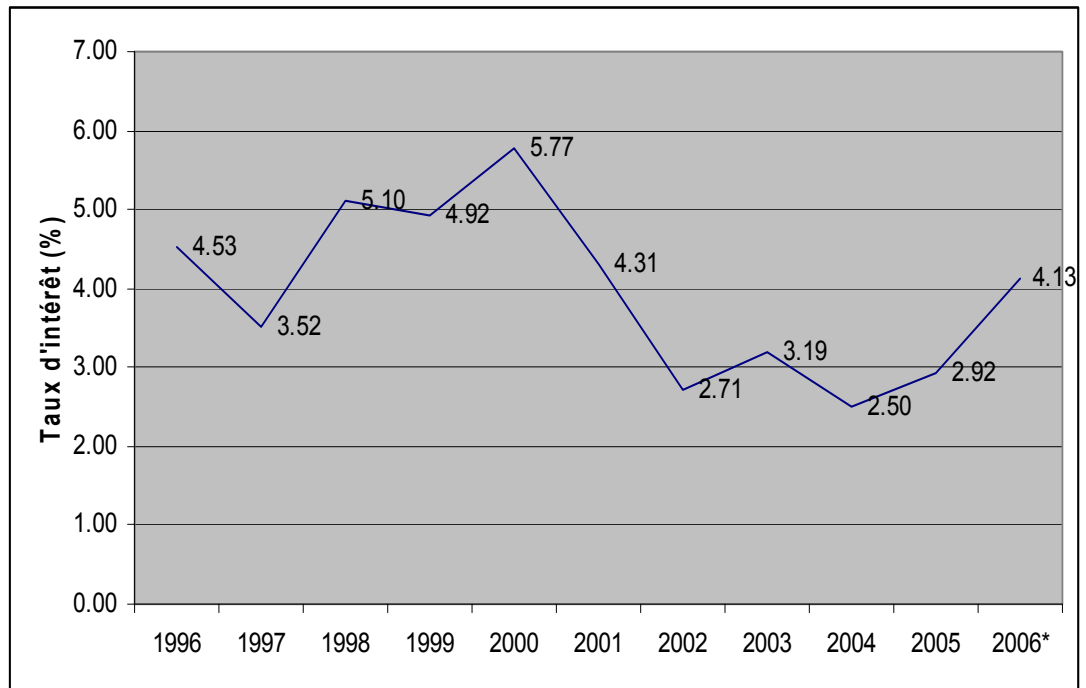


Figure 14.2 Graphique de l'évolution du taux d'intérêt au Canada (10 ans).

Comme le démontre la Figure 14.2, le taux d'intérêt moyenne des dix dernières années est de l'ordre de 4%. Bien que cette moyenne soit relativement peu élevée, un taux de 6% sera utilisé pour tous les véhicules lors des simulations avec le HDM-4. Ce taux est motivé par les valeurs présentées dans le Tableau 14.7 et les informations obtenues de l'industrie.

14.11 Sommaire des coûts unitaires

Les valeurs proposées pour le HERS-ST et le HDM-4 sont en dollars canadiens pour l'année 2005 et sont présentées dans les tableaux qui suivent.

Tableau 14.8

Paramètres de coûts unitaires pour le HERS-ST

Véhicule		Données économiques (CAD 2006)				
		Valeur à neuf véhicule (\$)	Coût du carburant (\$/gall.US)	Coût du lubrifiant (\$/pinte)	Coûts d'un pneu (\$)	Coûts entretien et réparations (\$/1000 VMP)
1	Automobiles compactes	17 200	2,170	6,247	120	89
2	Automobiles intermédiaires	26 600	2,170	6,247	126	89
3	Camionnettes (4 pneus)	23 200	2,170	6,247	135	107
4	Camions porteurs 2 essieux	75 000	2,170	6,247	300	259
5	Camions porteurs 3-4 essieux	125 000	2,385	3,408	520	314
6	Camion semi-remorques 3-4 ess.	135 000	2,385	3,408	540	367
7	Camion semi-remorques 5 ess. +	170 000	2,385	3,408	540	367

Tableau 14.9

Paramètres de coûts unitaires pour le HDM-4

Véhicule		Données économiques						
		Valeur à neuf véhicule (\$)	Coût du carburant (\$/ litre)	Coût du lubrifiant (\$/ litre)	Coûts d'un pneu (\$)	Coûts m. d'œuvre entretien (\$/heure)	Taux d'intérêt (%)	Frais généraux (\$)
1	Automobile compacte	17200	0.574	5.00	120	60	6.0	800
2	Automobile intermédiaire	26600	0.574	5.00	125	60	6.0	800
3	Automobile grand format	38700	0.574	5.00	130	60	6.0	900
4	Camionnette	23200	0.574	5.00	135	60	6.0	900
5	Fourgonnette	28900	0.574	5.00	135	60	6.0	1000
6	VUS	31100	0.574	5.00	135	60	6.0	1100
7	Camions porteur 2 esieux	70000	0.631	2.50	300	70	6.0	5000
8	Camions porteur 3 esieux	120000	0.631	2.50	520	70	6.0	7000
9	Camions porteur 4 esieux	150000	0.631	2.50	520	70	6.0	8000
10	Camion semi-remorque 5 ess.	165000	0.631	2.50	540	70	6.0	9500
11	Camion semi-remorque 6 ess.	170000	0.631	2.50	540	70	6.0	11000
12	Camion semi-remorque 7 ess.	175000	0.631	2.50	540	70	6.0	11000
13	Train routier	210000	0.631	2.50	540	70	6.0	12000

CHAPITRE 15

VALEUR DU TEMPS

15.1 Salaires des conducteurs

Les valeurs du temps de transport pour les camions proposés dans la documentation du ministère des Transports (MTQ, 2005a) incluent les salaires, les avantages sociaux, la perte de productivité liée à l'utilisation du véhicule et la valeur relative aux délais de livraison. Ces valeurs ont été définies afin d'être utilisées dans le cadre d'évaluations des avantages découlant d'une réduction du temps de transport. Dès lors, ces paramètres sont proposés en vue de leur utilisation au sein du HERS-ST. Le tableau ci-dessous présente les valeurs incluses dans MTQ (2004).

Tableau 15.1

Coûts du temps de transport associés au camionnage
(Tiré de MTQ, 2005a)

Type de camion	Salaire horaire	Facteur d'ajustement du salaire	Productivité du camion	Délai de livraison	Valaur horaire
Camions réguliers	\$ 17.41	1.52	\$ 0.60	\$ 0.50	\$ 27.56
Camions lourds	\$ 17.41	1.58	\$ 1.50	\$ 1.00	\$ 30.01

En suivant la méthodologie du Ministère, les valeurs pour le coût des conducteurs, avantages sociaux et autres frais à l'employeur inclus sont celles des camions réguliers (dans le cas des camions porteurs) ainsi que celles des camions lourds (dans le cas des semi-remorques).

À titre de comparaison, l'étude «*Truck Operating Costs in Canada*» (Bulk Plus, 2003) compile des salaires horaires pour les conducteurs allant de 15,81\$ à 16,83\$ pour le transport en vrac et variant de 17,39\$ à 18,51\$ pour le transport général de marchandises. Une autre étude réalisée pour le compte de l'Association québécoise du camionnage (ACQ,

2005) indique des salaires moyens pour un conducteur avec 5 années d'expérience de 37 197\$ par année pour le transport local et de 47 074\$ par année pour le transport longue distance. À titre comparatif, l'étude MTQ (2000) présente une moyenne salariale annuelle située entre 30 009\$ et 36 385\$ (1999).

15.2 Valeur du temps pour les conducteurs et les passagers

L'attribution d'une valeur horaire du temps de transport pour les conducteurs et les passagers est établie selon le motif du déplacement et le moyen choisi pour le déplacement. La documentation du Ministère (MTQ 2005a) concernant les analyses avantages coûts suggère différentes valeurs servant au calcul des gains potentiels en productivité pour la société, liés à la réduction du temps de transport. Ces valeurs sont présentées dans le Tableau 15.2.

Tableau 15.2
Valeurs du temps de déplacement
(Source : MTQ, 2005a)

Moyen et motif de transport		Valeur (2004) ¹ (\$)	Valeur (2006) ² (\$)
Déplacements en automobile			
	Affaires	23,78	24,85
	Navettage	18,94	19,79
	Études	5,95	6,22
	Autres	14,09	14,72
Déplacements par camion			
	Camion régulier	16,46	27,65
	Camion lourd	27,51	28,74

1. Valeurs tirées de MTQ (2005a).

2. Valeurs calculées selon les données de la Banque du Canada.

15.3 Taux d'occupation des véhicules

Par manque d'information pertinente, il n'a pas été jugé bon de modifier les valeurs relatives au taux d'occupation des camions du HERS. Par contre, la valeur moyenne déterminée à partir des données de l'Enquête sur les véhicules au Canada pour l'année 2000 sera utilisée

pour les véhicules légers. À titre de comparaison, le Tableau 15.3 présente les données recueillies par Statistiques Canada (EVC, 2000) et par la FHWA en ce qui concerne le taux d'occupation des véhicules légers en fonction de différents motifs de déplacements (NHTS, 2001).

Tableau 15.3

Taux d'occupation des véhicules légers
au Canada et aux États-Unis

	EVC 2000	NHTS 2001
lié à travail/école	1.30	1.22
Loisirs	1.92	1.87
Travail	1.20	1.14
Tous	1.69	1.63

15.4 Proportion des déplacements liés au travail

La proportion des déplacements liés au travail sert à calculer la valeur du temps en fonction du type de déplacement pour les différents véhicules représentatifs du HERS. À cet effet, les données de l'Enquête sur les véhicules au Canada (EVC) indiquent que les proportions des déplacements non liés au travail pour les camions moyens et les camions lourds sont respectivement de 27,1% et 6,3%. Ces valeurs semblent élevées et n'ont pas été directement utilisées. En effet, pour les camions porteurs de 3 essieux et plus et pour les semi-remorques les valeurs par défaut du HERS-ST sont proposées. Pour les camions de 2 essieux, une valeur intermédiaire de 15% pourrait être utilisée à titre d'hypothèse alors qu'elle représente la médiane entre la valeur utilisée par les camions et celle fournie par l'EVC.

En ce qui trait aux véhicules légers, plusieurs sources d'information ont été consultées. D'abord, le Tableau 15.4 présente une estimation de la moyenne des différentes proportions en ce qui a trait aux motifs de déplacements tels que présentés dans les enquêtes origine-destination effectuées dans les régions urbaines de Sherbrooke (2006), Québec (2001), Trois-Rivières (2003), Gatineau (2001) et Montréal (2001). Ces hypothèses de la distribution

des motifs de déplacement ont été jumelées aux différentes valeurs horaires du temps de transport, actualisées pour 2006, telles que proposées dans MTQ (2005).

Tableau 15.4

Répartitions des motifs de déplacements pour 5 régions urbaines du Québec

Motif	Affaires	Navettage	Études	Autres	Tous
Distribution (%)	18	42	10	32	100
Valeur du temps (\$)	24,85	19,79	6,22	14,72	17,92

Toutefois, ces valeurs ne peuvent être utilisées en vue de représenter les déplacements de véhicules en tout temps pour l'ensemble du réseau. En effet, il s'agit de données obtenues d'enquêtes qui ont été menées pendant les jours de semaines seulement en période de pointe du matin et de l'après-midi. Aussi, ces données sont valables pour l'ensemble du réseau routier des agglomérations plutôt que pour le réseau routier sous la juridiction du MTQ pour l'ensemble de la province. Finalement, les enquêtes ne couvrent pas les déplacements de nature commerciale (véhicules commerciaux).

Afin d'éviter une sous-estimation des déplacements en dehors des agglomérations et des périodes de pointe, les données compilées par Statistiques Canada dans le cadre de l'Enquête sur les véhicules au Canada (EVC, 2002) ont été relevées. Le Tableau 15.5 présente une compilation des données amassées par l'EVC en ce qui a trait aux motifs de déplacements et aux taux d'occupations relatifs. En regroupant des trois derniers motifs, il est possible de conclure à une proportion de 11,5% des déplacements qui sont reliés au motif «affaires» alors qu'en compilant les motifs qui ne sont pas liés au travail on obtient une valeur hypothétique de 66,8% de déplacements associés au motif «autres raisons».

À partir de ces hypothèses, un calcul similaire à celui présenté dans le cas des données compilées à partir des résultats des enquêtes menées dans cinq villes du Québec est présenté au Tableau 15.6.

Tableau 15.5

Nature des déplacements de véhicules au Canada (EVC, 2000)

Origine/ destination	Vehicule-km		Passager-km		Personnes/ véhicule
	(milliards)	Proportion (%)	(milliards)	Proportion (%)	
Travail/Ecole	61	21,7	76,9	16,2	1,26
Achats	73,1	26	126,8	26,7	1,73
Loisirs	54,9	19,5	111	23,4	2,02
Autres	59,8	21,3	120,6	25,4	2,02
Livraisons	11,3	4	13	2,7	1,15
Appels de services	9,1	3,2	10,9	2,3	1,19
Autres motifs professionnels	12,1	4,3	15,8	3,3	1,3
Total/moy.	281,4	100	475,1	100	1,69

Tableau 15.6

Répartition des motifs de déplacements au Canada

Motif	Affaires	Navettage	Autres	TOUS
Distribution (%)	11,5	21,7	66,8	100
Valeur du temps (\$)	24,85	19,79	14,72	16,99

Comme dernier indicateur, un rapport publié par l'Office de l'efficacité énergétique (OEE, 2000) estime à 8.7% les déplacements reliés au motif « affaires ». Cette valeur est inférieure aux autres données déjà présentées et ne peut être associée à une méthodologie statistique particulière.

Après analyse des données disponibles sur les motifs de déplacement, les valeurs tirées de l'EVC sont proposées en vue du paramétrage du HERS-ST. Ainsi, la valeur horaire du temps de déplacement est fixée à 17 \$ pour les véhicules légers.

15.5 Valeur du temps pour la marchandise

Comme cela est indiqué dans le Tableau 15.2, le MTQ préconise des valeurs, en dollars de 2004, de 0,60\$ de l'heure et de 1,50\$ de l'heure relativement à la productivité du camion et de 0,50\$ et 1,00\$ pour les délais de livraison. L'approche préconisée consiste à reproduire la méthodologie présentée par le HERS-ST en ce qui a trait à la valeur pour l'inventaire. Sommairement, cette méthodologie définit un coût horaire des intérêts sur la marchandise transportée par les véhicules. Les calculs nécessaires ont été fait à partir des valeurs moyennes de la marchandise définie suite à l'enquête O-D de 1998 (voir section 11.2). Les valeurs obtenues, actualisées pour 2006, sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 15.7

Estimation du coût de l'inventaire à partir des données de l'ERN 1998
(Adapté de Bérubé, 2006)

Configuration	# Essieux	Poids moyen de la marchandise (T.M.)	Valeur moyenne de la marchandise (\$CAN 2006)	Intérêts calculés (\$/heure)
1 unité	2	1,36	12 737	0,10
	3	2,69	9 643	0,08
	4	5,99	8 053	0,06
2 unités	5	8,57	59 815	0,48
	6	13,26	49 415	0,39
	7	17,28	46 269	0,37
3 unités	8	20,57	49 731	0,40

Les valeurs de 0,10\$ et de 0,48\$ par heure ont été retenues pour les camions porteurs et les semi-remorques.

CHAPITRE 16

MODÉLISATION DES IMPACTS DES ÉMISSIONS

Comme cela a été présenté au chapitre 8, il existe, au sein du MTQ, une version adaptée du «*Mobile Source Emission Factor Model*» (MOBILE) de l'agence pour la protection de l'environnement (EPA). Par conséquent, un certain nombre de données ont été fournies par le Service de la Modélisation et des Systèmes de Transport (SMST). Ces données ont été récupérées afin de permettre, moyennant certains ajustements détaillés dans ce chapitre, l'exploitation de HERS-ST dans un contexte québécois. .

Le Tableau 16.1 présente un sommaire des variables prises en considération lors de la modélisation des impacts environnementaux dus à l'utilisation des véhicules.

Tableau 16.1

Variables considérées dans la modélisation des émissions

Types de polluants (6) :	GES, CO, SO _x , HC-VOC, NO _x , PM _{2,5} et PM ₁₀ .
Types d'émissions (2) :	« en marche » et « pertes lors du fonctionnement ».
Types de routes (2) :	Autoroute et artère.
Types de milieu (2) :	Urbain et rural.
Types de véhicules (3) :	Véhicules légers, camions réguliers et camions lourds.

Les sections qui suivent présentent la description des données rendues disponibles par le SMST et de la procédure d'intégration préconisée dans le cadre de cette recherche. En complément d'informations, le lecteur pourra se référer aux rapports d'étapes déjà soumis (Roy et *al.*, 2006 et Roy et *al.*, 2007a).

16.1 Utilisation des données par le HERS-ST, version 4.2

La modélisation des effets économiques des émissions polluantes par le HERS-ST passe par l'utilisation de tableaux de coûts, exprimés par véhicule-mille parcouru, en fonction de la vitesse de déplacement des véhicules. Celle-ci provient du calcul effectué par le modèle d'estimation de la vitesse effective des véhicules. Les séries de valeurs intégrées dans le

fichier de paramètres du logiciel incluent trois catégories de véhicules et une plage de vitesses variant de 5 à 70 milles par heure.

L'objectif particulier de cette partie de la recherche vise à définir des tableaux de données similaires à ceux inclus par défaut dans le HERS-ST. Ces données sont fournies en fonction des différentes classes fonctionnelles et du milieu de la route, c'est-à-dire urbain ou rural. Les tableaux doivent permettre d'effectuer des prévisions sur une période de 20 ans pour chacune des sections de réseau du MTQ.

16.2 Données du MOTREM

Le Service de Modélisation et des Systèmes de Transports (SMST) intègre au **Modèle de transport urbain des personnes de la région de Montréal (MOTREM)** l'analyse de certains impacts environnementaux qui sont liés à l'utilisation des véhicules sur le réseau routier. Une évaluation des émissions polluantes et des GES est faite à partir de sous-modèles adaptés du MOBILE, version 6, qui est produit par l' EPA des États-Unis.

Le modèle MOBILE 6 QC fournit les quantités d'émissions en fonction de la vitesse de déplacement des véhicules, pour une fourchette de 21 vitesses allant de 5 à 105 km/h par intervalles de 5 km/h.

Les 32 types de véhicules⁶¹ sous-jacents au MOBILE ont été agrégés selon trois catégories pour être utilisées au MOTREM. Ainsi, les données transmises par le SMST sont structurées en fonction de trois catégories de véhicules :

- les véhicules légers;
- les camions réguliers (camions porteurs de moins de 4 essieux);
- les camions lourds (camions porteurs de 4 essieux et semi-remorques).

⁶¹ En définitive, le MOBILE 6 QC regroupe les classes originales de véhicules du MOBILE 6 selon 28 catégories.

Ces classes agrégées tiennent compte de la répartition des différents types de carburants utilisés et de l'âge des véhicules. La caractérisation de ces paramètres, pour chacune des classes, est basée sur le traitement des données de la SAAQ pour l'année 2003 effectué par le SMST.

Les simulations ont été effectuées pour représenter la période automnale selon cinq (5) périodes distinctes de la journée soit :

- la nuit (0h à 6h);
- la période de pointe du matin (6h à 9h);
- la période hors pointe de la journée (9h à 15h30);
- la période de pointe de l'après-midi (15h30 à 18h);
- la période hors pointe du soir (18h à 24h).

Aussi, les prédictions ont été produites selon quatre (4) horizons; soit pour les années 2006, 2011, 2016 et 2121. La modélisation tient compte de l'évolution de la flotte de véhicules, de la technologie et de la circulation.

À la section 8.3, les taux d'émissions ont été utilisés afin de produire des tableaux pouvant être utilisés pour les analyses à l'aide du HERS-ST exploité par le SOS.

16.3 Production des tableaux de coûts pour le HERS-ST

Seize (16) tableaux de coûts ont été produits afin de permettre l'intégration des taux d'émissions du MOTREM au HERS-ST v.4.2.

Dans un premier temps, une énumération relative aux différents paramètres sous-jacents à l'élaboration des tableaux est présentée en 13 points. Certaines limitations rencontrées et les hypothèses formulées sont également définies dans les paragraphes présentés à la page suivante.

- 1) Les taux d'émissions proviennent des fichiers *env2006.dat* et *env2021.dat* résultant des simulations des émissions de polluants et de gaz à effet de serre qui ont été réalisées par le SMST à l'aide du modèle MOBILE 6 QC-MORTEM version 3b (transmis par le SMST).
- 2) Les taux d'émissions sont ceux représentant la période de jour hors-pointe (9h à 15h30) pour la période d'automne dans la région de Montréal. Sur une base journalière, il s'agit d'une période caractérisée par un niveau de circulation intermédiaire entre les périodes de pointe du matin et de la fin de l'après-midi. Cette période a été retenue en raison de la nature de l'utilisation future du HERS-ST qui est différente des études avantages-coûts, principalement orientées vers l'aménagement de la capacité.
- 3) La distribution de l'âge des véhicules pour chacune des classes est relative au traitement des données des enregistrements de la SAAQ (année 2003) effectués par le SMST.
- 4) L'évolution du taux moyen de consommation de carburant pour la classe LDGV (voir chapitre 10) au Québec depuis 1975 qui est sous-jacente aux taux d'émissions modélisés, correspond à celle définie par le SMST (Babin, 2004, p.30, Figure 9).
- 5) Les résultats des analyses du MOBILE 6 ont permis de produire des tableaux distinctifs pour les quatre types de tronçons de route suivants : autoroute en milieu urbain, autoroute en milieu rural, artérielle en milieu urbain, et artérielle en milieu rural. Les résultats obtenus des simulations pour les tronçons de routes artérielles serviront à alimenter le modèle du HERS-ST qui est exploité par le SOS dans le cas des classes fonctionnelles nationale, régionale et collectrice.
- 6) Les résultats des quantités d'émissions calculées en fonction de la vitesse (5 à 105 km/h, par intervalles de 5 km/h) à l'aide du MOBILE 6 QC ont été converties, en milles par heure (mph), et interpolées afin de produire les tableaux à intégrer au HERS-ST v.4.2; soit pour des vitesses variant de 5 mph à 70 mph par intervalles de 1 mph.

- 7) Seuls les types d'émissions attribuables au fonctionnement des véhicules sont modélisés, soit « en marche » et « pertes lors du fonctionnement » (i.e. les types d'émissions produites « par évaporation » ou lors du « démarrage » ne sont pas considérées).
- 8) Seuls les polluants qui sont économiquement quantifiés par le *Guide de l'analyse avantages-coûts des projets en transport* (MTQ, 2005a) sont inclus dans les calculs. Il s'agit des gaz à effet de serre (*GES*), du monoxyde de carbone (*CO*), des hydrocarbures (*HC*), des oxydes d'azote (*NO_x*), des oxydes de soufre (*SO_x*) et des matières particulaires (*PM*). Ainsi, la liste des polluants modélisés est différente de celle intégrée par la FHWA au HERS-ST version 4.2. En identifiant des valeurs d'impacts économiques pour des polluants additionnels, il serait possible de tenir compte d'un nombre plus important de polluants suivant les taux modélisés par le MOBILE 6 QC-MOTREM. Ces différences sont comparées dans le Tableau 16.2.
- 9) Dans le cas des matières particulaires, les polluants des différents diamètres ont été regroupés (i.e. PM_{2,5} et PM₁₀); la même valeur économique a été attribuée dans les deux cas.
- 10) Dans le cas des hydrocarbures (*HC*), les émissions liées au fonctionnement du véhicule ainsi que celles découlant des « pertes en fonctionnement » sont regroupées.

Tableau 16.2
Types de polluants modélisés

Type de polluant ⁶²	HERS-ST (FHWA)	MOBILE6QC-MOTREM	HERS-ST ⁶³ (SOS)
Gaz à effet de serre (GES) ⁶⁴		X	X
Monoxyde de carbone (CO)	X	X	X
Dioxyde de carbone (CO ₂)		X	X
Oxyde d'azote (NO _x)	X	X	X
Oxyde de soufre (SO _x)	X	X	X
Ammoniac (NH ₃)		X	
Hydrocarbures (HC)		X	X
Composés organiques volatiles (COV)	X	X	X
Plomb (Pb)		X	
Matières particulaires (MP)	X	X	X
Poussières	X		
Benzène (BENZ)		X	
Méthyl tert-butyl-éther (MTBE)		X	
Formaldéhyde (FORM)		X	
Acétaldéhyde (ACETA)		X	
Acroléine (ACROL)		X	

11) La pondération géographique suggérée par la FHWA (FHWA, 2004) relativement aux impacts économiques des émissions en fonction du milieu est respectée (i.e. impacts plus importants en milieu urbain).

12) La catégorie « camions réguliers » inclut les camions porteurs avec une configuration de 3 essieux et moins. La catégorie « camions lourds » inclut les camions porteurs comportant 4 essieux et les semi-remorques. Bien que cette catégorisation ne respecte pas intégralement celle établie pour le HERS-ST, les taux

⁶² Seulement les polluants liés aux types d'émissions « en marche » (RUNNING) et « pertes lors du fonctionnement » (RUNLOSS) sont inclus dans ce tableau.

⁶³ Les types de polluants considérés sont ceux dont les effets sont quantifiés monétairement dans le Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport du MTQ.

⁶⁴ Le MOTREM effectue la compilation des taux de GES (i.e. CO₂, CH₄ et NO₂) en équivalents CO₂.

d'émissions des « camions réguliers » sont utilisés afin de représenter ceux de la catégorie des camions porteurs du HERS-ST. Il en va de même pour la catégorie des camions lourds du MOTREM et celle des semi-remorques intégrée au système exploité par le SOS. Par contre, les camions à quatre essieux ne constituant pas une grande proportion des véhicules circulant sur le réseau, cette problématique ne devrait pas mener à de grands écarts par rapport à la méthodologie optimale de modélisation. Cette problématique pourrait être réglée par l'obtention des taux d'émissions désagrégés du MOBILE 6 QC qui n'ont pas pu être obtenus dans le cadre de l'étude. L'établissement d'une correspondance entre les classes de véhicules du MOBILE 6 et HERS-ST, telle que discutée dans Roy et *al.* (2007a), devrait également être validée.

- 13) Les tableaux des valeurs quantifiant l'impact économique en fonction de la vitesse ont été produits pour les années 2006, 2012, 2016 et 2021. Ceux-ci assurent le paramétrage complet du HERS-ST rendu nécessaire en raison de la période d'analyse des investissements considérée par le système. Toutefois, contrairement aux versions précédentes du logiciel, un taux linéaire de décroissance des impacts environnementaux doit être utilisé dans la version 4 du HERS-ST

Dans un deuxième temps, les démarches successives effectuées en vue de construction des tableaux de coûts nécessaires au HERS-ST sont présentées par les six points suivants.

- 1) Compilation et conversion des différents taux d'émissions polluantes et de gaz à effet de serre obtenus du MOTREM selon la plage de vitesse requise par le HERS-ST;
- 2) Compilation et actualisation pour l'année 2006 des valeurs économiques des impacts des polluants présentés dans le *Guide de l'analyse avantages-coûts des projets en transport* (MTQ, 2005a);
- 3) Ajustement des impacts économiques des émissions en fonction du milieu, urbain et rural;

- 4) Définition des distributions des classes de véhicules pour chacune des trois catégories principales, en fonction du milieu et de la classe fonctionnelle de la route;
- 5) Calcul des coûts par véhicule-mille parcouru, pour chaque catégorie de véhicule et chaque type de route sur quatre horizons;
- 6) Calcul d'un taux de décroissance constant des impacts économiques des émissions pour la période allant de 2006 à 2021. Bien que cette approche n'épouse pas les valeurs intermédiaires des estimations du MOTREM, ce type de taux est imposé par la structure des fichiers de paramètres de la quatrième version du HERS-ST.

La Figure 16.1 illustre un parallèle entre les taux de décroissance linéaire et les estimations effectuées par le MOTREM pour les quatre horizons temporels. Les données sont présentées pour une vitesse des véhicules de 60 km/h sur une autoroute en milieu rural. Ces taux ont été retenus dans le cadre de cette étude

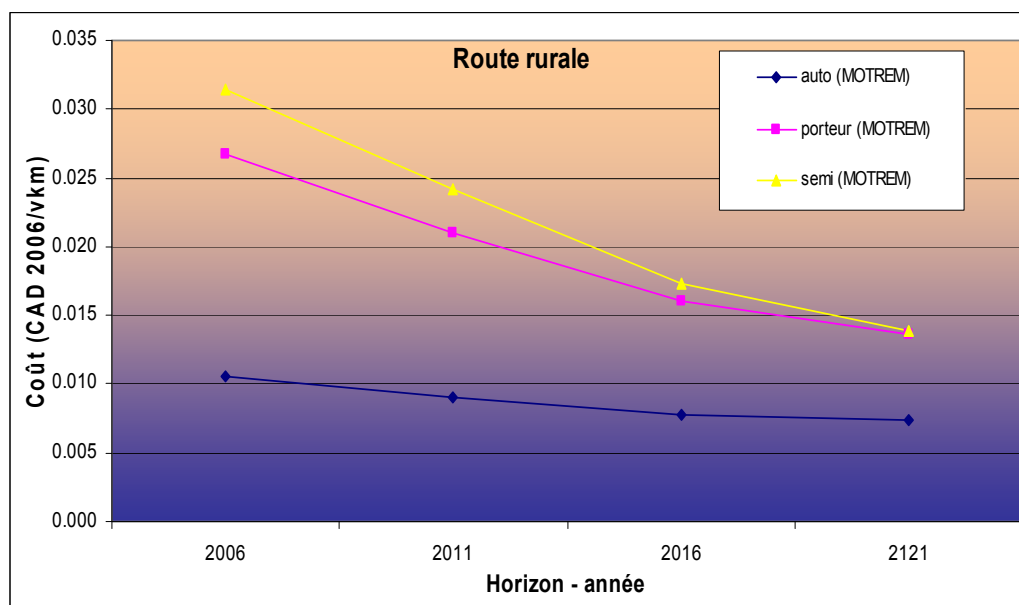


Figure 16.1 Évolution des valeurs économiques liées aux impacts environnementaux.

La forme finale des séries de données, telle qu'intégrée au HERS-ST, est présentée par le Tableau 16.3.

Tableau 16.3

Impacts économiques des émissions polluantes
selon la vitesse (Autoroute en milieu rural)

Vitesse (mille/h.)	Autoroute en milieu rural (\$%/vmp)		
	Véhicules légers	Camions porteurs	Semi- remorques
5	0,031336	0,059432	0,055131
6	0,024460	0,049362	0,047323
7	0,021309	0,044684	0,043697
8	0,019399	0,041803	0,041465
9	0,017490	0,038922	0,039233
10	0,016155	0,036752	0,037447
...
68	0,010937	0,030962	0,038390
69	0,011015	0,031492	0,039229
70	0,011093	0,032022	0,040068

16.4 Intégration au HERS-ST

Les fichiers de paramètres du HERS-ST v.4.2 nécessitent la définition, pour chacun des modèles, propre à chaque type de route, de la constante *EC* ainsi que des coefficients de régression *EFi* du modèle intégré au HERS-ST pour le calcul des impacts économiques des émissions.

L'équation du modèle, telle que présentée ci-dessous, est de forme polynomiale du sixième degré. Pour chacun des types de routes modélisées, trois séries de constantes et de coefficients ont été produites par une analyse de régression à partir des tableaux des coûts en fonction de la vitesse produits au préalable.

$$EmCost = EC + EF1 \cdot AES + EF2 \cdot AES^2 + EF3 \cdot AES^3 + EF4 \cdot AES^4 + EF5 \cdot AES^5 + EF6 \cdot AES^6$$

(16.1)

où :

- EmCost : impact économique (en CAD (2006) par mille parcouru);
- AES : vitesse effective moyenne par catégorie de véhicule (en milles par heure);
- EC, EF1...EF6 coefficients de régression.

À titre d'exemple, le Tableau 16.4 présente la série de coefficients, requise par le HERS-ST, servant à l'estimation des impacts environnementaux. Cette série qui a été produite pour une autoroute en milieu rural est représentative des valeurs économiques attribuables aux émissions modélisées pour l'année 2006. L'avant-dernière ligne du tableau indique le taux de décroissance annuel de la valeur des impacts économiques des émissions (r) pour la période d'analyse allant de 2006 à 2021 alors que la dernière ligne fournit les valeurs du carré du coefficient de corrélation (R^2) pour chacune des trois séries.

Tableau 16.4

Coefficients de régression pour l'estimation
des émissions polluantes (Autoroute en milieu rural)

AES (mille/h.)	Autoroute en milieu rural		
	Véhicules légers	Camions porteurs.	Semi- remorques.
EF6	1.84E-11	2.29E-11	1.55E-11
EF5	-4.61E-09	-5.81E-09	-3.98E-09
EF4	4.60E-07	5.87E-07	4.10E-07
EF3	-2.32E-05	-3.01E-05	-2.14E-05
EF2	6.28E-04	8.31E-04	6.01E-04
EF1	-8.70E-03	-1.20E-02	-8.98E-03
EC	5.96E-02	9.91E-02	8.50E-02
r	-2.26E-04	-8.42E-04	-1.04E-03
R^2	0.994	0.996	0.997

CHAPITRE 17

ÉTALONNAGE DES MODÈLES DU HDM-4

Ce chapitre porte sur l'étalonnage des modèles de prévision de la vitesse et des Coûts d'Exploitation des Véhicules (CEV) qui sont intégrés à la version 2.0 du HDM-4.

Précisons pour le lecteur que, dans le cadre de ce mémoire, une distinction est faite entre les termes paramétrage et étalonnage des modèles. Le paramétrage se limite à la compilation ainsi qu'à la sélection des valeurs représentatives des paramètres de modélisation primaires. L'étalonnage réfère à une série de simulations préliminaires et implique l'ajustement des variables de modélisation. La procédure d'étalonnage repose sur le paramétrage itératif des paramètres d'entrée afin de faire correspondre les résultats des simulations avec les données de référence obtenues lors de la revue documentaire.

Bien que ces données de référence n'aient pas été toujours complètes et même, dans certains cas, inexistantes, les efforts d'étalonnage n'ont pas été épargnés afin d'obtenir des modèles les plus réalistes, aisément défendables et justifiés. Dans la mesure du possible, l'étalonnage individualisé des modèles est réalisé conformément à une désagrégation maximale au niveau des classes prédéfinies de véhicules.

L'étalonnage des modèles est commenté en détail dans ce chapitre et cela de manière distinctive pour chacun des modèles énumérés ci-dessous :

- la vitesse en régime libre;
- la consommation de carburant;
- la consommation de lubrifiant;
- l'usure des pneus;
- la consommation de pièces détachées;
- la main d'œuvre affectée à l'entretien et aux réparations;
- la dépréciation,
- les intérêts,
- le temps de transport.

17.1 Problématiques particulières à l'étalonnage

Rappelons que le paramétrage des modèles du HDM-4 a été effectué selon une revue soutenue de la documentation puis validé par une collecte d'informations auprès d'intervenants des secteurs de l'industrie automobile et du transport routier.

Dans la plupart des cas, la méthodologie adoptée suit l'approche d'un véhicule représentatif « composite »; c'est-à-dire en déterminant les valeurs moyennes pondérées des différents paramètres physiques, mécaniques et économiques pour chacune des classes de véhicules, en fonction de la distribution relative des différents modèles.

Au niveau de la revue de l'information disponible, il s'avère difficile d'établir une correspondance entre les coûts publiés et les conditions moyennes représentatives de l'utilisation des véhicules. Évidemment, ces valeurs ne sont pas compilées en fonction des paramètres représentatifs des caractéristiques de la route (i.e. état, pentes, courbes) et de la conduite (i.e. cycles de changement de vitesses, niveau de circulation). Cette problématique est considérée dans le cadre des procédures d'étalonnage des modèles du HDM-4.

Les valeurs dites de référence qui ont été relevées dans les diverses études consultées ne peuvent, en aucun cas, être considérées comme absolument transposables ni comme précises. Cela tient, d'une part, aux différentes méthodologies adoptées et, d'autre part, à la taille des échantillons retenus lors des sondages ainsi qu'aux objectifs propres à chaque étude.

Dans certains cas, il s'avère difficile de porter un jugement éclairé sur la qualité des études publiées en raison du manque de données relativement aux variables considérées et/ou des objectifs possiblement biaisés par l'intérêt des auteurs de certaines études et des organisations qui les ont financées.

En dépit de ces limitations, plusieurs valeurs identifiées dans la littérature ont été utilisées, à tout le moins à titre indicatif, aux fins de l'étalonnage et de l'analyse des résultats obtenus.

17.2 Vitesse de déplacement

La prévision de la vitesse de déplacement en régime libre des différents véhicules fait l'objet d'une modélisation particulière par le HDM-4. Les résultats fournis par le modèle de prévision stochastique de la vitesse en régime libre (*Probabilistic Speed Prediction Model*) fournissent des valeurs représentatives des déplacements effectués en l'absence d'interactions entre les véhicules.

De façon générale, les facteurs qui influencent la vitesse de déplacement des véhicules sont les suivants :

- la largeur des voies;
- le dégagement latéral;
- le profil en travers;
- l'état du revêtement;
- l'adhérence;
- le profil vertical de la route;
- l'alignement horizontal;
- les accès à la route;
- les dispositifs de contrôle de la circulation;
- le niveau de sollicitation par la circulation.

Encore une fois, puisque la mission du Service des chaussées porte sur la conservation des chaussées, la modélisation de la vitesse effective des véhicules, qui prend en considération les impacts de la circulation et de la capacité de la route, n'est pas examinée dans la présente étude. Certains facteurs liés à la géométrie ne sont pas non plus intégrés aux procédures de modélisation.

Par conséquent, seuls 1) l'état du revêtement, et 2) la limite de vitesse seront considérés comme des variables indépendantes.

Les valeurs des paramètres liés à la largeur de voie et des accotements, au dégagement latéral ainsi qu'à l'adhérence sont fixées.

L'estimation de la vitesse en régime libre, exprimées en mètre par seconde, repose sur le modèle présenté par l'équation 17.1

$$FFS = \frac{\exp(\sigma^2 / 2)}{\left[VDRIVE^{-1/\beta} + VBRAKE^{-1/\beta} + VCURVE^{-1/\beta} + VROUGH^{-1/\beta} + VDESIRE^{-1/\beta} \right]^\beta} \quad (17.1)$$

Comme cela est présenté à la section 5.4.1 et dans Roy et *al.* (2006), cinq paramètres de base sont évalués préalablement à la modélisation définitive de la vitesse en régime libre.

Dans l'ordre, ces paramètres servent à définir des vitesses relativement aux contraintes liées à la puissance du moteur (*VDRIVE*), à la puissance de freinage (*VBRAKE*), à la présence de courbes (*VCURVE*), à l'état du revêtement (*VROUGH*) et au comportement du conducteur (*VDESIRE*).

Seuls les deux derniers paramètres ont un impact limitatif sur l'estimation de la vitesse. Les points suivants précisent cette affirmation :

- 1) Paramétré à partir des données sur la puissance moyenne des moteurs, le paramètre *VDRIVE* n'influence pas les résultats pour le type de géométrie de la route modélisée;
- 2) Pour des raisons similaires, les paramètres *VBRAKE* et *VCURVE* ne sont pas nécessaires;
- 3) Les coefficients entrant dans l'équation servant à l'estimation de *VROUGH* n'ont pu être étalonnés en raison de l'absence de données sur le sujet (Roy et *al.*, 2007a). Leur paramétrage nécessiterait une étude d'envergure;
- 4) Dans le cas du *VDESIRE*, le paramètre lié à la répression policière, soit le paramètre *ENFACT*, qui permet d'évaluer la vitesse préconisée par le conducteur moyen en réaction à la surveillance routière a été fixé à 15% au dessus de la vitesse prescrite, qui est la tolérance généralement observée par la surveillance policière au Québec.

La modélisation du paramètre *VDESIRE* est subordonnée à la limite de vitesse, à la réaction du conducteur face à la présence policière et au dégagement latéral. Comme l'indique Bennett et Greenwood (2003), ce paramètre est prédominant dans le cas d'une géométrie uniforme de la route. L'importance du paramètre *VDESIRE* est confirmée par les résultats obtenus lors des simulations. Pour un revêtement en mauvais état, c'est le paramètre *VROUGH* qui est déterminant dans la prévision de la vitesse.

Ces constatations concordent avec le modèle de prévision de la vitesse adaptée par l'administration suédoise, la SNRA, qui ne prend en considération que le *VDESIRE* et le *VROUGH* (VTI, 2003).

D'autre part, le paramètre β est un facteur probabiliste qui a comme fonction de normaliser la distribution de la vitesse en régime libre en fonction des cinq composantes déjà énumérées (Roy et al., 2007a). Plus la valeur de ce paramètre est basse, plus la vitesse prédite par le modèle en sera réduite. Puisqu'il n'a pas été possible d'établir un tel facteur pour le Québec, une revue des études pertinentes sur le sujet (MoHT, 1990, Cox, 1988, FHWA, 2000, VTI, 2003 et Bennett et Greenwood, 2003) a permis de proposer l'adoption de la valeur par défaut du HDM-4 dans le cas des véhicules légers et de sélectionner une valeur de 0,11 pour tous les camions. Il est à noter que le HERS-ST intègre une valeur de 0,10 pour toutes les classes de véhicules.

Le paramètre σ fournit une option additionnelle de caler le modèle. En fonction du type de données amassées dans le cadre de l'étalonnage, ce facteur peut être ajusté afin de corriger le biais relatif aux prévisions du modèle originalement développé à partir de données du Brésil. Dans le cas où les composantes de la vitesse (i.e. *VDESIRE*, *VROUGH*, etc.) sont étalonnées de manière distincte, la valeur de ce paramètre est fixée à 0. Tout comme ce qui a trait à la présente étude, les modèles utilisés par certaines administrations routières et paramétrés à partir de données amassées en Australie (Bennett et Greenwood, 2003), en Nouvelle-Zélande (Bennett, 2002), en Suède (VTI, 2003) et en Thaïlande (HTC, 1999) intègrent la même valeur.

17.3 Consommation de carburant

La méthodologie du modèle d'estimation de la consommation de carburant qui est intégrée dans le HDM-4 repose sur des notions mécanistes liées 1) aux forces de résistance au déplacement du véhicule (roulement, aérodynamisme, inertie, etc.), 2) à l'efficacité énergétique (transmission de l'énergie, utilisation des accessoires) ainsi 3) qu'aux caractéristiques mécaniques (rapports de la transmission et du groupe motopropulseur). Donc, l'influence de la géométrie et l'état de la route, la masse du véhicule, la puissance et les caractéristiques du moteur sont intégrés implicitement dans les estimations fournies par le modèle.

En raison de la nature mécaniste du modèle, l'étalonnage porte sur quatre paramètres, particuliers au modèle, tributaires à la vitesse de révolution du moteur. En corrélant la vitesse de révolution du moteur à celle du véhicule, ces paramètres permettent d'éviter les irrégularités dans l'estimation des valeurs de la consommation relative aux changements de rapports.

Ce lien entre la vitesse de révolution du moteur et celle du véhicule, repose sur une analyse de régression de type Monte-Carlo et a pour effet de réaliser un lissage du modèle. Ces analyses peuvent être effectuées à l'aide d'un outil distribué par une firme néozélandaise (HDM-RUE) sur la base d'une revue des caractéristiques mécaniques typiques du groupe motopropulseur⁶⁵ de chaque véhicule représentatif. Le traitement de cet aspect distinct de l'étalonnage n'a pas été jugé nécessaire. D'autre part, les résultats de consommation d'essence obtenus semblent concorder avec les données fournies par le SMST (section 19.2).

⁶⁵ Ces caractéristiques ont trait aux différents rapports de la transmission, au rapport du différentiel et à la dimension des roues.

Les valeurs attribuées à plusieurs autres paramètres du modèle ne sont pas remises en question du fait de la nature universelle de ces dernières (l'efficacité du groupe motopropulseur (EDT), l'efficacité de base du moteur et des accessoires (PENG), le coefficient de décroissance de la puissance à haut régime (EHP), l'efficacité énergétique du carburant (ξ), etc.).

17.4 Consommation en lubrifiant

En ce qui concerne la consommation en lubrifiant, aucune donnée n'a été relevée lors de la revue de la documentation disponible. Puisqu'il est impossible de baser l'étalonnage sur une consommation moyenne, certaines données relatives à la distance parcourue entre les vidanges d'huile ont été utilisées. Ces données ont permis d'évaluer la proportion de lubrifiant consommé par contamination⁶⁶.

Les sondages réalisés par l'Office de l'efficacité énergétique (OEE, 2000), indiquent que chaque canadien aurait effectué en moyenne environ 1,4 changement d'huile pendant les six mois qui précédaient la période de réalisation d'un sondage. À partir des données relatives au kilométrage moyen annuel parcouru tirées de la même source, il est possible de déduire que la distance moyenne entre deux vidanges d'huile serait de l'ordre de 7 000 kilomètres.

Aussi, à partir d'informations obtenues par l'auteur de ce rapport auprès des constructeurs et d'exploitants de flottes de camions, certaines valeurs de la distance moyenne parcourue entre les changements d'huile ont été attribuées lors de cette consultation, selon le type d'usage du véhicule, à savoir route/hors route, longue distance, etc., et cela pour chacune des différentes catégories de camions.

Le lubrifiant est consommé par contamination et par pertes.

⁶⁶ Le HDM-4 modélise la consommation en lubrifiant selon deux composantes : la contamination et les pertes en fonctionnement (Roy et al., 2006).

Les volumes de lubrifiant consommés par contamination (en fonctionnement) selon la capacité des moteurs représentatifs ont été affectés aux différentes catégories de véhicules; soit les véhicules légers, les camions porteurs, les semi-remorques et les trains routiers.

Le Tableau 17.1 présente les valeurs discutées précédemment ainsi que celles des paramètres du modèle de consommation (contamination et pertes) en lubrifiant adoptées pour les différentes catégories de véhicules.

Tableau 17.1
Paramètres liés à la contamination du lubrifiant

Type de véhicule	Distance moy. entre les vidanges	Capacité (Litres)	Paramètre OILCONT (l/1000km)	Paramètre OILOPER (l/l _{carburant})
Véhicules légers	7 000	5	0,7143	0,0028
Camions porteurs	12 000	18	1,8750	0,0021
Semi-remorques	15 000	35	1,8667	0,0021

Malheureusement, en raison du manque d'informations, il est impossible de valider la composante de la consommation en lubrifiant qui est liée aux pertes lors du fonctionnement du moteur (OILOPER). Les valeurs fournies par défaut dans le HDM-4 ont été conservées pour les simulations. Ces valeurs mènent à la prévision d'une perte moyenne de l'ordre d'un litre de lubrifiant entre chaque changement d'huile dans le cas des véhicules légers.

L'étalonnage du modèle de consommation en lubrifiant pourrait être investi d'efforts supplémentaires relativement aux données manquantes. Toutefois, il est probable que ces raffinements se traduisent par un impact négligeable puisque les coûts liés à la consommation de lubrifiant représentent une fraction minime des CEV.

17.5 Usure des pneus

À l'instar du modèle de la consommation de carburant du HDM-4, celui servant à estimer l'usure des pneus est de nature mécaniste et demeure relativement complexe. Toutefois, parmi les avantages qui en découlent, citons que l'estimation des coûts relatifs à l'usure des

pneus, qui fait suite au paramétrage, est relativement précise. Le modèle est paramétré à partir des valeurs identifiées au chapitre 14 et dans Roy et *al.* (2007a). Rappelons que les principaux facteurs d'influence de l'usure des pneus sont : l'état du revêtement, l'alignement horizontal, la masse du véhicule, le climat, le type de pneus, le volume de gomme et le nombre de rechapages.

Au nombre des paramètres modifiables incorporés au modèle, seulement quelques uns ont nécessité un ajustement en vue d'assurer la représentativité au contexte économique (coûts) et technologique (flotte de véhicules) québécois.

L'étalonnage est fait de manière à permettre des conditions de conduites moyennes et représentatives suivant l'hypothèse d'un état du revêtement satisfaisant (IRI de 3) ainsi que, à l'instar de la procédure présentée dans Bennett (2002), une vitesse de déplacement des véhicules de 75 km/h. Cette démarche a été réalisée en suivant les étapes suivantes :

- l'ajustement du paramètre relié au nombre nominal de rechapages par carcasse de pneu ($NR0$);
- l'ajustement du coefficient d'usure de la gomme ($C0tc$) afin d'obtenir un taux d'usure comparable aux valeurs de références, c'est-à-dire en terme de distance parcourue ($DISTOT$);
- en cas de nécessité, l'ajustement final du paramètre $NR0$ en vue d'obtenir des prévisions économiques similaires avec les différentes valeurs économiques identifiées lors de la revue de la documentation.

La valeur du nombre nominal de rechapages a été ajustée afin de permettre la prévision par le modèle d'un nombre de rechapages effectifs correspondant aux valeurs obtenues auprès de l'industrie telles que présentées par Roy et *al.* (2007).

Le coefficient d'usure de la gomme ($C0tc$) a été modifié dans le but d'admettre la prévision d'une durée de vie des pneus correspondant à celle identifiée dans la littérature et lors de sondages.

Le Tableau 17.2 présente les données utilisées dans le cadre de l'étalonnage du modèle d'usure des pneus pour les différents types de véhicules. Les paramètres $Ctcte$ et $C0tc$ sont utilisés par une équation de prévision du taux d'usure de la gomme et servent à l'étalonnage du modèle.

Tableau 17.2

Variables d'étalonnage du modèle d'usure des pneus

Type de véhicule	Durée de vie (km)	Nombre de rechapages	$Ctcte$ (dm ³)	$C0tc$ (dm ³ /m)	NR0
Automobiles	50 000	0	0,00204	0,02616	0
Camionnettes	50 000	0	0,00187	0,02400	0
Camions 6 roues	60 000	0,35	0,00201	0,02585	1
Camions porteurs 3 et 4 essieux	60 000	0,35	0,00275	0,03529	1
Semi-remorques	100 000	1,25	0,00311	0,03988	2
Trains routiers	160 000	2	0,00311	0,03988	3

Dans le cas des véhicules légers et des camions porteurs, les données disponibles n'ont pas justifié un ajustement de la valeur du paramètre $C0tc$. Dans le premier cas, les résultats obtenus sont relativement similaires aux valeurs de référence alors que, pour les camions porteurs, le modèle a été calé sur la base du paramètre $NR0$.

En ce qui a trait à l'étalonnage des effets de l'état du revêtement sur l'usure des pneus, rappelons que la valeur de l'indice IRI influence le nombre de rechapages effectifs et la force de résistance au roulement.

Les deux paramètres ont un impact significatif sur l'usure des pneus :

- 1) La corrélation entre l'état du revêtement et l'usure de la gomme est basée sur un sous-modèle de nature mécaniste qui prend en considération l'effet de l'IRI sur la force de résistance au roulement. Selon la revue des applications du modèle qui a été effectuée (VTI (2003), TRAC (2004), Bennett (2004) et Bennett et Greenwood (2003)), les valeurs des paramètres tributaires à l'état du revêtement ne sont pas remises en question lors des adaptations dans différentes régions.

- 2) L'impact de la valeur de l'IRI sur la durée de vie d'une carcasse de pneu, donc du nombre maximum de rechapages, est modélisé selon une approche empirique. À cet effet, l'équation proposée par Papagiannakis (1999) a été analysée afin de raffiner l'adaptation du modèle HDM-4 aux conditions nord-américaines. Cette dernière évoque une sensibilité liée à l'état du revêtement substantiellement importante comparativement aux résultats du modèle paramétré du HDM-4. Toutefois, la plage d'IRI considérée dans cette étude ne permet pas une validation complète du modèle du HDM-4 à partir des données compilées par Papagiannakis (1999). Par conséquent, les valeurs par défaut des paramètres de modélisation du modèle d'usure de pneus du HDM-4 sont conservées.

17.6 Consommation en pièces détachées

Il s'avère relativement difficile de dresser un parallèle entre une section de route et les coûts d'entretien et de réparations des véhicules qui en sont tributaires.

Différents facteurs rendent l'étalonnage d'un modèle délicat : l'âge et le type d'assemblage des véhicules (i.e. technologie moderne, robustesse du véhicule), les politiques d'entretien des propriétaires, le marché des pièces de rechange, la valeur comparative entre la main d'œuvre et le coût des pièces, etc. Certains facteurs varient d'une région à une autre. Pour cette raison, Bennett et Greenwood (2003) affirment que l'étalonnage du modèle de coûts en entretien et réparation est un élément essentiel de toute analyse à l'aide du HDM-4.

Avant de poursuivre sur l'étalonnage, un rappel s'impose relativement à la méthodologie d'évaluation des coûts reliés à la consommation de pièces de rechange par le HDM-4. Telle que présentée par Roy et *al.* (2006), l'équation 17.2 permet la modélisation des coûts en entretien et en réparations selon une proportion de la valeur de remplacement des véhicules.

$$PC = (K0pc (CKM^{kp} (a0 + a1 IRI)) + K1pc) (1 + CPCON dFUELavg) \quad (17.2)$$

L'équation assimile trois facteurs d'influence sur les coûts, soit :

- 1) l'âge du véhicule, défini selon le kilométrage cumulé (ou *CKM*) (facteur *kp*);
- 2) l'état du revêtement (ou *IRI*) (coefficients empiriques *a0* et *a1*);
- 3) les interactions entre les véhicules, c'est-à-dire les cycles de changements de vitesse imposés par la circulation (coefficient empirique *dFUEL*); *CPCON* réfère à une majoration du coût de consommation de pièces en proportions de la consommation marginale relative en carburant.

Dans le cadre de l'étude, l'étalonnage du modèle porte sur les deux premiers facteurs; le troisième n'étant pas requis pour l'usage du modèle par le Service des chaussées, puisque ceux-ci sont tributaires de la capacité de la route.

Des analyses de régression ont été réalisées afin de déterminer les valeurs du paramètre relié à l'âge du véhicule, le paramètre K_p , ainsi que celles des paramètres de calage du modèle de consommation en pièces détachées; les coefficients $K0_{pc}$ et $K1_{pc}$. La détermination de la valeur de ces facteurs permet d'éviter la surestimation des coûts de consommation de pièces de rechange conséquente aux valeurs par défaut du modèle.

Les analyses ont été effectuées à partir de valeurs cibles tirées 1) d'un sondage canadien publié conjointement par la firme «*Desrosiers Automotive*» de Toronto et la CAA (Desrosiers, 2003) pour ce qui concerne les automobiles et les camionnettes et 2), de l'étude sur les semi-remorques publiée par la «*Society of Automotive Engineers*» (SAE) (Papagiannakis, 1999). Par contre, il a été impossible d'obtenir des données détaillées en ce qui a trait aux camions porteurs.

Les étapes suivies dans le cadre de l'étalonnage sont les suivantes :

- 1) l'allocation d'un pourcentage, relatif à l'âge du véhicule, des coûts totaux d'entretien et de réparation attribuables au remplacement des pièces à partir des informations disponibles;
- 2) la conversion des coûts déduits en une proportion de la valeur de remplacement du véhicule sans les pneus, exprimée par un pourcentage par 1 000 véhicule-kilomètres parcourus;
- 3) une série d'analyses de régression des paramètres k_p , KO_{pc} et $K1_{pc}$ de manière simultanée et indépendante en utilisant un IRI moyen de 3 m/km, qui représente une chaussée en état moyen;
- 4) l'adoption des valeurs de paramètres permettant de maximiser la corrélation (R^2) entre les valeurs cibles et le modèle.

La Figure 17.1 illustre un exemple d'analyse de régression menée dans le cas des automobiles.

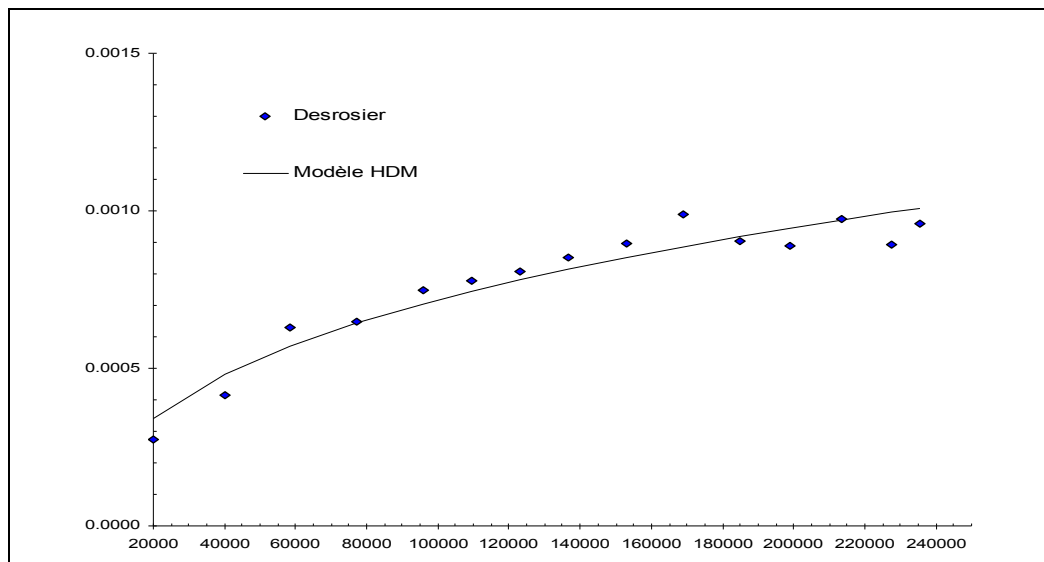


Figure 17.1 Influence du kilométrage cumulé sur les coûts en pièces de rechange, exprimés en pourcentage de la valeur de remplacement du véhicule.



Le Tableau 17.3 présente les valeurs pour le paramètre lié à l'âge du véhicule (K_p) et les coefficients de calage du modèle.

Tableau 17.3

Étalonnage du modèle de consommation de pièces

Type de véhicule	K_p	$K0_{pc}$	$K1_{pc}$	R^2
Automobiles	0,308	0,502	-0,0005	0,93
Camionnettes	0,308	0,400	0	0,84
Camions porteurs	0,371	0,450	0	-
Semi-remorques	0,371	0,110	0	0,91

Considérant la quantité limitée de données disponibles, les modèles ont été étalonnés sans modifications des valeurs du coefficient K_p présentés par défaut dans la documentation du HDM-4.

Les valeurs relatives à l'entretien des véhicules qui sont dérivées des équations proposées par Papagiannakis (1999) mènent à des estimations considérablement inférieures à celles fournies sur la base des valeurs initialement intégrées au HDM-4. Des valeurs intermédiaires pour les paramètres du modèle ont été estimées à partir des données fournies par TC (2003).

En ce qui a trait aux camions porteurs, le modèle a été calé sur la base des valeurs publiées dans TC (2003). Il est fortement recommandé que des études, plus appliquées au contexte québécois et complémentaires à celles déjà identifiées, soient menées afin de valider les différentes valeurs.

Malheureusement, peu de données nord-américaines sont disponibles relativement à la corrélation entre l'état du revêtement (IRI) et la consommation en pièces de rechange pour les véhicules. Les seules données identifiées proviennent de l'étude publiée par la SAE (Papagiannakis, 1999) et ont été validées pour une fourchette limitée de valeurs d'IRI, soit entre 1,3 à 1,9. Toutefois, l'influence de l'état du revêtement sur le remplacement des pièces pour la plage de d'IRI présentée est remise en question par Bennett et *al.* (2003).

Cela pourrait être le fait d'une mauvaise estimation de la valeur de l'IRI sur les routes empruntées par les camions qui ont fait l'objet du sondage à la source des équations présentées par Papagiannakis (1999).

Néanmoins, une analyse comparative de ces données avec les résultats obtenus à l'aide du modèle intégré au HDM-4 calé en fonction de l'équation de Papagiannakis (1999) a révélé un niveau de corrélation satisfaisant pour des valeurs d'IRI variant de 1 à 7 ($R^2=0.943$). Il est important de souligner que les modèles se distinguent par la linéarité dans le cas du HDM-4 et par une forme exponentielle dans le cas de celui proposé par Papagiannakis (1999).

La Figure 17.2 illustre la corrélation entre les deux modèles par un coût, qui est exprimé selon un pourcentage de la valeur de remplacement du véhicule par 1000 véhicule-kilomètre, déterminé en fonction de l'IRI.

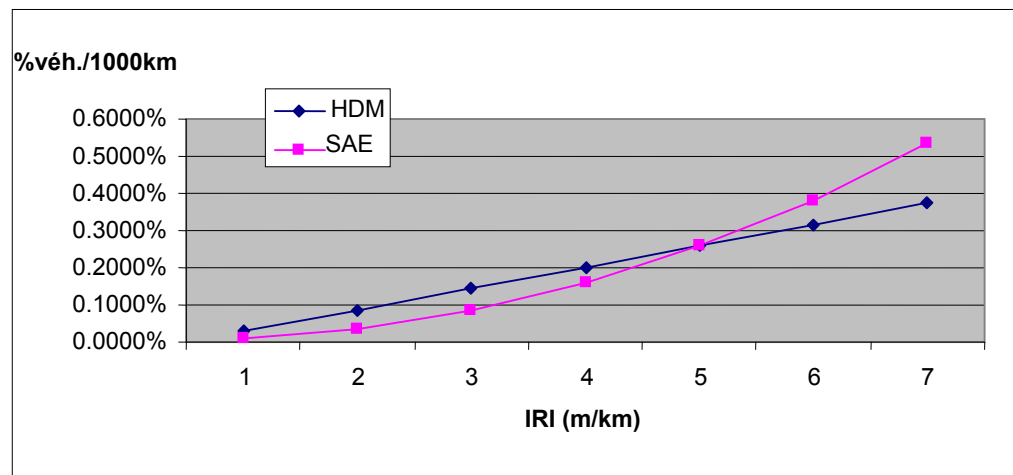


Figure 17.2 Réparations et entretien en fonction de l'état du revêtement.

La revue des applications du HDM-4 à travers le monde n'a pas menée à l'identification de valeurs utilisées pour les coefficients du modèle qui sont différentes de celles incluses par défaut dans le logiciel. Pour ces raisons, les valeurs des coefficients proposés dans la littérature du HDM-4 ont été conservées pour toutes les classes de véhicules.

17.7 Heures consacrées à l'entretien et aux réparations

Afin d'estimer le nombre d'heures de la main d'œuvre affectée à l'entretien et aux réparations des véhicules, les valeurs par défaut des coefficients de calage du modèle HDM-4 ont été révisées. À la manière du modèle relatif à la consommation en pièces de rechange, les données fournies par Desrosiers (2003), Papagiannakis (1999) et TC (2003) sont utilisées afin de réaliser l'étalonnage du modèle présenté dans cette section.

L'équation suivante permet l'estimation du nombre d'heures consacrées à l'entretien et aux réparations à partir du résultat fourni par le modèle de prévision du remplacement des pièces (PC) :

$$LH = K0lh (a0 PC^{a1}) + K1lh \quad (17.3)$$

Les coefficients $a0$ et $a1$ sont déterminés en fonction de la classe de véhicule; des valeurs sont attribuées par défaut dans le HDM-4. Les autres facteurs permettent un étalonnage simplifié du modèle.

Les étapes accomplies dans le cadre de l'étalonnage sont les suivantes :

- 1) l'allocation d'un pourcentage, qui est relatif à l'âge du véhicule, des coûts totaux d'entretien et de réparations attribuables aux coûts de la main d'œuvre;
- 2) la conversion des coûts déduits en un nombre d'heures par un 1000 véhicule-kilomètres parcourus à partir des tarifs horaire présentés au chapitre 14;
- 3) une série d'analyses de régression des différents paramètres du modèle de manière accordant la priorité aux coefficients $a0$ et $a1$ en utilisant un IRI de 3 m/km;
- 4) l'adoption des valeurs de paramètres permettant de maximiser la corrélation (R^2) entre les valeurs cible et le modèle.

Le Tableau 17.4 présente les valeurs retenues pour les paramètres et les coefficients de calage du modèle de prévision du nombre d'heures d'entretien. Par manque d'information, les valeurs présentées dans Bennett (2002) ont été attribuées aux camions porteurs. Les résultats économiques ainsi obtenus concordent avec les valeurs identifiées lors de la revue de la documentation.

Tableau 17.4

Étalonnage du modèle de prévision des heures affectées à l'entretien

Type de véhicule	a0	a1	K0 _{lh}	K1 _{lh}	R ²
Automobiles	21,98	0,547	1,00	0	0,91
Camionnettes	18,10	0,547	1,00	0	0,86
Camions porteurs	25,20/50,46	0,519	1,00	0	-
Semi-remorques	68.23	0,519	0,65	0	-

Les résultats obtenus, relativement au nombre d'heures d'entretien par 1 000 véhicule-kilomètres parcourus, concordent avec les données pour les véhicules légers fournies par Desrosiers (2003) ainsi qu'avec celles de l'étude publiée par la SAE (Papagiannakis, 1999) et celles obtenues du sondage de Léger-Léger portant sur les conducteurs de semi-remorques (MTQ, 2000).

Les informations fournies par Desrosiers (2003) et Papagiannakis (1999) ont permis d'évaluer un aspect supplémentaire des modèles du HDM-4. Il s'agit du ratio entre les coûts en pièces de rechange et la main d'œuvre d'entretien.

Le Tableau 17.5 présente certaines valeurs de la proportion des coûts en remplacement des pièces relativement aux coûts totaux en entretien et en réparations. Ces résultats sont présentés en fonction de l'âge moyen des véhicules pour chaque catégorie tel que présenté au Tableau 13.8.

Tableau 17.5

Répartition des coûts en remplacement des pièces relatifs
aux coûts totaux en entretien et réparations
exprimés en pourcentage

Type de véhicule	Prévision HDM-4	Desrosiers (2003)	Papagiannakis (1999)	BC VOC (1991)
Automobiles interm.	52	53	-	50
Camionnettes	53	53	-	50
Camions porteurs	52 - 57	-	-	55
Semi-remorques	64 -68	-	55	55

17.8 Coûts en capital et en intérêts

Il existe plusieurs méthodologies permettant l'évaluation des coûts en capital; certaines sont exclusivement assujetties à l'utilisation du véhicule, en fonction du kilométrage parcouru ou du nombre d'heures d'utilisation, alors que d'autres comportent un ajustement de la durée de vie optimale du véhicule. Il s'agit d'un ajustement qui est corrélé avec les coûts d'exploitation du véhicule; c'est-à-dire à la rentabilité afférente à la propriété et à l'utilisation du véhicule. Cette méthode est principalement fondée sur l'augmentation, qui est proportionnelle à l'âge du véhicule et à la dégradation de l'état du revêtement, des coûts en entretien et en réparations.

Les modèles du HDM-4 permettent 1) l'adoption de l'une ou l'autre des méthodologies citées en plus 2) d'estimer l'impact de l'état du revêtement sur la durée de vie physique maximale d'un véhicule. La méthodologie préconisée en vue de la détermination des coûts en dépréciation est relative à la distance totale parcourue dans le cas des véhicules légers alors qu'elle intègre l'influence de l'état du revêtement sur la durée de vie des véhicules dans le cas des camions.

Le Tableau 17.6 illustre que l'impact de l'état du revêtement sur la durée de vie des véhicules pourrait être plus sévère que celui modélisé à partir des valeurs fournies par défaut par le HDM-4. Ces valeurs sont tirées d'une validation du modèle qui a été effectuée en Thaïlande en 2000 (HTC, 2002). Néanmoins, les valeurs des coefficients, plus conservatrices, telles qu'elles sont présentées dans la documentation du HDM-4 ont été directement utilisées dans le cadre des simulations.

Tableau 17.6

Effets de l'IRI sur la durée de vie des véhicules

IRI	Défaut HDM-4 (%véh. neuf /1000véh.-km)	Thaïlande (%véh. neuf /1000véh.-km)	Différence (%)
2	0,1385	0,1385	0,00
3	0,1385	0,1426	2,93
4	0,1398	0,1662	18,86
5	0,1454	0,1889	29,95
6	0,1569	0,2128	35,59
7	0,1709	0,2359	38,02

En ce qui concerne les intérêts, les coûts estimés sont relatifs au taux d'intérêt proposé dans le chapitre 14; soit 6%. Tels qu'estimés par les modèles du HDM-4, ces coûts sont indépendants de la vitesse de fonctionnement des véhicules et de l'état du revêtement.

17.9 Temps de transport

Les coûts reliés au temps de déplacement sont inversement proportionnels à la vitesse de déplacement sur une section particulière. Par conséquent, la réduction de ce type de coût figure parmi les bénéfices découlant de l'amélioration de l'état du revêtement; celle-ci menant à une augmentation de la vitesse de déplacement des véhicules.

Dans le cadre de la modélisation des CEV, la valeur du temps de transport a été incluse dans les estimations. Aucune procédure d'étalonnage n'est requise dans le cas du modèle du temps de transport puisque celui-ci est relatif à l'étalonnage du modèle de prévision de la vitesse en régime libre discuté à la section 17.2.

17.10 Conclusions relatives à l'étalonnage

La validité du travail réalisé, en matière de paramétrage des modèles HDM-4, est tributaire de la qualité des données utilisées. Par nécessité, des hypothèses relatives aux conditions de conduites moyennes sous-jacentes aux valeurs identifiées dans la documentation ont été émises et justifiées.

Ainsi, bien que la tâche ait été effectuée dans un souci de rigueur, l'acquisition de données supplémentaires, dans le contexte québécois, assurerait une validation des modèles.

Dans cette optique, les données relatives à la consommation de carburant, de lubrifiant et d'usure des pneus pourraient être obtenues relativement facilement par l'instrumentation et le relevé des flottes de véhicules.

Par contre, force est de reconnaître que la quantification des coûts en entretien et en réparations en fonction de l'état du revêtement serait plus difficile à déterminer; particulièrement dans le cas des automobiles et des camions légers.

CHAPITRE 18

LES RÉSULTATS OBTENUS

Ce chapitre présente les résultats obtenus à partir des modèles intégrés au HERS-ST, de ceux fournis par le HDM-4 ainsi que des équations développées pour des fins de la modélisation des impacts environnementaux et des coûts d'exploitation des véhicules.

Ces résultats ont été compilés à l'aide des systèmes de gestion des infrastructures routières (i.e. HERS-ST version 4.2 et HDM-4 version 2.0), de programmes *Visual Basic* et de chiffriers *Excel* (*Microsoft Office 2003*).

Des équations complémentaires, pour le calcul des coûts, ont été élaborées à partir des informations fournies dans la documentation technique relative aux logiciels HERS-ST et HDM-4.

Pour chaque système, les résultats sont formulés de manière pertinente en respectant l'architecture des systèmes de gestion et les objectifs formulés dans le cadre d'une étude réalisés pour le MTQ (Roy et *al.*, 2007b).

18.1 Résultats du HERS-ST

À l'exclusion des impacts environnementaux, les résultats présentés dans les sections qui suivent ont été compilés à partir des informations fournies par la documentation technique du HERS-ST soit, par ordre de priorité : FHWA (2005), FHWA (2003) et FHWA (2000).

18.1.1 Vitesses de déplacement des véhicules

Les modèles du HERS-ST permettent une distinction entre 1) la vitesse en régime libre, c'est-à-dire en l'absence d'interactions entre les véhicules, et 2) la vitesse effective qui est tributaire du débit de circulation et de la densité des accès à la route.

Le premier modèle est une version préliminaire d'un modèle similaire qui est intégré au HDM-III et dont les résultats relatifs sont présentés à la section 18.2.1. Les résultats fournis par le modèle probabiliste de prévision de la vitesse en régime libre du HERS-ST sont indépendants de la classe de véhicules, de la puissance du moteur et de la puissance de freinage⁶⁷.

La Figure 18.1 montre les résultats de prévision de la vitesse en régime libre pour une autoroute et une route respectivement caractérisées par une limite de vitesse de 100 km/h et 70 km/h. Les résultats sont présentés pour un tracé rectiligne et un profil longitudinal plat.

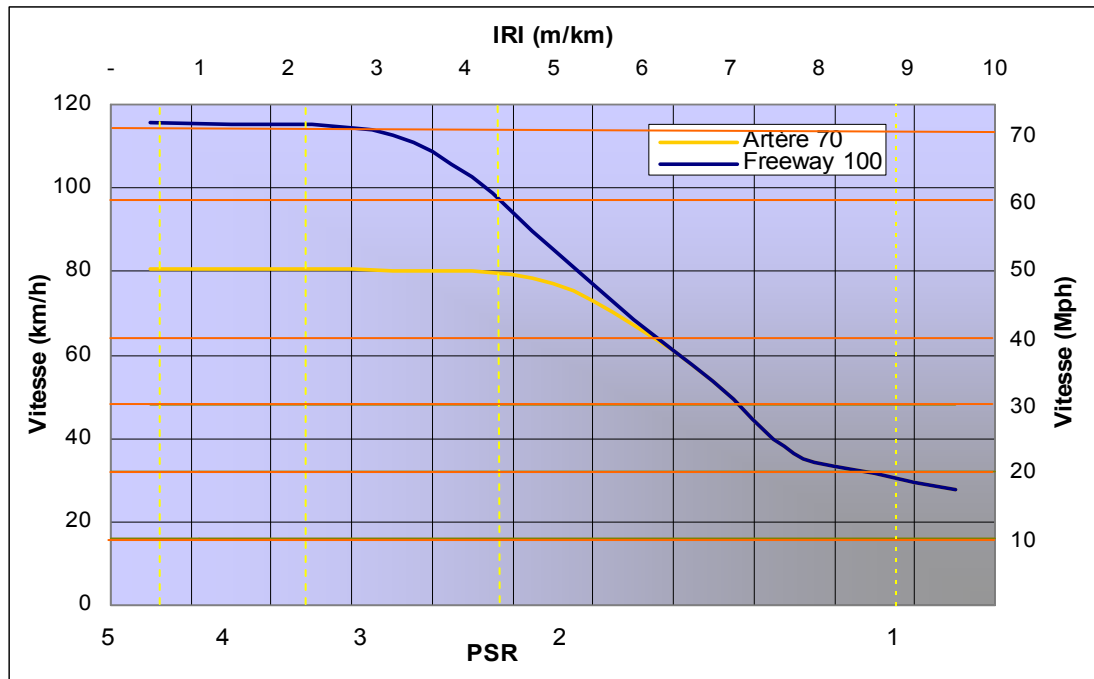


Figure 18.1 Vitesse en régime libre en fonction de l'état du revêtement (HERS-ST).

⁶⁷ Ce paramètre est considéré par une seconde équation dans les pentes descendantes et pour les camions seulement.

Le modèle d'estimation de la vitesse effective des véhicules ajuste la vitesse des véhicules par déduction d'un temps de délais de la circulation de la vitesse en régime libre; qui est modélisé à partir du ratio débit-capacité et de la présence des dispositifs de contrôle. Une indication sur les délais estimés par HERS-ST est présentée à la section 18.1.4.

18.1.2 Coûts de fonctionnement à vitesse constante

L'estimation des coûts de fonctionnement des véhicules à vitesse en écoulement libre représente le premier stade de développement des modèles des CEV du HERS-ST. Les coûts sont comptabilisés en fonction de cinq composantes : le carburant, l'huile du moteur, les pneus, l'entretien et les réparations ainsi que la dépréciation liée à l'utilisation du véhicule. Les résultats ont été compilés à partir des équations présentées dans la documentation du HERS-ST (FHWA, 2005).

La Figure 18.2 illustre la corrélation entre la vitesse de fonctionnement et les coûts d'exploitation des véhicules (CEV) selon les modèles paramétrés du HERS-ST. Les résultats sont présentés pour une chaussée caractérisée par une valeur de l'IRI de 3 m/km.

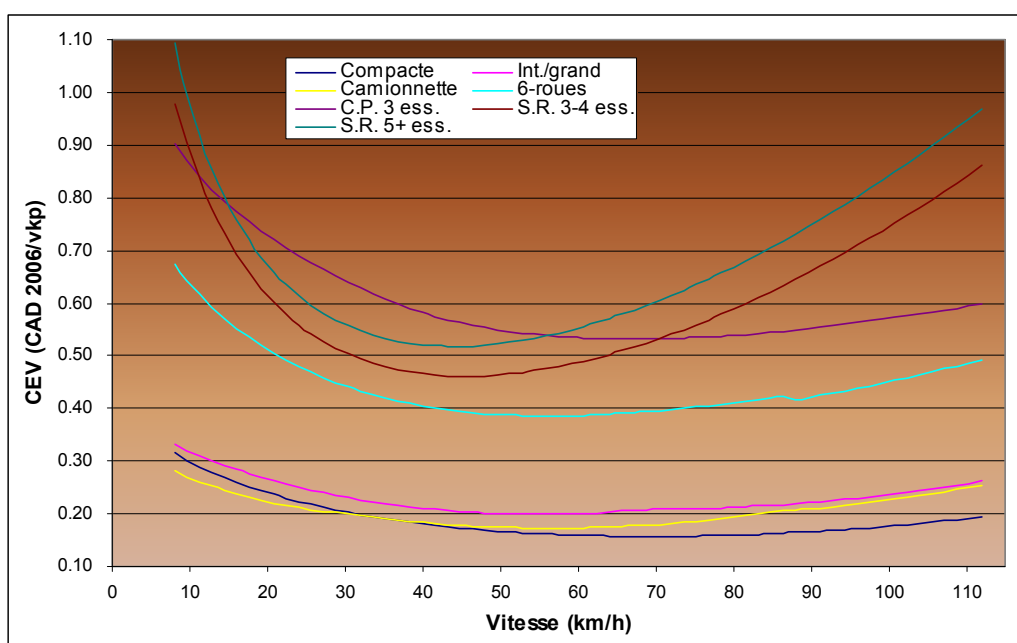


Figure 18.2 CEV en fonction de la vitesse (HERS-ST).



18.1.3 Coûts marginaux de fonctionnement dus aux courbes

Suivant la méthodologie publiée par Zaniewski (1982), les CEV additionnels qui sont attribuables à la présence de courbes sont modélisés distinctement par HERS-ST. Toutefois, force est de reconnaître que l'impact de leur modélisation à l'aide des équations présentées par FHWA (2005) est relativement faible lorsque comparés aux CEV totaux. Ainsi, la discussion de l'estimation des coûts marginaux dus au tracé de la route n'est pas abordée de manière élaborée dans ce chapitre.

18.1.4 Coûts marginaux de fonctionnement dus aux cycles de changements de vitesse

Les coûts marginaux exprimés selon les cycles de changement de vitesse sont quantifiés par le HERS-ST en fonction du passage d'une vitesse initiale vers une vitesse minimale suivie d'un retour à la vitesse précédente. Il est essentiel d'insister sur le fait que la modélisation des cycles de changement de vitesses par HERS-ST se limite à la présence d'intersections munies de dispositifs de contrôle de la circulation ou de panneaux d'arrêt.

Ainsi, les cycles de changement de vitesses induits par les interactions des véhicules au sein de la circulation ne sont pas comptabilisés par le HERS-ST. Ceci a comme conséquence de sous estimer les coûts d'exploitation des véhicules de manière importante dans le cas des routes caractérisées par un fort débit.

La Figure 18.3 montre l'influence des cycles de changement de vitesses (en milles par heures) sur les CEV tels qu'ils sont estimés par le HERS-ST. Les résultats sont présentés pour trois classes de véhicules circulant sur une route caractérisée par un revêtement en relativement bon état (IRI de 3 m/km).

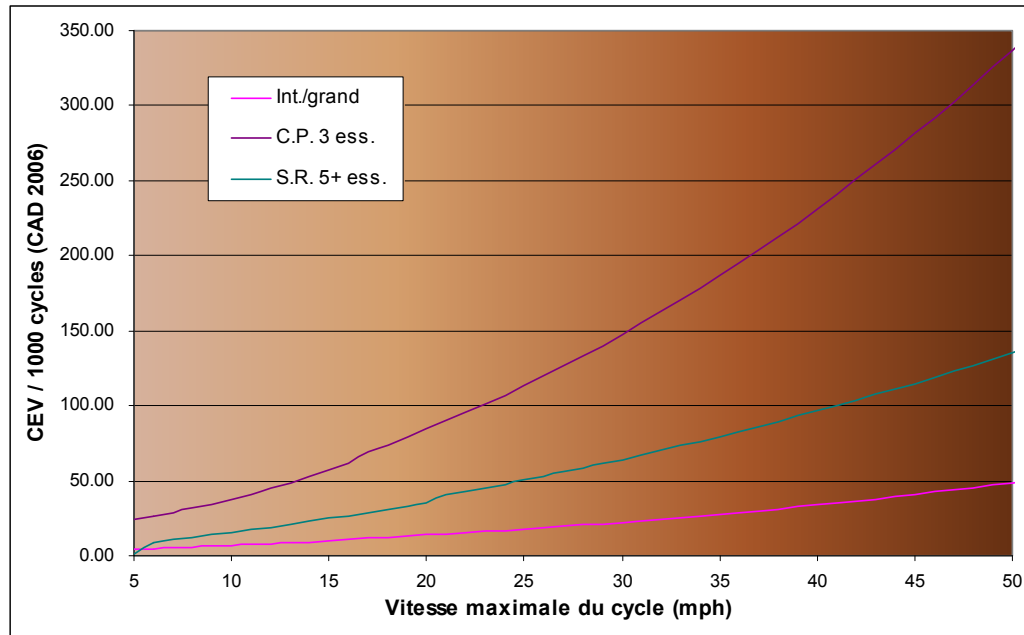


Figure 18.3 CEV en fonction des cycles de changements de vitesse (HERS-ST).

18.1.5 CEV en fonction de l'état du revêtement

Les CEV en fonction de l'état du revêtement ont été comptabilisés en considérant les interactions entre l'indice PSR et la vitesse en régime libre; c'est-à-dire que la vitesse varie en fonction de l'état du revêtement (se référer à la Figure 18.1).

Comme le démontre la Figure 18.1, ces résultats mettent en évidence une surestimation de l'impact de l'état du revêtement sur la vitesse en régime libre alors qu'on observe une réduction des CEV pour des valeurs équivalentes d'IRI supérieures à 4 m/km. En ce qui concerne les semi-remorques, la surestimation des CEV par les modèles du HERS-ST pour des vitesses élevées est également à l'origine de cette problématique tel que l'illustre la Figure 18.2. Bref, pour des tronçons en mauvais état, la mise en œuvre d'une intervention visant l'amélioration de l'état du revêtement pourrait entraîner le calcul d'un bénéfice négatif par le HERS-ST relativement aux CEV.

La Figure 18.4 illustre la problématique abordée dans le cas de quatre classes de véhicules.

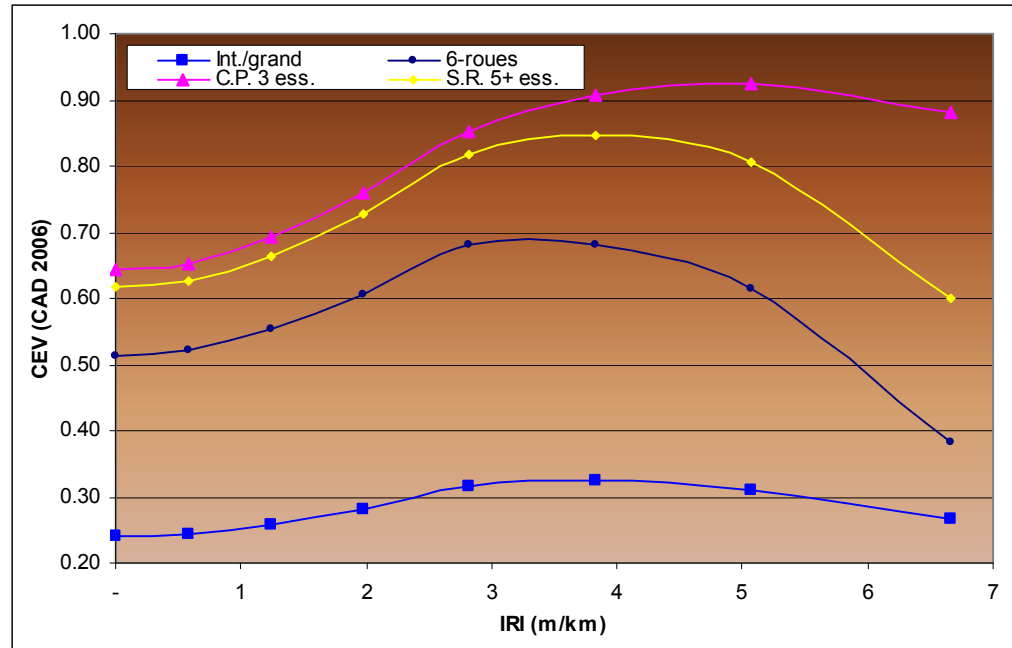


Figure 18.4 CEV en fonction de l'état du revêtement (HERS-ST).

(Vitesse variable selon la valeur d'IRI)

18.1.6 Coûts relatifs au temps de transport

Les impacts économiques attribuables au temps sont modélisés par le HERS-ST en référence à des valeurs unitaires du temps de transport qui sont particulières à chacune des classes de véhicules. Ces valeurs sont présentées dans le chapitre 15.

Les paramètres de base de la modélisation du temps de transport sont le Ratio Débit-Capacité (RDC), le taux d'accidents, le nombre d'intersections ainsi que la présence de dispositifs de contrôle de la circulation et de panneaux d'arrêt (Roy et al., 2006). Les modèles incorporés dans le HERS-ST font référence aux notions présentées par l'édition de 1997 du «*Highway Capacity Manual*».

Sommairement, les modèles permettent d'estimer les délais en fonction du type de route et des paramètres mentionnés précédemment pour, ensuite, quantifier les impacts économiques de ces délais.

La Figure 18.5 illustre l'évolution des délais, exprimés en heures par 1000 véhicule-milles parcourus (vmp) pour tous les types de véhicules confondus, en fonction du ratio débit-capacité. À titre comparatif, les résultats sont présentés, pour tous les types de véhicules confondus, pour des sections de route caractérisées par une vitesse en écoulement libre de 37,5 mph (60 km/h) dans le cas de quatre types d'aménagements d'infrastructures.

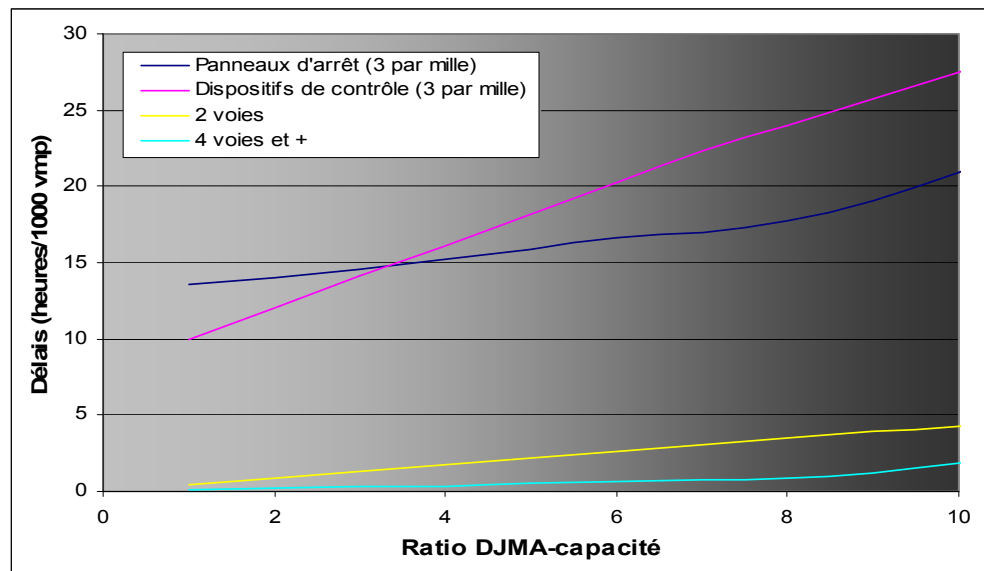


Figure 18.5 Délais moyens en fonction du ratio DJMA-capacité (HERS-ST).

À la page suivante, la Figure 18.6 montre les coûts marginaux qui sont attribuables aux délais liés au contrôle et à la densité de la circulation. Ces résultats ont été obtenus pour les mêmes conditions que ceux qui sont présentés dans la figure précédente.

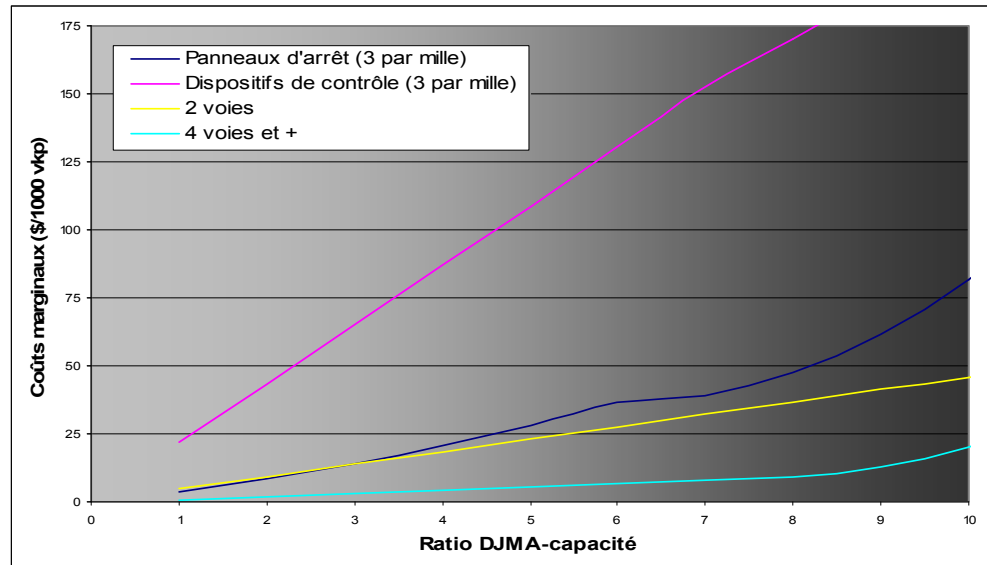
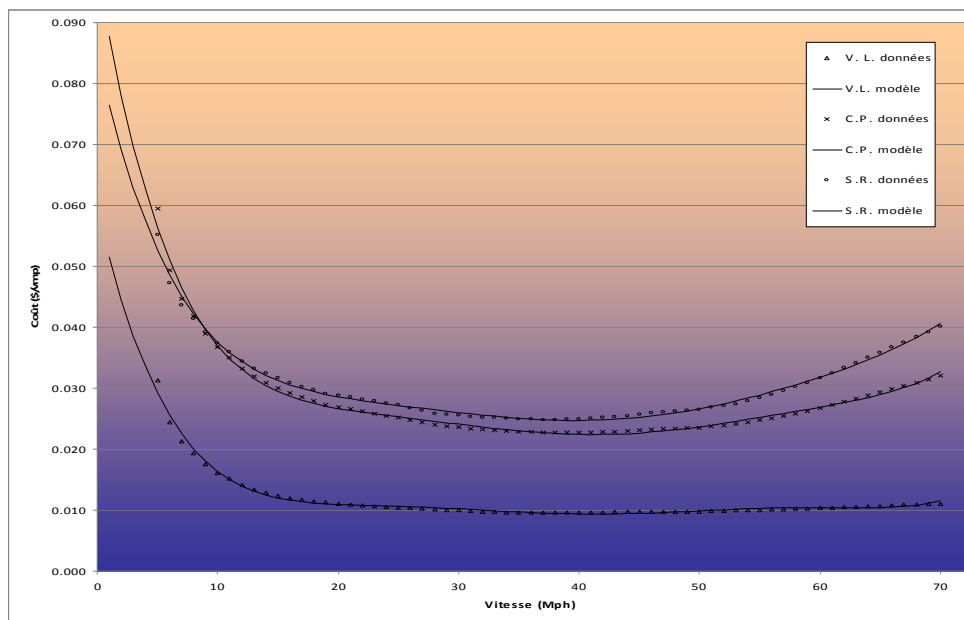


Figure 18.6 Coûts marginaux liés au temps de transport en fonction du ratio DJMA-capacité (HERS-ST).

18.1.7 Coûts des émissions de polluants et de gaz à effet de serre

Les procédures de calculs des impacts économiques découlant des émissions de polluants et de gaz à effet de serre (GES) sont présentées à la section 16.3 du présent document. Certains résultats de cette procédure sont présentés ici afin de dresser un parallèle entre l'importance des coûts et 1) la vitesse effective de chacune des trois catégories de véhicules retenues ainsi que 2) la classe et le milieu de la route.

La Figure 18.7 illustre les valeurs des impacts économiques des émissions de polluants et de GES pour une autoroute en milieu rural. Les valeurs qui y sont indiquées réfèrent aux résultats du modèle présenté à la section 16.4.



**Figure 18.7 Impacts environnementaux –
autoroute en milieu rural (HERS-ST Qc).**

La Figure 18.8 établit un parallèle entre l'évolution des impacts économiques des émissions et le type de route qui est défini en fonction du milieu et de la classe fonctionnelle.

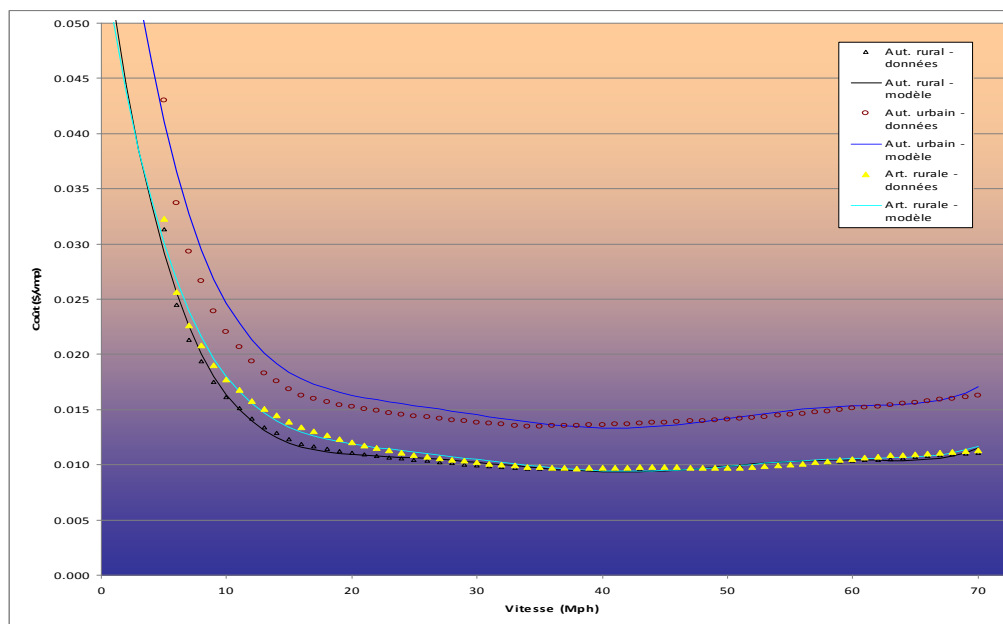


Figure 18.8 Impacts environnementaux selon la classe de route.

À cette étape, il est essentiel de souligner qu'en raison de l'architecture du HERS-ST, la modélisation des impacts environnementaux ne tient pas compte du débit de circulation et, par conséquent, ne permet pas d'estimer les bénéfices attribuables à une amélioration du niveau de service du lien routier. Les modèles du HERS-ST ne permettent pas de tenir compte de la réduction des émissions qui sont attribuables à la diminution des cycles de changements de vitesses. Conséquemment, l'amélioration de la capacité de la route peut se traduire en une augmentation de la vitesse effective des véhicules et, donc, augmenter l'estimation des impacts liés aux émissions alors qu'une réduction de la densité des véhicules peut signifier le contraire.

18.2 Résultats du HDM-4

Les résultats obtenus à l'aide des modèles du HDM-4, qui sont inclus dans la présente section, font référence aux modèles de prévision de la vitesse en régime libre et des Coûts d'Exploitation des Véhicules (CEV).

18.2.1 Résultats présentés en fonction de l'état du revêtement

Les résultats du modèle de prévision probabiliste de la vitesse en régime libre mettent en relief une influence marquée de l'état du revêtement pour des valeurs de l'IRI supérieures à 4 m/km pour la plupart des classes de véhicules.

On constate que, comparativement à la vitesse en régime libre sur une route dont l'IRI est de 2 m/km, le passage à un IRI de 5 m/km provoque une réduction moyenne de la vitesse de l'ordre de 7%. En général, le passage à un IRI de 7 m/km provoque une réduction d'environ 24%.

A titre d'exemple, la Figure 18.9 illustre les résultats d'estimation de la vitesse en régime libre sur une autoroute pour six des onze classes de véhicules.

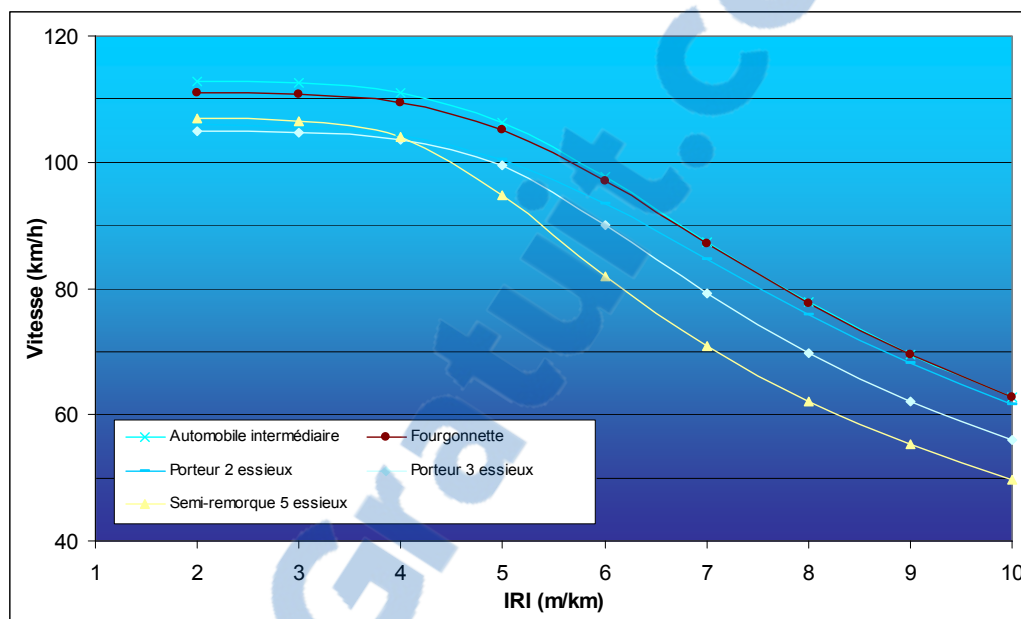


Figure 18.9 Vitesses en régime libre pour une autoroute (HDM-4).

Les analyses de sensibilité qui ont été menées sur le modèle présenté au chapitre 9, ont permis de mettre en relief l'importance de certains paramètres. Par ordre décroissant, les paramètres les plus sensibles sont : 1) celui relié au contrôle policier (*ENFACT*), 2) le paramètre probabiliste β et 3) la vitesse préconisée par le conducteur (*VDESIR*). Dans le cas des conditions pour lesquelles la modélisation est effectuée, les autres paramètres⁶⁸ du modèle ont une influence peu significative. Les résultats présentés permettent de constater que le paramètre *VDESIR* prévaut dans les cas où l'uni est relativement acceptable ($IRI < 5$) tandis que le paramètre *VROUGH* prime dans le cas d'une valeur élevée de l'indice IRI.

⁶⁸ Ces paramètres sont la puissance du moteur, le coefficient d'aérodynamisme, l'aire frontale du véhicule, la masse en charge et l'adhérence de la chaussée (macrotecture).

18.2.2 Coûts en fonction de l'état du revêtement

À l'instar des estimations réalisées dans le cas de la vitesse en régime libre, celles relatives aux CEV permettent de mettre en relief leur corrélation avec l'état du revêtement.

La réduction de la vitesse des véhicules a pour effet d'augmenter les coûts liés au temps de conduite. Dans une certaine mesure, il peut y avoir un impact positif sur la consommation de carburant et l'usure des pneus qui, toutefois, est contrecarré par l'impact d'une augmentation de l'IRI pour l'ensemble des CEV⁶⁹.

La Figure 18.10 illustre, pour six classes de véhicules, l'évolution des CEV en fonction de l'IRI sur une autoroute.

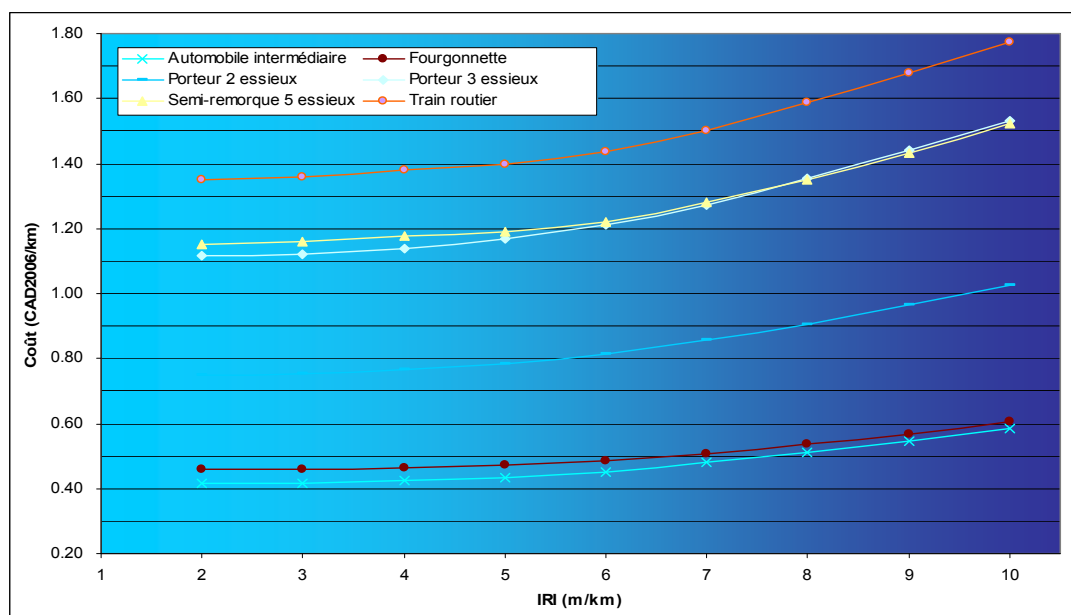


Figure 18.10 CEV en fonction de l'IRI pour une autoroute (HDM-4).
(Vitesse variable selon la valeur d'IRI)

⁶⁹ En fonction des modélisations effectuées pour les différentes classes de véhicules, le passage d'un IRI de 2 m/km à 7 m/km génère une augmentation des coûts d'exploitation des véhicules variant de 11% à 15%.

18.2.3 Coûts selon la classe de route

Avant de poursuivre la présentation des résultats, il est essentiel de rappeler que l'intégration des équations des CEV au système de gestion du Service des chaussées passe par une agrégation de la distribution relative des passages pour les différentes classes de véhicules. Celle-ci est basée sur la classe et le milieu de la route.

L'adoption de cette méthodologie découle de l'architecture du système de gestion des chaussées (GCH-6011) et de l'impossibilité à obtenir de telles données à un niveau plus désagrégué.

En somme, la distinction entre les différentes distributions est attribuée selon 1) le milieu (i.e. urbain ou rural), 2) la classe fonctionnelle (autoroutes et routes) et 3) la vitesse limite; admettant un total de huit distributions possibles.

La distinction entre les milieux urbain et rural est évidente au niveau de la proportion de camions, qui est plus importante en milieu rural.

Le recours à une distribution des véhicules différente entre autoroutes et autres routes, permet l'incorporation des trains routiers, propres aux autoroutes uniquement.

Ce niveau de désagrégation fournit des distributions moyennes des classes de véhicules relativement homogènes.

La Figure 18.11 illustre la variation des CEV en fonction de l'état de la route selon les différentes classes de route et le milieu. Le pourcentage de camions moyens pour chaque regroupement de sections, établi en fonction de la classe et du milieu, est sous-jacent à la compilation des CEV présentés dans le graphique.

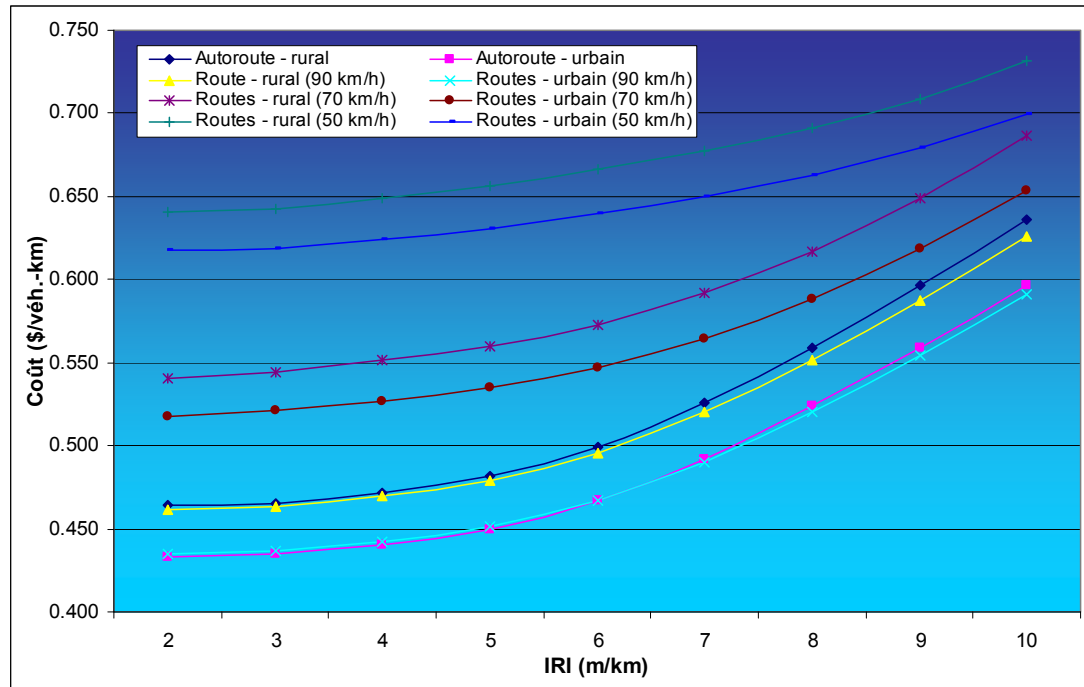


Figure 18.11 CEV moyens selon la classe et le milieu de la route (HDM-4).
(Vitesse variable selon la valeur d'IRI)

18.2.4 Distribution relative des composantes des CEV

À la page suivante, la Figure 18.12 illustre la proportion des différentes composantes de CEV dans le cas de quatre classes de véhicules. Ces résultats ont été compilés avec les modèles du HDM-4 pour une vitesse de 100 km/h et un IRI de 3 m/km.

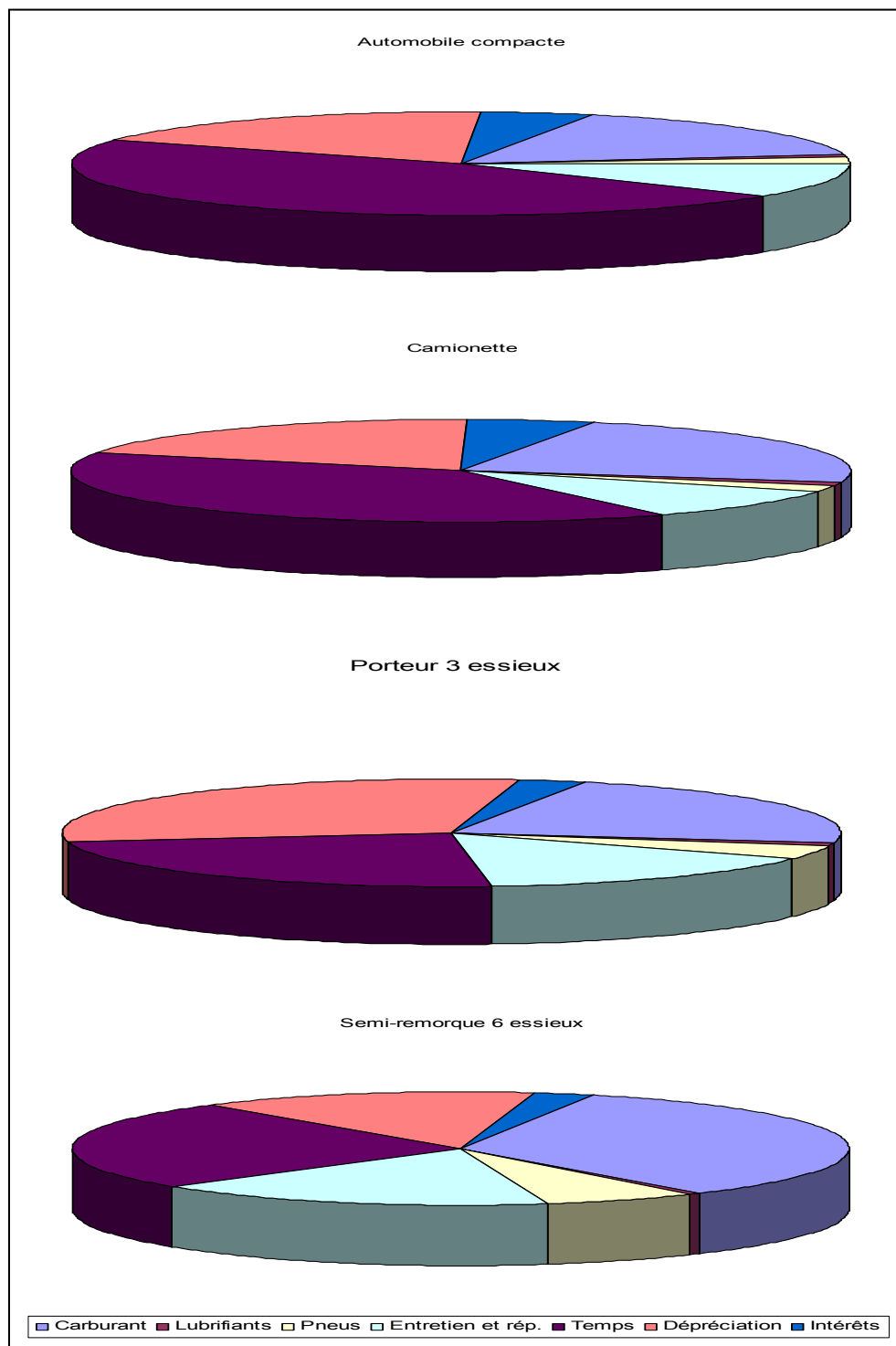


Figure 18.12 Distributions relatives des composantes des CEV (HDM-4).

18.3 Analyse comparative des résultats obtenus des deux systèmes

Pour des fins de comparaison, l'équivalence entre les différents indicateurs du confort au roulement a été déterminée selon l'équation fournie par le Service des orientations stratégiques (Beaulieu, 2005), soit la suivante :

$$PSR = 5 * \exp^{(-0.1909 * IRI)} \quad (18.1)$$

Le facteur de conversion utilisé pour le calcul des distances et des vitesses est de 1,6093 kilomètre pour 1 mille.

18.3.1 Vitesse en régime libre

Les prévisions effectuées par les modèles de prévision de la vitesse en régime libre sont différentes par le fait que celles effectuées à l'aide du HERS-ST sont basées sur la classe de route tandis que celles du HDM-4 sont désagrégées en fonction de la classe de véhicule.

Les résultats obtenus des simulations effectuées à l'aide des modèles sont semblables dans le cas des véhicules légers pour des valeurs de l'IRI de moins de 3 m/km. Par contre, le modèle du HDM-4 fournit des estimations de la vitesse en régime libre inférieures à celles du HERS-ST en ce qui concerne les camions moyens et lourds.

Le modèle du HERS-ST est considérablement sensible à l'état du revêtement. Pour des tronçons caractérisés par un revêtement dans un état médiocre (IRI de 7 m/km), les vitesses estimées sont substantiellement inférieures à celles fournies par le HDM-4, soit de l'ordre du double dans le cas des semi-remorques.

18.3.2 Coûts d'exploitation des véhicules

En se référant aux estimations effectuées par le HDM-4, les prédictions du HERS-ST effectuées pour un état du revêtement fixé pour un IRI de 3 m/km surestiment les CEV pour des vitesses élevées de l'ordre de plus de 45 ou 50 mph pour toutes les classes de véhicules à l'exception de celles des automobiles des types intermédiaire/grand format et des camionnettes.

Pour des vitesses élevées, les modèles du HERS-ST mènent à une diminution des CEV pour des valeurs d'IRI de plus de 4 m/km lorsqu'on tient compte des interactions entre l'état du revêtement et la vitesse en régime libre.

Pour des valeurs d'IRI de moins de 4 m/km, l'amplitude des CEV se compare relativement bien dans le cas des véhicules légers. Par contre, l'effet combiné d'une surestimation de l'impact de la vitesse des véhicules et de l'état du revêtement se traduit par une réduction des CEV en fonction de l'IRI lorsque l'état du revêtement passe de passable à médiocre. Les modèles du HDM-4 prédisent des coûts qui augmentent proportionnellement en fonction de la valeur de l'IRI.

À titre comparatif, les résultats obtenus relativement à 5 composantes des CEV pour les modèles du HDM-4 et du HERS-ST ont été compilés dans le Tableau 18.1. Ces résultats ont été obtenus pour une conduite à 100 km/h (62 mph) et une valeur d'IRI de 3 m/km (PSR de 2,907).

Tableau 18.1

Tableau comparatif des résultats du HERS-ST et du HDM-4
(Les valeurs sont indiquées en \$/km parcouru pour une conduite à
100 km/h et un IRI de 3 m/km.)

		Véhicules légers			Camions porteurs		Semi-remorques	
		Compacte	Intermédiaire	Camionnette	2 essieux	3 essieux	3-4 ess.	5 essieux
Carburant	HDM-4	0.060	0.073	0.084	0.163	0.238	N/A	0.389
	HERS-ST	0.051	0.099	0.125	0.172	0.215	0.473	0.516
	Var. (%)	14.6	-34.9	-49.5	-5.7	9.6	-	-32.5
Huile	HDM-4	0.003	0.004	0.006	0.005	0.011	N/A	0.008
	HERS-ST	0.006	0.006	0.004	0.009	0.008	0.008	0.012
	Var. (%)	-59.3	-52.4	27.4	-78.4	25.9	-	-63.9
Pneus	HDM-4	0.007	0.007	0.008	0.016	0.038	N/A	0.062
	HERS-ST	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.000	0.002
	Var. (%)	91.5	88.3	89.2	85.0	94.6	-	97.4
Entretien	HDM-4	0.039	0.046	0.045	0.097	0.175	N/A	0.195
	HERS-ST	0.055	0.055	0.067	0.156	0.164	0.200	0.232
	Var. (%)	-41.2	-19.9	-49.8	-60.4	6.3	-	-19.1
Dépréciation	HDM-4	0.068	0.108	0.084	0.198	0.364	N/A	0.175
	HERS-ST	0.063	0.074	0.028	0.108	0.180	0.057	0.072
	Var. (%)	7.7	31.3	67.0	45.5	50.6	-	59.0
TOTAL	HDM-4	0.177	0.238	0.227	0.479	0.826	N/A	0.828
	HERS-ST	0.175	0.235	0.225	0.448	0.569	0.738	0.834
	Var. (%)	1.2	1.3	0.5	6.6	31.1	-	-0.7

La Figure 18.13 présente l'évolution des CEV en fonction de la vitesse des véhicules en régime libre des modèles du HERS-ST, du HDM-4 ainsi que de celui proposé dans le *Guide de l'analyse avantages-coûts des projets routiers* (MTQ, 2005) dont les valeurs ont été actualisées pour l'année 2006. Ce modèle a originalement été développé en Colombie-Britannique à partir d'une adaptation du HDM-III et du ARFCOM (MoHT, 1996).

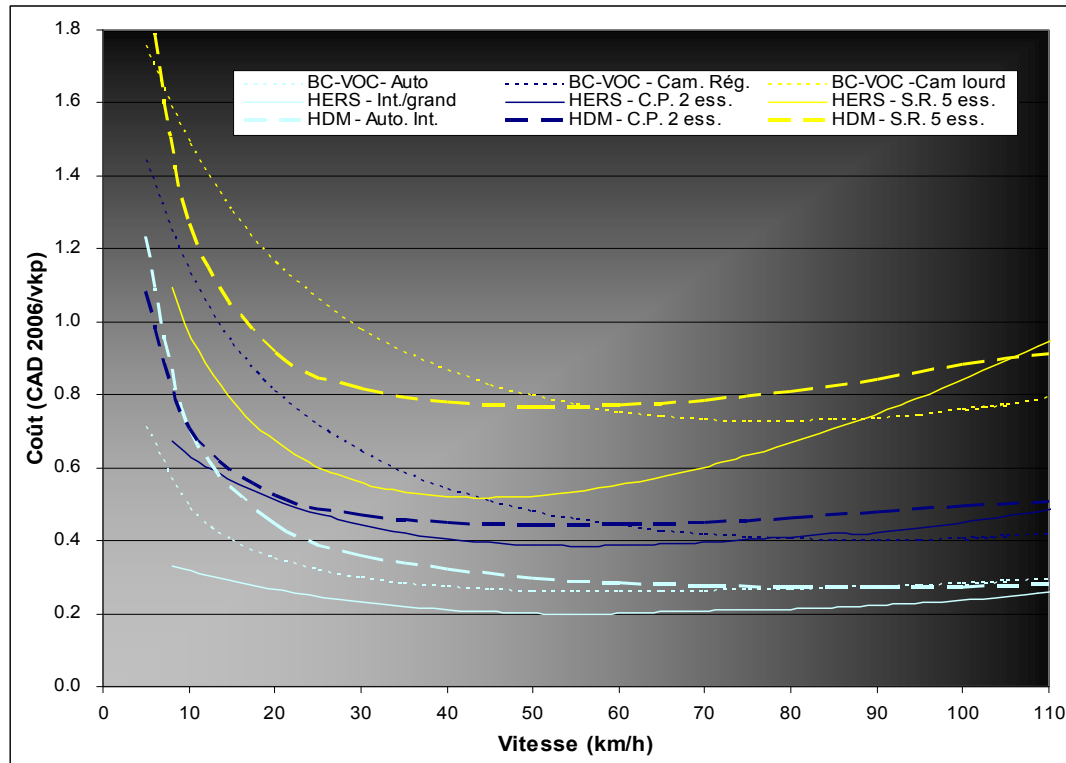


Figure 18.13 Analyse comparative des CEV en fonction de la vitesse.

18.3.3 Consommation de carburant et de lubrifiant

L'examen de l'évolution du taux de consommation de carburant en fonction de la vitesse de marche du véhicule permet de constater les limitations des modèles. Comme cela est illustré par un graphique présenté à la section 19.2, le modèle du HERS-ST ne semble pas représenter les changements technologiques qui ont pris place depuis l'étude menée par le TRDI en 1980 (Zaniewski, 1982). La modélisation mécanisto-empirique effectuée à l'aide du modèle du HDM-4 donne des résultats plus satisfaisants.

18.3.4 Usure des pneus

La sensibilité du modèle relativement à l'état du revêtement (i.e. IRI) est considérablement élevée si on la compare avec celle estimée à l'aide du HDM-4. À l'instar du modèle de la consommation de carburant, ce modèle exagère les coûts à des vitesses élevées.

18.3.5 Entretien et réparations

Le modèle du HERS-ST intègre le tracé en plan et la vitesse de marche des véhicules comme des variables indépendantes de modélisation des coûts en entretien et réparations des véhicules. Ainsi, la sinuosité du tracé en plan et la vitesse n'affectent pas les coûts d'entretien et de réparations du modèle du HDM-4 en raison des difficultés liées à la corrélation de l'influence de ces deux paramètres sur les CEV.

La sensibilité du modèle relativement à l'entretien et aux réparations des véhicules du HERS-ST selon l'état du revêtement est comparable à celle du HDM-4. À cet effet, les modèles du HERS-ST sont légèrement plus sensibles; à l'exception de la catégorie des camions porteurs qui sont caractérisés par une sensibilité à l'état du revêtement inférieure à celle du modèle correspondant du HDM-4.

18.3.6 Dépréciation et coûts en capital

Les deux modèles fournissent, par véhicule-kilomètre parcouru, des valeurs monétaires liées à la dépréciation plus élevée dans le cas des camions porteurs que pour celui des semi-remorques; en dépit de la moindre valeur de remplacement. Cela est tributaire du fait de l'utilisation annuelle (kilométrage) moins importante dans le cas des camions porteurs.

Le modèle du HERS-ST est sensible pour des faibles valeurs de l'IRI alors que HDM-4 ne présente aucune sensibilité pour des valeurs de 3 m/km et moins. Par contre, ce dernier modèle fournit une croissance des coûts marginaux, en matière de dépréciation liée à l'état du revêtement, plus élevée dans le cas d'un revêtement qui passe d'un état moyen à passable.

La Figure 18.14 présente un parallèle relativement à l'impact de l'état du revêtement sur le coût de la dépréciation des véhicules dans le cas des systèmes HEST-ST et HDM-4.

Erreur ! Liaison incorrecte.

Figure 18.14 Coûts marginaux de la dépréciation en fonction de l'IRI.

CHAPITRE 19

VALIDATION PRÉLIMINAIRE DES RÉSULTATS

Dans le cadre de ce projet de recherche, il est important de souligner que, en raison des moyens disponibles, aucune collecte préliminaire de données n'a été effectuée sur la route à partir de véhicules instrumentés. Aussi, bien que certaines données aient été amassées sur une base informelle auprès d'exploitants de flottes de véhicules, il n'est absolument pas possible de saisir l'influence de l'ensemble des facteurs qui influencent les coûts d'exploitation pour chaque type de véhicules. Par conséquent, le terme validation utilisé ici fait référence à l'évaluation de la performance des modèles paramétrés à l'égard de l'exactitude des résultats obtenus suivant une analyse comparative avec certaines valeurs publiées et largement reconnues.

Aussi, le présent chapitre traite exclusivement des estimations de Coûts d'Exploitation des Véhicules (CEV). La validation des autres types de coûts à la collectivité n'est pas abordée puisque 1) la modélisation du temps de transport passe par des équations générales dérivées des notions présentées dans le *Highway Capacity Manual* (TRB, 1997) et 2) les impacts environnementaux sont obtenus des données du MOBILE 6 QC-MOTREM qui a déjà fait l'objet de validations par le SMST (Babin, 2004).

L'évaluation de l'exactitude des résultats des modèles des CEV est effectuée à partir des valeurs qui sont tirées d'études particulières portant sur l'ensemble des coûts de fonctionnement des véhicules. Ces études, qui sont publiées sur une base régulière, sont :

- l'étude des coûts du camionnage au Canada de transports Canada (TC, 2003);
- l'étude des coûts d'utilisation d'une automobile au Canada produite pour l'association canadienne de l'automobile (CAA, 2005).

Dans le cas de la première étude citée, la comparaison des résultats porte sur les camions porteurs à 2 essieux, les semi-remorques comportant 5 essieux et les trains routiers du Type B (8 essieux). Cette dernière catégorie n'a pas fait l'objet d'une modélisation à l'aide du HERS-ST.

Les résultats présentés par la CAA (CAA, 2005) ont été utilisés pour des fins de comparaison avec les véhicules des types automobiles compacte et intermédiaire ainsi que pour les fourgonnettes (ou les camionnettes dans le cas du HERS-ST). Précisons que les valeurs présentées par CAA (2005) sont représentatives des véhicules *Chevrolet Cavalier Sedan* et *Dodge Caravane* équipés respectivement de moteur à quatre et six cylindres.

La comparaison entre les résultats obtenus par HDM-4 et HERS-ST avec les données du CAA (CAA, 2005) et celles de TC (TC, 2003) a été effectuée pour une route dont la vitesse maximum permise est de 90 km/h et un IRI de 3,0 m/km pour HDM-4 et un PSR de 2,9 pour HERS-ST⁷⁰.

La vitesse de fonctionnement des différents véhicules a été sélectionnée de manière respective avec celle prédite par le modèle HDM-4 pour ces mêmes conditions de conduite.

Nous avons retenu l'hypothèse de cette vitesse, car Babin (2006, page 76), rapporte qu'environ 75% des véhicule-kilomètres parcourus par les camions sont effectués à une vitesse de 90-100km/h, dont 50% à 100 km/h. Le choix des valeurs provenant des simulations faites pour une route caractérisée à 90 km/h semble le plus pertinent en vue d'obtenir des valeurs similaires à celles fournies par les études de coûts qui ont été retenues.

⁷⁰ Ces valeurs ne sont pas représentatives de l'état moyen actuel du réseau routier du MTQ; elles ont été retenues afin de représenter l'ensemble des routes au Québec et au Canada.

La Figure 19.1 présente la décomposition des CEV à partir des résultats des modèles du HERS-ST et du HDM-4 ainsi que des études identifiées antérieurement. Les résultats présentés tiennent uniquement compte des cinq composantes de coûts modélisées par le HERS-ST; soit celles liées au carburant, au lubrifiant du moteur, aux pneus, à l'entretien et à la dépréciation.

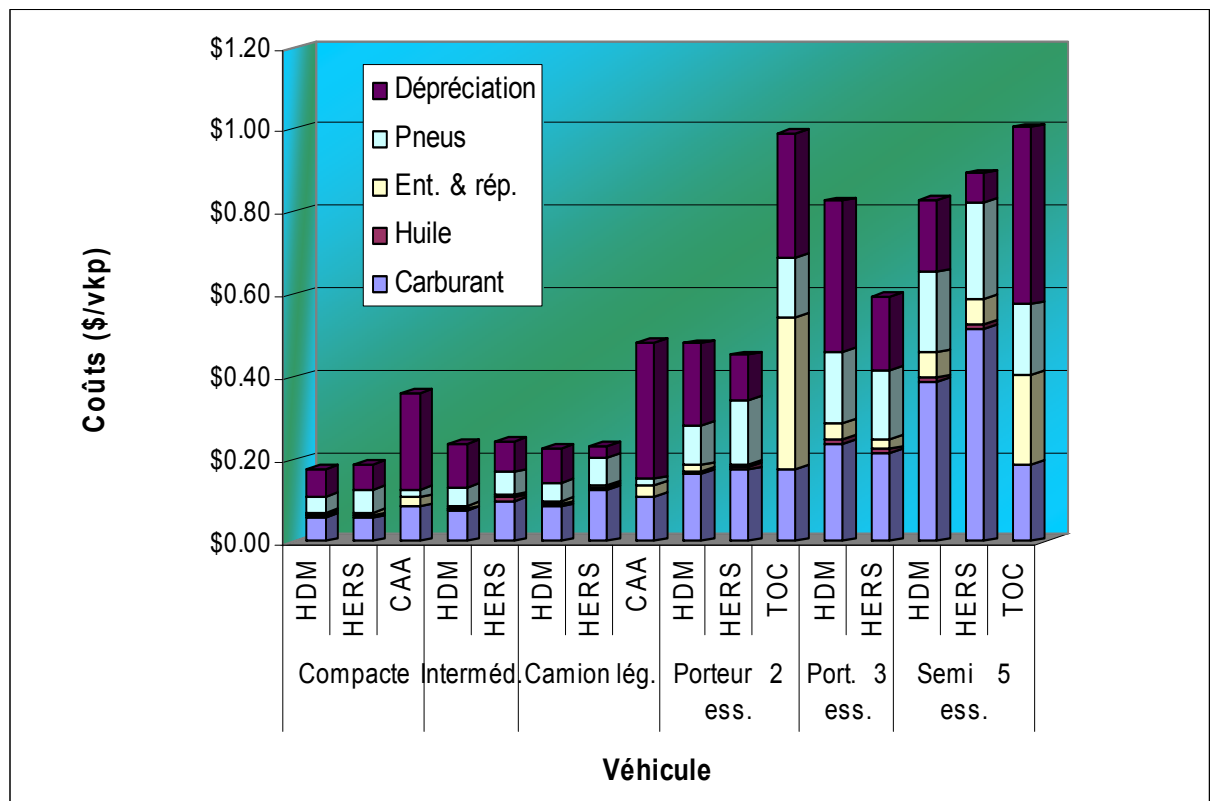


Figure 19.1 Comparaison entre les prédictions des modèles et les valeurs de référence.

(vitesse de 100km/h et IRI de 3m/km)

La figure précédente illustre certaines différences entre les valeurs relevées dans les études et les prédictions des deux modèles. Ces différences peuvent, en partie, être expliquées par l'utilisation de valeurs de coûts unitaires d'origine financière pour des années antérieures par TC (2003) et CAA (2005) (i.e. carburant, pneus, etc.).

Par contre, le fait que les conditions de conduite moyennes représentées par les études peuvent être différentes des conditions modélisées, c'est-à-dire une conduite sans encombrement et sans cycle de changement de vitesse, limite la précision de l'analyse de la validité des résultats obtenus par modélisation.

Cette représentation des résultats permet également d'apprécier le poids relatif de chaque composante de coût. Ceci met en évidence les différences relatives aux conditions de conduite spécifiques à chaque étude (i.e. vitesse en écoulement libre ou vitesse effective).

Les sections qui suivent fournissent un complément d'informations relativement à la validation des modèles individuels.

19.1 Estimation de la vitesse

Les valeurs de vitesse de référence présentées ici sont tirées des études réalisées en Colombie-Britannique (MoHT, 1996) et dans l'état de Washington (TRAC, 2004)). Dans le premier cas, les valeurs sont tirées des données d'études de vitesse menées par des administrations routières du Canada. Dans l'autre cas, les données ont été déterminées selon la méthodologie présentée dans l'édition 2000 du «*Highway Capacity Manual*». Ces valeurs sont, généralement, de l'ordre de 10 kilomètres par heure supérieures à la vitesse maximale prescrite⁷¹.

À la page suivante, le Tableau 19.1 présente les données présentées dans MoHT (1996) qui sont, en partie, tirées d'autres sources d'informations relativement à des relevés de vitesses menés dans quatre provinces au cours des années 86 à 90. La première ligne

⁷¹ Selon TRAC (2004), pour des conditions non contraignantes (i.e. largeur des voies, largeur des accotements et dégagement latéral suffisants, nombre minimal d'accès), la vitesse en régime libre est supérieure d'environ 11 km/h à la limite de vitesse lorsqu'elle est de 70 km/h alors qu'elle serait supérieure de 8 km/h pour les routes à 90km/h.

présente les plages de valeurs estimées pour les différentes classes de véhicules par le modèle paramétré du HERS-ST alors que les deux lignes suivantes présentes celles obtenues à l'aide du HDM-4.

Tableau 19.1

Vitesse en régime libre en fonction de la législation

		Vitesse prescrite (km/h)				
Véhicule		50	70	80	90	100
Prévisions HERS-ST		60	70-75	---	100-105	115
Prévisions HDM-4	Véh. Lég.	58-60	78-83	---	94-104	105-112
	Camions	58-60	78-83	---	94-104	105-112
Moyenne	Automobiles	<i>n/d</i>	<i>n/d</i>	<i>n/d</i>	90-93	98-103
	Camions	<i>n/d</i>	<i>n/d</i>	<i>n/d</i>	94-103	94-105
	Véhicules	<i>n/d</i>	<i>n/d</i>	84-93	93-101	97-109
85 ^e percentile	Automobiles	<i>n/d</i>	<i>n/d</i>	<i>n/d</i>	105-115	105-111
	Camions	<i>n/d</i>	<i>n/d</i>	<i>n/d</i>	99-104	105-114
	Véhicules	<i>n/d</i>	<i>n/d</i>	93-101	103-109	106-119

19.2 Carburant

La Figure 19.2 dresse une comparaison des résultats des estimations de consommation de carburant des modèles HERS-ST et HDM-4 avec ceux intégrés au MOBILE 6QC-MOTREM⁷². Elle présente la consommation, exprimée en litres par 100 kilomètres parcourus, pour les semi-remorques.

⁷² Les valeurs des modèles HDM-4 et HERS-ST sont présentées pour des conditions de conduites sans entrave par la circulation (déplacement des véhicules en régime libre) alors que celles

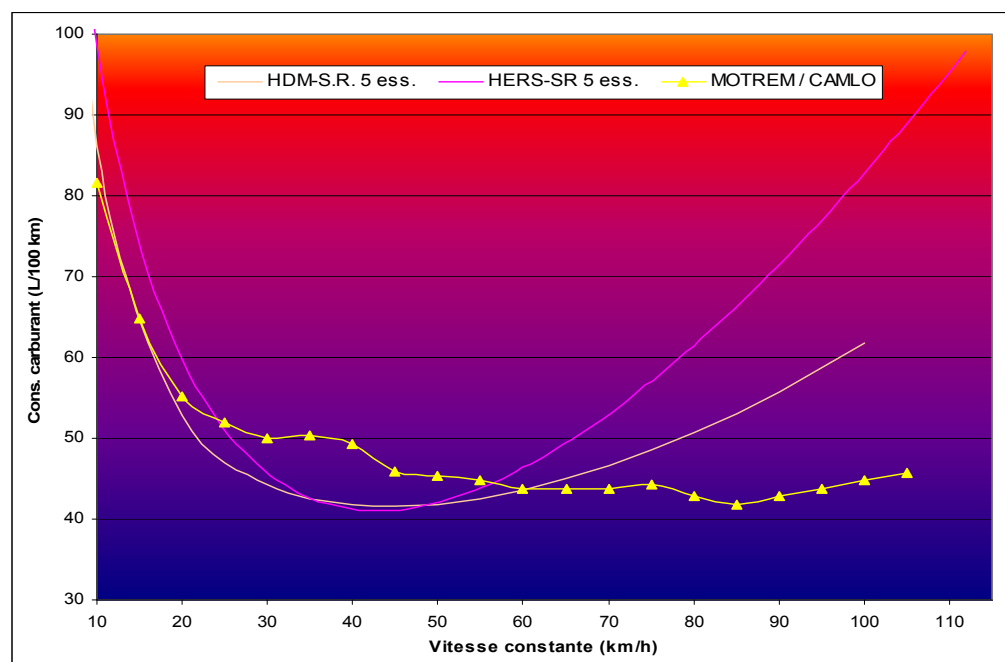


Figure 19.2 Consommation comparée de carburant en fonction de la vitesse.

Comme cela a déjà été évoqué, le modèle intégré au HERS-ST semble dépassé. Dans le cas du HDM-4, un étalonnage plus rigoureux du paramètre de la consommation de carburant lors du fonctionnement du moteur au ralenti serait susceptible de corriger les écarts avec les données du MOTREM.

19.3 Lubrifiant

Les études identifiées ne portent pas sur les coûts en lubrifiant de manière distincte. Ces coûts sont comptabilisés avec ceux relatifs à l'entretien et aux réparations des véhicules. Toutefois, bien que ces coûts soient minimes, l'intérêt de leur modélisation demeure pour des raisons pratiques liées au paramétrage des modèles et au relevé éventuel auprès de gestionnaires de flottes de véhicules.

relevés à partir d'un fichier fournis par le SMST ont été obtenues à partir de l'instrumentation de voitures flottantes circulant sur le réseau.

Par ailleurs les valeurs identifiées lors des sondages ponctuels auprès d'exploitants de flottes se situent à l'intérieur d'une plage de 15 % des valeurs modélisées par HDM pour les semi-remorques.

19.4 Pneus

Dans le cas des véhicules légers, les coûts par véhicule-kilomètre parcouru résultants des simulations sont inférieurs aux valeurs fournies par la CAA (CAA, 2005). Cela est probablement dû aux coûts élevés des pneus utilisés dans cette étude qui s'élève à 799\$ (CAD en 2005) pour quatre pneus (comparativement à des valeurs de l'ordre de 500\$ à 550\$ pour cette étude).

Dans le cas des camions lourds, les valeurs obtenues à l'aide des modèles sont également inférieures à celles fournies par l'étude des coûts de fonctionnement des camions produite par Transports Canada (TC, 2003). Un facteur explicatif probable est que les modélisations effectuées sont représentatives des conditions de conduite en régime libre sur une section de route en alignement plat (sans sinuosité ou vallonnement).

19.5 Entretien et réparations

Le Tableau 19.2 présente, à titre indicatif, certaines valeurs estimées à l'égard des coûts en entretien et en réparation des véhicules. Les valeurs de référence ont été déterminées à partir des informations fournies par les diverses études identifiées.

Tableau 19.2

Valeurs relatives à l'entretien et aux réparations des véhicules
(Pourcentage de la valeur de remplacement du véhicule par 1000 VKP)

Type de véhicule	Prévision HDM-4	Desrosiers	Deloitte (2004)*	Papagiannakis (1999)*
Automobiles	0,0749	0,0779	-	-
Camionnettes	0,0816	0,0636	-	-
Porteurs	0,0757	-	0,0781 / 0,1228	-
Semi-remorques	0,0737	-	-	0,0324

* Valeurs déduites à partir des informations fournies dans la documentation.

Le Tableau 19.3 présente certaines valeurs relatives au nombre d'heures par 1000 véhicule-kilomètres parcourus consacrées à l'entretien et aux réparations des véhicules. Ces valeurs ont été déduites selon les informations de nature économique ainsi que celles relatives à l'utilisation des véhicules présentées dans les sources identifiées.

Tableau 19.3

Heures consacrées à l'entretien (heures par 1000 VKP)

Type de véhicule	Prévision HDM-4	Desrosiers (2003)	Deloitte (2004)*	Papagiannakis (1999)*	MTQ (2000)
Automobiles	0,43	0,41	-	-	-
Camionnettes	0,37	0,41	-	-	-
Porteurs	0,61 / 1,21	-	1,18	-	-
Semi-remorques	1,05	-	-	0,59	0,99

* Valeurs estimées à partir des informations fournies dans la documentation relative et en fonction de certains coûts unitaires présentés dans ce document.

19.6 Dépréciation

Il y a deux facteurs principaux qui doivent être pris en compte lors de la comparaison des résultats : 1) la méthode de calcul de la dépréciation préconisée et 2) la période d'amortissement considérée. Pour ces raisons, en particulier la seconde, les coûts attribuables à la dépréciation s'avèrent difficiles à valider.

D'une part, les coûts en capital inclus dans les études tiennent compte à la fois de la dépréciation qui est liée à l'âge du véhicule et à celle relative à l'utilisation. Tributaires de la méthodologie du TRDF (Zaniewski, 1982), les modèles du HERS-ST considèrent exclusivement les coûts associés à l'utilisation des véhicules et fournissent des valeurs inférieures à celles incluses dans les études.

Aussi, les résultats obtenus sont représentatifs d'une conduite non entravée par la circulation et, pour plusieurs cas, relatifs à des vitesses de déplacement élevées. Ainsi, les valeurs peuvent sembler sous-estimer les coûts moyens qui sont généralement associés à des conditions de conduites caractérisées par une vitesse de déplacement moyenne inférieure à celles des tronçons de route étudiés, par des départs et des arrêts fréquents ainsi que, dans le cas des camions, des temps d'attente lors des opérations de chargement et de déchargement.

D'autre part, la période d'amortissement considérée dans les études financières est plus courte que celle préconisée dans la présente étude. Les pratiques fiscales des entreprises propriétaires de flotte peuvent figurer parmi des raisons à invoquer pour expliquer cette réalité. Dans le cas de l'étude de la CAA (2005), la période considérée semble suivre la même logique en considérant une période de dépréciation de quatre années. Ceci a comme conséquence de surestimer les coûts en dépréciation si on les compare aux méthodologies des modèles utilisés dans l'étude.

Bref, l'utilisation d'une période de dépréciation plus longue est plus représentative de la situation du marché de l'automobile et des habitudes des propriétaires de véhicules pour lesquels la fiscalité ne joue pas nécessairement un rôle prédominant par rapport aux habitudes de remplacement de véhicules.

CHAPITRE 20

INTÉGRATION DES RÉSULTATS

Ce chapitre traite, en grande partie, des exigences du ministère des Transports du Québec qui ont été formulées dans le cadre d'un mandat de recherche portant sur l'adaptation des modules des coûts aux usagers du HERS-ST et du HDM-4 (chapitre 1). Plus particulièrement, il fait suite aux deux principaux objectifs terminaux du projet, soit : 1) la proposition d'une pondération des indices de performances intégrant les coûts aux usagers à l'aide du HERS-ST ainsi que 2) l'élaboration d'une procédure d'intégration des résultats du module des coûts aux usagers du HDM-4 au système de gestion des chaussées du MTQ (GCH-6011).

20.1 Indicateurs de performance des coûts aux usagers (SOS)

Le système HERS-ST offre, parmi ses fonctionnalités, la possibilité d'attribuer des facteurs de pondération à diverses catégories de coûts et de bénéfices qui sont comptabilisés dans le cadre des procédures d'analyse internes au logiciel (i.e. mise en œuvre des interventions, entretien des infrastructures, coûts de fonctionnement des véhicules, etc.). Ces facteurs sont définis par l'utilisateur du logiciel en fonction de ses préférences au niveau de l'atteinte des objectifs de performance pour lesquels il accorde plus de priorités. Ces objectifs sont alors évalués à partir de seuils déterminés, qui sont intégrés aux procédures de calculs du Ratio Bénéfices-Coûts (RBC) et du ratio bénéfices-coûts marginal. Évidemment, l'adoption d'une pondération particulière aura une influence sur la liste et l'ordonnancement des interventions en réponse aux priorités identifiées.

À ce titre, la Figure 20.1 ci-dessous illustre l'interface qui est accessible à l'utilisateur, à partir du menu des données de contrôle du HERS-ST et qui sert à introduire les facteurs de pondération relatifs aux composantes de coûts intégrées à l'analyse de performance. L'interface qui concerne le ratio bénéfices-coûts marginal est similaire à celui présenté ci-dessous, à la différence qu'il n'y a pas la possibilité d'affecter une pondération en ce qui a trait à la fréquence des accidents.

	Rural Int.	Rural OPA	Rural MA	Rural Col.	Urban Int.	Urban Exp.	Urban OPA	Urban MA	Urban Col.
Operating Cost	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Travel-Time Cost	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Property Damage	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Injury Cost	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Crash-Delay Cost	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fatality Cost	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Number of Crashes	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Number of Injuries	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Number of Fatalities	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maintenance Cost	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Emissions Cost	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 20.1 Interface d'entrée des facteurs de pondération (HERS-ST).

Le Service des orientations stratégiques (MTQ) a exprimé son intérêt à évaluer les répercussions ou la sensibilité sur les résultats des analyses qui sont liés aux trois catégories de coûts suivantes :

- Les coûts de fonctionnement des véhicules (*operating cost*);
- Les coûts reliés au temps de transport (*travel-time cost*);
- Les coûts liés aux effets des émissions polluantes (*emissions cost*).

En vue de dresser une réflexion complète sur les résultats des analyses de performance, il faut ajouter, aux catégories précédentes, celles relatives aux coûts d'entretien des infrastructures ainsi qu'aux coûts initiaux attribuables à la mise en œuvre des interventions qui ne peuvent pas être écartés des procédures d'évaluation de la rentabilité des interventions. Pour certains scénarios, les coûts attribuables aux incidents routiers, qui sont désagrégés en fonction des dommages (perte de vie, blessures et matériel) et des délais conséquents, ont également été considérés.

Conformément aux conseils des responsables de la FWHA et des développeurs⁷³ du HERS-ST, l'expérimentation de ces indicateurs de performance a été effectuée en attribuant des valeurs de 0 ou de 1. À la base de la méthodologie développée pour HERS (version nationale), il s'agit tout simplement de considérer ou d'exclure les différentes catégories de coûts des analyses de la performance en vue de l'atteinte des objectifs formulés lors des simulations. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser des valeurs intermédiaires.

Précisons que, à l'instar des paramètres par défaut du système HERS-ST v.4.2, la version nationale du HERS intègre une valeur de 1,0 pour les différents facteurs, à l'exception de ceux concernant les émissions polluantes dont la valeur est nulle; ces coûts n'étant généralement pas ciblés lors des analyses sur l'état et la performance du réseau routier national. Rappelons que ces coûts peuvent augmenter en fonction de l'amélioration de la performance du réseau routier (i.e. augmentation de la vitesse des véhicules et diminution du ratio débit-capacité) puisque les impacts environnementaux relatifs aux interactions entre les véhicules ne sont pas considérés par le HERS-ST⁷⁴. Il en va de même pour les coûts d'exploitation des véhicules.

De plus, puisque les coûts et les bénéfices s'avèrent être de bons indicateurs en vue de l'évaluation des scénarios d'interventions, l'attribution de valeurs supérieures à 1,0 à certaines composantes de coûts n'a pas été envisagée afin d'éviter de biaiser le potentiel d'appréciation économique de l'outil d'analyse. Concrètement, il ne serait pas viable, et pourrait être qualifié de biais prononcé, d'attribuer une pondération de 2,0 à la composante des coûts d'entretien par l'administration alors qu'une valeur de 1,0 serait attribué aux composantes relatives aux coûts aux usagers et à la collectivité.

⁷³ Selon les recommandations de M. Herbert Weinblatt de la firme *Cambridge Systematics, Inc* (courriel transmis le 24 août 2006).

⁷⁴ Les modèles tiennent compte de la vitesse de déplacement des véhicules sans considérer le niveau de circulation.

Finalement, il est indiqué de souligner que la fonction d'analyse sous contrainte de la performance du HERS-ST ne permet pas d'effectuer une analyse de type multicritères; il ne s'agit pas de confronter une composante de coût par rapport à une autre mais, plutôt, d'atteindre un objectif de performance cohérent en terme de coût par véhicule-mille parcouru.

20.1.1 Résultats obtenus

Dans le cadre de l'expérimentation du HERS-ST, une série d'analyses a été réalisée afin de saisir l'importance des différents types de coûts sur la performance globale du réseau routier; c'est-à-dire sur la rentabilité économique des stratégies d'interventions. Les analyses ont été menées en fonction des différentes composantes de coûts mentionnées précédemment en les prenant chacune individuellement ou en combinaison d'au moins deux composantes.

Les indicateurs économiques colligés sont les coûts totaux liés à la mise en œuvre des interventions, le RBC et la quantification des voie-milles améliorées. Les moyennes, pour tout le réseau routier, de l'indice PSR, de la vitesse des véhicules, des délais et du nombre de milles hors norme font également partie des données compilées.

Il ressort des multiples analyses réalisées à l'aide du HERS-ST que les coûts moyens, exprimés en fonction de l'état initial de l'ensemble du réseau routier, sont estimés pour toutes les catégories de véhicules confondues à :

- 339 \$/1000 VMP en ce qui concerne les Coûts d'Exploitation des Véhicules (CEV);
- 580 \$/1000 VMP pour les coûts reliés au temps de transport (CTT);
- 129 \$/1000 VMP pour les coûts attribuables aux accidents (CA), soit ceux reliés à la mortalité, aux blessures, aux dommages matériel et aux délais;
- 1 048 \$/1000 VMP pour l'ensemble des coûts aux usagers;
- 22 \$/1000 VMP pour les coûts attribuables aux émissions (CE);
- 44 328 \$/mille en coûts d'entretien des infrastructures.

Ces coûts doivent être considérés en vue de l'analyse des résultats.

Les résultats, sont compilés pour une période d'analyse de 20 ans ont été générés pour diverses combinaisons de composantes de coûts et de la valeur de l'objectif de performance. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 20.1.

Tableau 20.1

Analyse de contrainte par performance par catégories de coûts

	Description	Coûts visés (\$/VMP)	Composantes de coûts						Données – INTERVENTIONS		
			CEV	Temps	Incidents dommages	Incidents délais	Émissions	Entretien	Coûts totaux des interventions (k \$)	Voie-milles améliorées	Ratio B/C moy.
1	Maintien de la performance initiale	-	X	X	X	X	X	X	472 031	926	11,508
2	CEV	0.3	X						2 234 461	8 294	2,585
3	CEV-MT	0.3	X					X	1 801 526	6 470	2,777
4	CEV-MT	0.4	X					X	0	0	0
5	CEV-TTC-MT	0.9	X	X				X	2 169 679	6 992	6,833
6	CEV-TTC-CDC-MT	0.9	X	X		X		X	2 169 679	6 992	6,833
7	CEV-TTC-CDC-MT	1.0	X	X		X		X	0	0	0
8	Tous sauf CRASH	0.9	X	X		X	X	X	2 169 679	6 992	6,822
9	Tous sauf EC	1.0	X	X	X	X		X	2 460 018	7 260	6,585
10	Tous	1.0	X	X	X	X	X	X	2 460 018	7 260	6,585
11	Tous	1.1	X	X	X	X	X	X	267 914	441	63,568
12	Tous	1.2	X	X	X	X	X	X	0	0	0

Une analyse de la sensibilité de la valeur de l'objectif de performance, exprimée selon un coût par véhicule-mille parcouru (VMP), a été effectuée en vue de faciliter l'identification de la valeur d'objectif le plus pertinent. Le Tableau 20.2 présente certains résultats de cette analyse.

Tableau 20.2

Analyse de contrainte par performance par coûts visés

Analyse	Types de composantes de coûts	Coûts visés (\$/VMP)	Données sur les interventions			Niveau de service (fin de la 4 ^e période d'analyse)	
			Coût des interventions (k \$)	Voie-milles (interventions)	Ratio B/C moy.	PSR moy.	PSR (% VMP déficients)
1	CEV & entretien des infrastructures	0,1	2 234 461	8 294	2,585	3,441	6,289
2		0,2	2 234 461	8 294	2,585	3,441	6,289
3		0,3	2 234 461	8 294	2,585	3,441	6,289
4		0,4	0	0	0	3,106	39,532
5		0,5	0	0	0	3,106	39,532

20.1.2 Analyse des résultats

Les résultats présentés dans les Tableaux 20.1 et 20.2 mettent en évidence une sensibilité limitée quant à la valeur des différents indicateurs retenus en vue de l'analyse des résultats. Trois facteurs explicatifs ont été identifiés relativement à ce constat :

- 1) Au niveau de la sensibilité des résultats relativement à la valeur de l'objectif de performance, on ne constate aucun changement des indicateurs pour plusieurs itérations. Cela se produit lorsque l'objectif minimal de performance est atteint pour la combinaison de coûts analysés; c'est-à-dire que l'objectif visé est trop petit. Néanmoins, comme cela est évoqué au troisième point, une méthodologie d'analyse plus optimisée au niveau de chaque section pourrait mener à l'obtention de résultats différents.
- 2) Les analyses effectuées démontrent des résultats similaires pour différentes combinaisons de composantes de coûts dans le cas d'une valeur constante de l'objectif de performance. Cela s'explique du fait de la valeur négligeable de certaines composantes de coûts et de l'influence limitée de ces dernières relativement au RBC généré par la mise en œuvre des interventions identifiées par le système. Il ressort des analyses effectuées que les composantes de coûts ayant une influence négligeable sont

celles relatives aux retards dus aux incidents routiers et aux impacts des émissions polluantes.

3) Dans la procédure d'analyse du HERS-ST, la présélection et l'ordonnancement primaire des interventions sont effectués dans le but de corriger les déficiences identifiées sur chacune des sections en maximisant le RBC. À cette étape du processus, les interventions ne sont ni retenues suivant l'objectif de performance visé, ni selon le plus bas coût de mise en œuvre d'une intervention permettant d'atteindre l'objectif de performance visé et ni pour maximiser les bénéfices relatifs aux composantes sélectionnées. Il s'avère que, sur la base de la maximisation du RBC, une intervention peut-être sélectionnée et permettre le dépassement de l'objectif de performance alors qu'une intervention moins onéreuse caractérisée par un RBC plus bas que la première pourrait permettre d'atteindre l'objectif de performance de manière plus serrée. Cela pourrait minimiser encore plus les coûts de mise en œuvre des interventions en fonction de la valeur de l'objectif de performance. Bref, la procédure d'analyse du HERS-ST ne permet pas l'évaluation de la contrainte de performance pour chaque section prise individuellement mais en fonction de l'ensemble ou d'une partie du réseau routier pour chaque période d'analyse.

Évidemment, les commentaires formulés ne visent pas à remettre en question la méthodologie intégrée au HERS-ST mais, plutôt, à identifier un facteur explicatif relativement aux résultats obtenus, qui peut avoir comme effet de limiter la variation au niveau de résultats obtenus, et d'explicitier une méthodologie d'analyse sous contrainte de la performance plus optimale. L'imprécision soulevée doit toutefois être mieux prouvée par l'exécution d'une analyse d'envergure nécessitant le développement d'un outil distinct. En raison de l'envergure du travail requis, il n'a pas été envisagé d'entreprendre une telle démarche dans le cadre de la présente étude

En ce qui a trait aux indicateurs les plus sensibles aux composantes de coûts visés sélectionnées, les deux constatations suivantes sont justifiées :

1) La sélection de la composante des coûts d'exploitation des véhicules (*vehicle operating costs*) permet de maximiser l'amélioration de l'état du revêtement; soit de maximiser la valeur de l'indicateur PSR.

2) La sélection de la composante des coûts attribuables au temps de transport (*travel time costs*), prise individuellement ou en combinaison avec d'autres composantes, mène à la maximisation de la fluidité de la circulation; elle a pour effet de minimiser le ratio débit-capacité. En comparaison avec celle des CEV, cette composante de coûts favorise également les interventions relatives aux aménagements géométriques (normalisation des courbes et des pentes).

Aussi, l'intégration de la composante des coûts attribuables au temps de transport engendre un RBC moyen supérieur à celui obtenu d'une analyse de la performance portant exclusivement sur les CEV. Dans ce cas, les interventions permettant l'amélioration de la fluidité (élargissement, ajout de voie et réaménagement des accotements) sont nettement priorisées par le système.

À la lumière des résultats compilés, il s'avère toutefois délicat de formuler arbitrairement une règle ou une pondération spécifique des différentes composantes de coûts intégrées à l'analyse sous contrainte de la performance en vue d'un usage éventuel par l'administration routière.

Évidemment, l'analyse des résultats obtenus, selon les différents scénarios réalisés, doit tenir compte de certaines limitations quant à l'exactitude des prévisions effectuées par le HERS-ST. Comme cela a déjà été mentionné (section 20.1), il est primordial de s'assurer de l'exactitude de l'évaluation des coûts et des bénéfices par HERS-ST pour l'ensemble des conditions de circulation des véhicules en vue de maximiser la précision des analyses qui seront effectuées; particulièrement en ce qui a trait aux CEV et aux impacts des émissions polluantes. Rappelons également que la répartition par catégorie de véhicules de la flotte n'est pas caractéristique du réseau québécois et que le modèle de dégradation des chaussées, qui repose sur une équation de l'AASHTO, est différent de ceux intégrés au système de gestion des chaussées (GCH-6011) exploité par le Ministère. Évidemment, il est

possible d'envisager que ces deux contraintes puissent être levées au bénéfice des résultats et de leur fiabilité.

20.2 Production des équations de coûts (Service des chaussées)

L'intégration du calcul des coûts d'exploitation des véhicules au système de gestion des chaussées (GCH-6011) impliquait la production d'une série d'équations servant à les estimer. Cette méthodologie simplifiée ne permet pas de considérer, en fonction de variables indépendantes, l'ensemble des facteurs influençant les coûts d'exploitation des véhicules (CEV). Toutefois, en corrélation avec la mission du SC, elle permet l'estimation des derniers en fonction des facteurs qui sont pertinents. Ces équations permettent au GCH-6011 de calculer les coûts aux usagers pour chaque segment de chaussée.

À titre de rappel, voici les principaux paramètres pris en considérations :

- le débit de circulation;
- la catégorie de véhicule;
- la distribution des différentes catégories de véhicules;
- la classe de route;
- la vitesse de déplacement estimée des véhicules;
- l'uni (IRI).

Comme cela a été présenté au chapitre 11, la distribution relative de la fréquence des 13 différentes classes de véhicules représentatifs ne peut être déterminée de manière désagrégée sur chaque lien routier (pour des raisons d'indisponibilité des données). Alors, d'un point de vue pratique, les différentes classes de véhicules ont, d'abord, été regroupées selon trois catégories principales : les véhicules légers, les camions porteurs et les semi-remorques. La distribution des différentes classes de véhicules au sein de chacune de ces catégories est tributaire de celles de la base des enregistrements de la SAAQ et de l'ERN de 1998 (MTQ, 1998). Par contre, le FMR ne fournissant que le pourcentage relatif de l'ensemble des véhicules lourds sur les sections, il s'avère ainsi impossible de faire la

distinction entre les camions porteurs et les semi-remorques de manière similaire au fichier de données du HPMS.

À partir des données fournies par le Service des orientations stratégiques (Beaulieu, 2006b), une compilation intermédiaire de la distribution relative des deux catégories de camions a été établie en fonction de la classe fonctionnelle et du milieu. Bref, la structuration de la distribution finale en vue de la définition des équations de coûts a été faite selon deux catégories de véhicules :

- les véhicules légers (automobiles et camionnettes);
- les camions lourds (porteurs et semi-remorques).

Toujours en référence au chapitre 11, la distribution relative des différentes classes de véhicules sur l'ensemble du réseau ne peut pas être utilisée pour chacun des tronçons routiers. Ainsi, des distributions types des différentes classes de véhicules ont été établies à partir de facteurs discriminants identifiés lors de l'analyse des données de comptages agrégées transmises par le Service des orientations stratégiques (MTQ).

Certains des facteurs déterminants de la distribution relative des différents types de véhicules sont le milieu (i.e. urbain ou rural) et la classe fonctionnelle. À cet égard, des regroupements ont été effectués en vue de simplifier la procédure de modélisation des CEV. Un résumé des procédures effectuées est présenté par les points qui suivent.

1) Le milieu dans lequel se trouve la route a été identifié comme discriminant de la distribution des différents véhicules; la proportion de camions étant plus importante en milieu rural.

2) Parmi les différentes classes fonctionnelles de routes, les autoroutes génèrent plus de déplacements longue distance. Par conséquent, les camions semi-remorques sont une composante importante sur ce type de lien.

3) Il a été jugé impertinent d'attribuer à chacune des autres classes fonctionnelles des distributions moyennes puisque qu'aucune distinction ne peut être faite, à la grandeur du territoire québécois, pour chacune des classes fonctionnelles. Ainsi, une distribution moyenne commune à tous les types de routes, les autoroutes exclues, a été établie en fonction du milieu.

4) Aux paramètres de la classe fonctionnelle et du milieu, s'ajoute la limite de vitesse qui est un facteur déterminant de l'importance des CEV. La limite de vitesse a une influence directe sur la vitesse effective des véhicules et, par conséquent, sur les coûts de fonctionnement des véhicules.

Les facteurs retenus ont mené au regroupement de l'ensemble des tronçons routiers selon les huit types de liens suivants :

- autoroute en milieu rural (100 km/h);
- autoroute en milieu urbain (100 km/h);
- autres routes en milieu rural (90 km/h);
- autres routes en milieu urbain (90 km/h);
- autres routes en milieu rural (70 km/h);
- autres routes en milieu urbain (70 km/h);
- autres routes en milieu rural (50 km/h);
- autres routes en milieu urbain (50 km/h).

Le Tableau 20.3 indique la distribution pour chacune des deux catégories de véhicules représentatifs en fonction des différents types de routes adoptés.

Tableau 20.3

Distribution des véhicule-kilomètres
par catégorie de camions

		C. Porteurs	C. Articulés
Rural	Autoroute	32.7%	67.3%
	National	39.4%	60.6%
	Régionale	55.2%	44.8%
	Collectrice	37.8%	62.2%
Urbain	Autoroute	47.1%	52.9%
	National	47.1%	52.9%
	Régionale	61.9%	38.1%
	Collectrice	69.1%	30.9%
Moyenne		48.8%	51.2%

Source : Adapté des données fournies par le SOS

Pour chaque type de liens ainsi que pour chaque classe de véhicules, des équations ont été produites à partir de la modélisation des CEV réalisée à l'aide des modèles du HDM-4. La structure générale des équations du modèle suit une forme polynomiale de troisième degré. Cette procédure permet une analyse de régression des résultats simple, uniforme et précise pour l'ensemble des véhicules. Les résultats obtenus à partir de cette structure d'équation sont satisfaisants relativement aux coefficients de régression (R^2) et à la distribution du bruit pour les différentes classes de véhicules.

Cette première équation qui sert à estimer les CEV en fonction de l'IRI est présentée ci-dessous. Rappelons que la vitesse de déplacement est modélisée en fonction de l'IRI et d'autres caractéristiques de la route à partir d'un modèle de prévision probabiliste de la vitesse; la valeur de cette vitesse est sous-jacente au modèle présenté ici. Les détails portant sur l'analyse des résultats des équations et des modèles du HDM-4 sont présentés dans Roy (2007b).

L'équation suivante permet d'estimer les CEV pour chaque catégorie de véhicule :

$$CEVU_{jk} = a0_{jk} + a1_{jk} (IRI) + a2_{jk} (IRI)^2 + a3_{jk} (IRI)^3 \quad (20.1)$$

$CEVU_{jk}$ coût de fonctionnement du véhicule k sur une route du type j ,
exprimé en \$ de 2006

IRI indice de rugosité internationale (m/km)

$a0_{jk}$, $a1_{jk}$, $a2_{jk}$ et $a3_{jk}$ coefficients du modèle polynomial pour le véhicule k sur la
route j .

Les coefficients des équations pour les véhicules légers et les camions sont présentés dans le Tableau 20.4.

Tableau 20.4

Coefficients des équations de coûts d'exploitation des véhicules

			CEV (\$) en fonction de l'IRI (m/km)			
			CEV = a0 + a1*IRI + a2*IRI ² + a3*IRI ³			
			a0	a1	a2	a3
Rural	100 km/h	Automobiles	0,38116166	-0,00725084	0,00282656	-5,6107E-05
		Camions	1,09481970	-0,01818232	0,00690888	-0,00014385
	90 km/h	Automobiles	0,39847694	-0,00987906	0,00295441	-5,8112E-05
		Camions	1,03940909	-0,01214377	0,00635551	-0,00013296
	70 km/h	Automobiles	0,46361587	-0,01772901	0,00322846	-6,0538E-05
		Camions	1,05711194	-0,01299434	0,00629732	-0,00013029
	50 km/h	Automobiles	0,57494727	-0,01997400	0,00262338	-3,9241E-05
		Camions	1,19698460	-0,02345263	0,00625101	-0,00012006
Urbain	100 km/h	Automobiles	0,38116166	-0,00725084	0,00282656	-5,6107E-05
		Camions	1,05057101	-0,01611689	0,00664246	-0,00013941
	90 km/h	Automobiles	0,39847694	-0,00987906	0,00295441	-5,8112E-05
		Camions	0,99710537	-0,01079008	0,00613602	-0,00012957
	70 km/h	Automobiles	0,46361587	-0,01772901	0,00322846	-6,0538E-05
		Camions	1,01939420	-0,01211682	0,00609061	-0,00012693
	50 km/h	Automobiles	0,57494727	-0,01997400	0,00262338	-3,9241E-05
		Camions	1,15727548	-0,02089767	0,00590255	-0,00011356

S'ajoute à la première équation, celle qui calcule les CEV totaux pour un tronçon particulier. Cette équation prend en considération, sur une base annuelle, l'ensemble des véhicules et la longueur de la section.

L'équation qui suit permet d'estimer les CEV annuels totaux pour chacun des tronçons inclus au FMR.

$$CEVAN_i = 365 LGSEG_i (DJMA_i (1 - PVEHLO_i) CEVU_{VLEG_j} + (DJMA_i PVEHLO_i) CEVU_{CAM_j}) \quad (20.2)$$

$CEVAN_j$	pour chaque section, coût total annuel de fonctionnement pour tous les types de véhicules sur la section i , exprimé en \$ de 2006;
$LGSEG_i$	longueur de la section i (km);
$DJMA_i$	débit journalier moyen annuel pour la section i (véhicules par jour);
$PVEHLO_i$	pourcentage de véhicules lourds sur la section i (%)
$CEVU_{VLEG_j}$	coût unitaire de fonctionnement pour les véhicules légers sur une route de type j (\$ (2006) / véh.-km);
$CEVU_{CAM_j}$	coût unitaire de fonctionnement pour les camions lourds sur une route de type j (\$ (2006) / véh.-km).

CONCLUSION

Ce mémoire porte sur l'adaptation au contexte québécois des modules des coûts aux usagers des systèmes HERS-ST⁷⁵ et HDM-4⁷⁶. Elle a été, en partie, réalisée pour le bénéfice du Ministère des Transports du Québec (MTQ). Cette étude comprend une revue des outils de quantification des coûts aux usagers de la route et à la collectivité dans le contexte de leur intégration dans un système de gestion routière. Deux Directions du MTQ ont démontré un intérêt à intégrer les coûts tels que ceux reliés à l'exploitation des véhicules, au temps de transport et aux impacts environnementaux au sein de leur processus décisionnel, en matière de quantification des intérêts économiques d'intervenir, de priorisation des besoins, de planification à long terme, de quantification du coût global à la société de reporter les interventions et de calcul de la rentabilité des investissements routiers. Le premier type de coûts, soit celui propre aux Coûts d'Exploitation des Véhicules (CEV), pourra être intégré dans les procédures de programmation des interventions du Service des chaussées alors que l'ensemble de ces coûts, incluant donc le coût du temps et des impacts environnementaux, entreront dans l'analyse des scénarios d'investissements et des stratégies à l'étude par le Service des orientations stratégiques.

L'étude en amont du présent mémoire comportait cinq objectifs : 1) la revue des modèles de coûts aux usagers des systèmes de gestion des infrastructures routières HDM-4 et HERS-ST; 2) le paramétrage des modèles incluant un relevé élargi des sources d'informations disponibles relativement à la définition de la flotte de véhicules du Québec; 3) l'évaluation des procédures de modélisation des coûts aux usagers et des impacts environnementaux effectuées par le système HERS-ST 4) la production des équations des coûts d'exploitation des véhicules pour le compte du service des Chaussées ainsi que 5) la rédaction du rapport final.

⁷⁵ HERS-ST : *Highway Economic Requirements System, State Version*, version 4.2 (FHWA)

⁷⁶ HDM-4 : *Highway Development and Management System*, version 2.0 (Banque Mondiale)

Ce mémoire décrit de manière successive le contexte, les outils et la méthodologie des analyses technico-économiques prenant en compte la totalité des coûts amortis par la société, les outils de gestion des actifs routiers utilisés, l'application des modèles de coûts aux usagers et à la collectivité en insistant sur le paramétrage et l'étalonnage de ceux-ci, la nature des résultats obtenus par modélisation et l'intégration des procédures d'évaluation des coûts sociaux aux outils exploités par le MTQ, soit le HERS-ST version 4.2 et le GCH-6011⁷⁷ (*Visual PMS*).

Le mémoire dresse l'importance de prendre en considération les coûts à la collectivité et, plus particulièrement, aux usagers, dans l'exploitation du réseau routier, en référant aux modèles développés par les centres de recherche universitaires et les administrations routières en Amérique du Nord comme ailleurs dans le monde.

Le présent document établit sur la base d'arguments et de justificatifs raisonnables, le pont reliant ces développements réalisés dans des contextes étrangers au contexte local, notamment en ce qui concerne les aspects qui pourraient être utiles pour améliorer le bien-être socio-économique de la collectivité par une affectation suffisante et optimale des ressources aux diverses composantes du réseau routier exploité par le MTQ. Force est d'admettre que l'amélioration de la qualité et de la performance du réseau routier québécois a pour fonction de réduire les coûts totaux engendrés par son exploitation et du fait même, améliorer la sécurité des citoyens.

La promotion de la santé économique du transport routier au Québec passe également par l'intégration des procédures de calculs des coûts sociaux aux outils de gestion des infrastructures routières utilisés au MTQ. Parmi ces outils, le HERS-ST et le GCH-6011, possèdent certaines particularités qui doivent être considérées en vue de l'intégration des

⁷⁷ GCH-6011 : Système de Gestion des Chaussées exploité par le MTQ (*Agile Asset*)

procédures de calcul. Dans le cas du système HERS-ST, les modèles sous-jacents ont été paramétrés dans cette étude, alors que, dans le cas du GCH-6011, les équations de calcul des Coûts d'Exploitation des Véhicules (CEV) ont été développées de manière exogène au système de gestion des chaussées à partir des résultats fournis les modèles étalonnés du HDM-4. L'utilisation de l'ensemble de ces modèles a nécessité une collecte d'information d'envergure au sein de l'étude en vue de permettre un paramétrage complet et rigoureux.

La phase d'identification et d'adoption des valeurs des différents paramètres entrant dans les modèles du HERS-ST et du HDM-4 s'est avérée complexe et ardue. Dans les faits, il s'agit d'une tâche cruciale qui aura monopolisé une grande partie des énergies consacrées à la réalisation du mandat. Cette étape a impliqué l'adoption de valeurs pertinentes relativement aux paramètres liés aux caractéristiques de la route, de la flotte québécoise et des véhicules représentatifs ainsi qu'aux coûts unitaires des ressources consommées lors de l'exploitation des véhicules (i.e. carburant, pneus, temps de transport, etc.).

Telles qu'elles sont résumées dans le rapport, les valeurs retenues fournissent des niveaux de précision et de cohérence satisfaisants en vue de l'adaptation des modules de coûts aux usagers des systèmes retenus. Néanmoins, certaines d'entre elles pourront être validées dans le cadre de recherches complémentaires à celles entamées par la présente étude. À titre d'exemple, un relevé élargi des coûts d'exploitation des véhicules permettrait la validation des valeurs des coûts d'entretien et de réparation des véhicules.

Le paramétrage des modèles du HERS-ST a permis de bien saisir la nature des modèles intégrés à ce système. En raison de l'impossibilité d'accéder au code du logiciel, la programmation des équations sous-jacentes au modèle HERS-ST a été nécessaire pour permettre l'analyse des résultats fournis par ces modèles.

En ce qui a trait aux CEV, les résultats obtenus, qui ont été analysés de manière distincte en fonction de la vitesse du véhicule et de l'état du revêtement, mettent en évidence l'époque où les modèles ont été développés ainsi que les types de véhicules utilisés pour les développer. Bien que les facteurs de pondération, qui sont utilisés par le HERS-ST, permettent de corriger la surestimation des taux de consommation, les prévisions faites par

les modèles des CEV ne sont pas valables pour l'ensemble des conditions de conduites évaluées par le système. De plus, les CEV marginaux ou supplémentaires associés aux interactions des véhicules dans la circulation ne sont pas modélisés à l'aide du HERS-ST.

Essentiellement, la modélisation du temps de transport, réalisée à partir du HERS-ST, reproduit la méthodologie présentée par le «*Highway Capacity Manual*»et, par conséquent, présente les résultats qui y sont associés. Cette procédure semble satisfaisante compte tenu du niveau agrégé d'analyse réalisé à l'aide de cet outil.

La procédure d'intégration de la modélisation des émissions polluantes et des Gaz à Effet de Serre (GES) au HERS-ST permet la quantification des impacts économiques qui en sont tributaires et a été réalisée de manière exogène à partir des résultats obtenus du MOBILE 6 QC⁷⁸. Ces impacts sont compilés par véhicule-mille parcouru en fonction du type de route, du milieu (i.e. urbain ou rural), de la catégorie de véhicule, de la vitesse de déplacement et de l'année (2006 à 2021). Les résultats ont été produits conformément aux méthodologies établies par le MTQ pour ce qui touche aux taux d'émissions et aux valeurs économiques des impacts des émissions polluantes et des GES. Par contre, l'architecture du système HERS-ST et la nature des paramètres fournis par le Ministère posent certaines limitations. D'une part, les impacts engendrés par un niveau de circulation relativement élevé ne peuvent pas être comptabilisés et, d'autre part, le niveau d'agrégation des données transmises par le SMST⁷⁹ ne permet pas de dresser une correspondance optimale entre les classifications relatives aux véhicules et aux tronçons routiers qui sont distincts à chaque modèle.

Puisque les différentes catégories de coûts présentées dans les paragraphes précédents sont considérées dans le cadre d'analyses stratégiques, il a fallu définir leur importance et

⁷⁸ MOBILE 6.2 QC : adaptation québécoise du modèle «*Mobile Source Factor Model*», développé par l'agence «*Environmental Protection Agency*».

⁷⁹ SMST : Service de la modélisation et des systèmes de transport, MTQ

leur influence relatives sur la rentabilité économique et la « priorisation » des interventions. Dans cet esprit, des analyses de sensibilité portant sur les différentes catégories de coûts ont été effectuées en vue d'une éventuelle élaboration d'indicateurs de performances à être utilisés par la Direction de la planification. Dans une certaine mesure, les analyses mettent en évidence l'importance prépondérante des coûts associés au temps de transport et à l'exploitation des véhicules si on les comparent avec ceux qui sont reliés aux incidents routiers, aux impacts environnementaux et à l'entretien des infrastructures routières.

Les modèles de coûts d'exploitation des véhicules du HDM-4 ont été programmés dans un fichier *Visual Basic* afin d'assurer un étalonnage complet. Cette procédure a été précédée par un paramétrage complet et est basée sur une série de résultats découlant des simulations effectuées.

La production des équations de coûts exprimés, par véhicule-kilomètre parcouru, en fonction de l'état du revêtement à partir des modèles du HDM-4 est l'approche qui a été préconisée en vue d'intégrer le calcul des CEV au GCH-6011. La mission du SC étant réservée à des fonctions de conservation des chaussées, certains facteurs influençant les coûts, tels que l'influence de la géométrie et la capacité de la route, ont été intentionnellement écartés lors des simulations opérées à l'aide du HDM-4,. Cette approche a comme avantage de faciliter la comparaison des différents tronçons gérés par les Directions territoriales en plus de permettre l'intégration des équations au système GCH-6011 qui fournit une quantité limitée de données sur les sections.

Toutefois, l'exploitation du HDM-4 requiert un étalonnage d'envergure des modèles sous-jacents. En considération des informations disponibles, cette procédure a été fondée sur des données de nature fiable et adéquatement documentées provenant de sources telles que le MTQ, Transports Canada et la CAA.

Dans une perspective plus technique, une série d'équations, dont la valeur indépendante est l'indicateur IRI⁸⁰, ont été produites selon diverses conditions de conduite, en termes de vitesse affichée et de classe fonctionnelle, ainsi que pour trois classes agrégées de véhicules; soit les véhicules légers, les camions porteurs et les semi-remorques. Les résultats obtenus par ces équations fournissent un excellent niveau de corrélation avec ceux obtenus à l'aide du HDM-4.

L'analyse comparative des résultats obtenus par les modèles HERS-ST et HDM-4 combinée à la validation préliminaire de ces derniers, qui est faite sur la base de certaines publications reconnues, permet de juger de la très bonne qualité de l'adaptation des modèles réalisée dans le cadre de l'étude. De plus, le parallèle établi entre les valeurs relevées auprès de l'industrie du transport et de l'automobile a été effectué avec un souci de rigueur du point de vue de la concordance entre les conditions de conduite simulées et celles, plutôt générales, qui sont sous-jacentes aux études identifiées lors la revue de la documentation.

À la lumière des analyses décrites précédemment, les résultats obtenus peuvent être utilisés dans le cadre des procédures de gestion des actifs routiers effectuées par le ministère des Transports ou d'autres exploitants du réseau routier au Québec. Les procédures développées sont comparables, en totalité ou en partie, à d'autres applications qui ont été mises sur pied par différentes administrations routières en Amérique du Nord ou ailleurs comme, entre autres, celles de l'état de Washington (WSDOT), de la Colombie-Britannique (MoHT), de la Suède (VTI) et de la Nouvelle-Zélande (Transit NZ).

⁸⁰ IRI : Indice de Rugosité International (m/km)

RECOMMANDATIONS

Les recommandations qui suivent réfèrent à des moyens supplémentaires qui doivent être mis en œuvre pour renforcer les procédures d'évaluation des Coûts d'Exploitation des Véhicules (CEV) et les coûts à la collectivité qui seront bientôt intégrées à la gestion des actifs routiers sous la responsabilité du ministère des Transports du Québec.

D'autres avenues de développement sont soumises pour considération en vue d'élargir l'horizon des impacts du transport routier sur la collectivité.

Acquisition de données supplémentaires

Des données supplémentaires doivent être obtenues de la Division de la circulation afin de bonifier le travail d'adaptation des modules des coûts aux usagers des systèmes HERS-ST et HDM-4 qui a été effectué jusqu'à présent. Le traitement des données présentées par les points suivants serait très utile :

- 1) Les données relatives au comptage et à la classification des véhicules permettraient d'attribuer des distributions désagrégées par section ou par région;
- 2) Les données tirées des comptages de classification des véhicules permettraient d'attribuer des distributions de véhicules particulières aux différentes périodes de circulation (i.e. en pointe et hors pointe);
- 3) Les résultats des relevés des vitesses pratiquées, consistant en des études radar, sur certains sites permettraient un étalonnage plus complet des modèles de prévision de la vitesse en régime libre. Ceci s'effectuerait pour des tronçons caractérisés par des faibles débits de circulation par corrélation des caractéristiques de la route à la vitesse. Rappelons que la vitesse de déplacement des véhicules est un facteur d'influence de première importance sur les CEV et que la prévision de la vitesse en fonction des caractéristiques de la route est sous-jacente à la modélisation des CEV;
- 4) De manière similaire, l'obtention de ce type de données pour des sections caractérisées par différents niveaux de débits permettrait de préciser l'influence du niveau de circulation sur la vitesse effective des véhicules.

L'acquisition et le traitement des données brutes du service de la modélisation et des systèmes de transport relativement aux taux d'émissions de polluants et de Gaz à Effet de Serre (GES) fourniraient une opportunité de désagréger et d'optimiser la compilation des valeurs des taux d'émissions utilisés dans la procédure d'intégration des valeurs des impacts environnementaux au HERS-ST.

Un relevé de grande envergure des caractéristiques, de l'utilisation, des taux de consommation des ressources et des coûts d'exploitation des véhicules auprès d'un nombre important de sociétés et d'entreprises propriétaires de flottes de véhicules assurerait une validation solide des modèles proposés par l'étude.

Validation des paramètres d'intrant et des résultats

Les recherches effectuées dans le cadre du paramétrage des modèles ont permis d'obtenir, dans la plupart des cas, une qualité d'information satisfaisante. Par contre, certaines mesures additionnelles pourront être prises afin de confirmer les valeurs des paramètres retenus.

L'instrumentation d'un certain nombre de véhicules permettra de renforcer la précision du paramétrage au niveau de la consommation de carburant et de lubrifiant ainsi qu'en ce qui concerne la quantification des émissions et des GES.

Des mesures périodiques du volume de la gomme des pneus, désagréguées, par section ou par trajet, selon l'état du revêtement et la géométrie de la route, serviront à mettre en évidence l'influence particulière de ces différents paramètres sur le taux d'usure de la gomme.

Un relevé d'envergure et bien structuré pourra être effectué auprès de l'industrie afin de saisir les particularités au niveau des Coûts d'Exploitation des Véhicules (CEV), en ce qui concerne les réparations, l'entretien et la dépréciation des véhicules, qui sont relatives à chaque type de véhicules et, dans le cas des camions moyens et lourds, en fonction du type d'utilisation du véhicule (i.e. transport de type urbain, longue distance ou autres).

Des relevés de la vitesse des véhicules ciblés en fonction de sections de chaussées à réhabiliter pourront être effectués avant et après la mise en œuvre d'une intervention de resurfaçage permettraient de valider l'influence relative de l'état du revêtement sur la vitesse des véhicules.

Améliorations au HERS-ST

L'obtention du code du logiciel HERS-ST permettrait de programmer des équations des CEV représentatives de la flotte québécoise actuelle. Ceci, afin de pallier aux limitations importantes conséquentes à l'utilisation des modèles qui, bien que partiellement adaptés, ont été originalement développés par le «*Texas Research and Development Institute*» (Zaniewski, 1982). Rappelons que les résultats obtenus ne satisfont pas pour toutes les conditions de conduite modélisées dans le cadre de l'analyse des besoins en investissements.

Éventuellement, cet accès au code du logiciel offrirait l'opportunité d'intégrer des modèles, comprenant toutes les équations pertinentes, des impacts environnementaux qui prendraient en considération certains facteurs d'influence sur le fonctionnement des véhicules; tels que l'état du revêtement et le niveau de circulation.

Modifications à l'architecture du GCH-6011 (ministère des Transports du Québec)

Il est à souhaiter que les données relatives à la géométrie de la route seront intégrées au Fichier Maître Réseau (FMR) à être utilisé par une prochaine version du Système de gestion des chaussées (GCH-6011). Cet ajout permettra la modélisation des coûts relatifs aux pentes et aux courbes dans le but d'évaluer, de manière plus réaliste, les bénéfices marginaux liés à l'amélioration de l'état du revêtement qui prendraient en compte la vitesse effective des véhicules et la géométrie de la route.

À plus long terme, d'autres paramètres pourront être intégrés aux FMR tels que la présence de dispositifs de contrôle de la signalisation, les données sur la capacité de la route et la distribution des véhicules désagrégée par section ou par secteur.

De façon optimale, un module complet intégrant une série d'équations pertinentes tirées des modèles du HDM-4 servirait à évaluer les CEV indépendamment pour chaque section plutôt qu'en fonction des catégories de tronçons proposées dans le cadre de l'étude.

Autres types de coûts à considérer

Éventuellement, l'intégration des coûts sociaux au sein des procédures de gestion des actifs routiers devra inclure d'autres types d'impacts. Ces coûts pourraient être relatifs à ceux attribuables aux incidents routiers, aux conséquences des émissions sonores des véhicules ainsi qu'à des impacts environnementaux différents de ceux déjà considérés dans le cadre de l'étude tels que ceux se répercutant sur les écosystèmes et les riverains. À titre indicatif, les coûts attribuables aux incidents routiers pourraient être évalués à partir d'éventuels modèles prenant en considération certains facteurs comme le niveau de circulation, l'orniérage, l'adhérence et l'état du revêtement.

Aussi, la détermination de la disposition à payer des usagers relative à une amélioration de l'état du revêtement (uni) pourrait faire partie des procédures à développer dans le cadre de la gestion des actifs et de l'évaluation des intérêts économiques à investir dans le réseau routier. Cette méthodologie a été identifiée auprès d'organisations œuvrant à l'étranger et son application pourrait permettre de justifier l'établissement de sources de revenus additionnels.

Applications supplémentaires des modules des coûts aux usagers

Les applications développées dans le cadre du projet pourront être élargies à d'autres conditions de fonctionnement des véhicules. À cet effet, les modèles du HDM-4 pourraient être utilisés en vue de modéliser la conduite caractérisée par un niveau important

d'interactions entre les véhicules dans la circulation pour quantifier les CEV marginaux associés à ces conditions. De la même manière, le modèle du HDM-4 offre la possibilité d'évaluer les impacts environnementaux tributaires des conditions de conduite et des caractéristiques de la route, c'est-à-dire selon le niveau de circulation, la géométrie et l'état du revêtement, pour chaque tronçon de route pris individuellement.

Les modèles des effets sur les usagers sous-jacents au HDM-4 pourraient venir s'ajouter aux outils déjà utilisés dans le cadre des analyses en transports ainsi que de certaines procédures de modélisation effectuées au sein de l'administration. La structure de ces modèles fournit un niveau de pertinence supérieur en vue des procédures de modélisation et de la gestion des actifs routiers pris en charges par différents services du Ministère.

Aussi, les équations présentées dans le *Guide de l'analyse avantages-coûts des projets en transport* du MTQ pourront être actualisées et adaptées aux conditions prévalant actuellement au Québec à l'aide des modèles du HDM-4 qui ont été paramétrés et étalonnés dans le cadre de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- ACQ. 2006. Enquête 2005 sur la rémunération globale du personnel de l'industrie du camionnage au Québec, Association du camionnage du Québec, 2006.
- AIPCR. 2007. PIARC HDM-4, [En ligne]. [<http://hdm4.piarc.org/html/main/home-f.htm>] 5 janvier 2007.
- American Trucking Association. 2006. [En ligne]. www.ata.com, consulté le 6 mars 2006.
- Association of Australian and New Zealand road transport and traffic authorities. 2005. *National Performance Indicators*. <http://www.algin.net/austroads/>. Consulté le 26 octobre 2005.
- Association of Australian and New Zealand road transport and traffic authorities. 2006. [En ligne]. <<http://www.austroads.com.au/asset/faqs.html>> Consulté le 20 novembre 2006.
- Babin, Pierre. 2004. *Modèle d'émission des polluants et des GES et modèle de consommation des carburants pour MOTREM, utilisation de MOBILE 6.2c*, Service de la modélisation des systèmes de transports, ministère des Transports Québec.
- Babin, Pierre. 2006. *Modèle exploratoire sur l'utilisation du réseau du réseau routier à l'échelle du Québec*, Service de la modélisation des systèmes de transports, ministère des Transports Québec, novembre 2006.
- Barton, Ray. 2006. *Estimation of Cars and Light Trucks Use per Vehicle-Kilometer in Canada, Final Report*, Ray Barton Associates Ltd, Orléans, Ontario, mars 2006.
- Battelle Institute. 2000. *Potentiel Role of HERS in State-Level Highway Capital Investment Program Planning and Modifications for State-Level Use*, Batelle et Wilburn Smith Associates, FHWA, janvier 2000.
- Beaulieu, Jocelyn. 2006a. *HERS-ST version 4.0, Highway Economic Requirements System, State Version*, Présentation Power Point faite par Jocelyn Beaulieu, Montréal, le 2 octobre 2006.
- Beaulieu, Jocelyn. 2006b. 8 mai 2006 sur la distribution des véhicules selon la classe fonctionnelle, mai 2006.
- Beaulieu, Jocelyn. 2006c sur le balisage effectué par le CGER. le 1^{er} mars 2006
- Bennett, Christopher R. 1998. *Structured Testing of the HDM-4 Road User Effects Model for Australia*. Report to the Queensland Main Roads Department. HTC Infrastructure Management Ltd., Auckland, 1998.
- Bennett, Christopher R. et Greenwood, Ian D. 2003. *Modelling road user and environmental effects in HDM-4*, The highway development and management series, volume 7, AIPCR.

- Bennett, Christopher. 2007. Site Internet personnel de C. Benneth. [En ligne]. <http://www.lpcb.org/downloads/d-hdm4-rue.htm>. mai 2007
- Boucher, Martin. 2006. *Gestion des chaussées au MTQ*, Présentation Power Point faite par Martin Boucher, Québec, le 6 janvier 2006.
- Bulk Plus Inc. 2003. Operating Costs of Trucks In Canada 2003, Bulk Plus Logistics, produit pour la direction des Analyses économiques, Transports Canada, Ottawa, 2003.
- CAA. 2002. Courriel transmis à l'ÉTS, mai 2002.
- CAA. 2005. *Coût d'utilisation d'une automobile, édition 2005*, Association canadienne des automobilistes, Ottawa, 2005.
- CAA. 2007. *Coût d'utilisation d'une automobile, édition 2007*, Association canadienne des automobilistes, Ottawa, 2007.
- Cambridge Systematics Inc. 1997. *Time-of-Day Modeling Procedures: State-of-the-Practice, State-of-the-Art, prepared for FHWA*, Washington, DC: US DOT/BTS, février 1997.
- Cambridge systematics, Inc. 2002. *Freight impacts on Ohio's roadway system*, Report to Federal Highway Administration, juin 2002.
- Cambridge Systematics Inc. 2005. *Transportation leadership you can trust*. Consulté le 15 octobre 2005, à <http://www.camsys.com>
- Cambridge Systematics Inc. 2007. *Transportation leadership you can trust*. [En ligne]. <<http://www.camsys.com>> Consulté le 15 janvier 2007.
- CDAT. 2006. *Analyse économétrique du taux de chargement des camions se déplaçant au Québec*, Centre de données et d'analyse sur les transports, Université Laval, Québec, novembre 2006.
- Claffey, P.J. and Associates. 1971. *Running Cost of Motor Vehicles as affected by Road Design and Traffic, NCHRP Report 111*, Highway Research Board, National Research Council, Division of Engineering, 1971.
- CRRI. 1982. *Road User Cost Study in India*, Central Road Research Institute, New Delhi, Inde, 1982.
- DCL. 2003. *Using the NZVOC model to prepare PEM vehicle operating costs*, data Collection Ltd, Transfund, Wellington, février 2003.
- Daniels, C. 1974. *Vehicle Operating Cost in Transportation Studies, E.S.U. Technical series No.1*, London, Spencer house, 1974.

- Delucchi. 1998. *The annualized social cost of motor-vehicle use in the U.S., 1990-1991: summary of theory, data, methods and results, report #1*, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, juin 1998.
- Deloitte. 2004. *Rapport d'intervention – Étude du coût de revient d'un camionneur artisan*, Samson Bélai/Deloitte & Touche pour le compte de l'Association nationale des camionneurs artisans et le ministère des Transports du Québec, Direction du transport routier et des marchandises, Québec, octobre 2004.
- Desrosiers, Dennis. 2003. *Lesson from the new vehicle file*, Présentation Power Point faite par Dennis Desrosier, le 19 novembre 2003.
- Desrosiers Automotive. 2006. [En ligne]. www.desrosiers.com, consulté pour la dernière fois le 1^{er} mai 2007.
- Elkins, G.C. et al. 1987. *Estimating Vehicle Performance Measures*, Texas Research and Development Foundation, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., juillet 1987, pp. 128-177.
- FHWA. 2006b. Guide de classification des véhicules de la FHWA. [En ligne]. <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/tmguides/word/tmg4.doc>, consulté le 17 avril 2006.
- FHWA. 1997. *The 1997 Federal Highway Cost Allocation Study*, U.S. DOT, août 1997.
- FHWA. 2000. *Highway Economic Requirement System: Technical report*, U.S. DOT, décembre 2000.
- FHWA. 2002a. *Highway Economic Requirement System: Induced demand and elasticity*, U.S. DOT, août 2002.
- FHWA. 2002b. *2002 Conditions and Performance Report*, Federal Highway Administration, U.S. DOT,
- FHWA. 2002c. *Highway Economic Requirement System – State version: Pilot Program report 2002*, U.S. DOT, août 2002.
- FHWA. 2003. *Highway Economic Requirement System – State version: Technical guide, version 3.54*, U.S. DOT, décembre 2003.
- FHWA. 2004. *Highway Economic Requirement System: User's guide, Software Version 3.X*, U.S. DOT, août 2004.
- FHWA. 2005. *Highway Economic Requirement System – State version: Technical guide*, U.S. DOT, août 2005.
- FHWA. 2006. *Highway Economic Requirement System – State version: User's guide*, U.S. DOT, mai 2006.

- FHWA. 2007. *Highway Economic Requirement System: User's guide, Software Version 4.X*, U.S. DOT, mars 2007.
- FHWA. 2008. HERS-ST Highway Economic Requirements System - State Version, [En ligne]. [<http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/asstmgmt/hersindex.htm>] (5 janvier 2007)
- Fournier, Pierre. 2006. Courriel envoyé par Pierre Fournier, le 22 mars 2006.
- GEIPOT. 1982. *Research on the Interrelationships Between Costs of Highway Construction Maintenance and Utilization*: Final Report on Brazil-UNDP, Highway Research Project. Brasilia, Brésil, 1982.
- Hide, H., Abayhayaka, S.W., Sayer, I. et Wyatt, R.J. 1975. *The Kenya Road Transport Cost Study: Research on Vehicle Operating Cost*, Transport and Road Research Laboratory Report LR672, Department of the Environment, Transport Road Research Laboratory, Crowthorne, Rauyame-Uni, 1975.
- Hide. 1982 *Vehicle Operating Costs in the Caribbean: An Experimental Study of Vehicle Performance*. TRRL Laboratory Report 1056, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1982.
- HTC. 1997. *Thailand Road User Effects Model*, HTC Infrastructure Management Ltd., Aukland, mai 1997.
- HTC. 2000. *Tonga pavement management system project : HDM-4 RUE calibration*, HTC Infrastructure Management Ltd., Aukland, mai 2000.
- HTC. 2002. *Représentative véhicules*, HTC Infrastructure Management Ltd., Auckland, Nouvelle-Zélande, mai 2002.
- HIMS. 2004. *HDM-RUE User's guide*, HIMS Ltd., Aukland, Octobre 2004.
- Kerali, Henry G.R., McMullen, D. et Odoki, J.B. 2000. *HDM-4 : Applications guide*, The highway development and management series, volume 2, AIPCR, Paris 2000.
- Kerali, Henry G.R. et Cdoki, J.B. 2000. *HDM-4 : Analytical framework and model descriptions*, The highway development and management series, volume 4, AIPCR, Paris 2000.
- MoHT 1996. *British Columbia Vehicle Operating Costs*, Highway Planning and Policy Branch, Ministry of Transportation and Highways, Victoria, décembre 1996.
- MTQ. 2000. *Étude de la situation de travail des camionneurs du Québec*, présenté par Léger & Léger, Direction de la mobilité en transport, ministère des Transports du Québec, Montréal, février 2000.
- MTQ. 2004. *Évaluation de la congestion routière dans la région de Montréal*, Les Conseillers ADEC et le ministère des Transports du Québec, Montréal, mai 2004.

- MTQ. 2005a. *Guide De l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport*, Anne-Marie Ferland, Direction de la planification, ministère des Transports du Québec, Québec, 2005.
- MTQ 2005b. *Tome I – Conception routière*, 7^e mise à jour, collection des Normes ouvrages routiers, Les publications du Québec, Sainte-Foy, 2005.
- MTQ. 2006. *Examen de la problématique des coûts de fonctionnement des véhicules au Québec, Rapport final*, Les conseillers ADEC Inc., pour le SMST, ministère des Transports du Québec, Montréal, Mars 2006.
- MTQ. 2007. Ministère des transports du Québec [En ligne]. [www.mtq.gouv.qc.ca] (15 décembre 2006)
- NDLI. 1995. *Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4*. Rapport final. Asian Development. Bank Project RETA 5549. N.D. Lea International, Vancouver, Octobre 1995.
- OEE. 2000. *Enquête nationale sur l'utilisation des véhicules privés – d'octobre 1994 à septembre 1996, Rapport sommaire*, Office de l'efficacité énergétique, Ressources naturelles Canada, Ottawa, octobre 2000.
- Ohio DOT. 2006. Ohio Department of Transportation, Division of Planning. Pavement Engineering. [En ligne]. [<http://www.dot.state.oh.us/pavement>] (19 septembre 2006)
- Oregon DOT. 2006. Oregon Department of Transportation, Office of Innovative Partnerships and Alternative Funding. Road User Fee Task Force. [En ligne]. [<http://www.oregon.gov/ODOT/HWY/OIPP/rufft.shtml>] (19 septembre 2006)
- Papagiannakis 1999. *On the relationship between truck operating cost and pavement roughness*, Society of automotive engineers paper 99C-73, Pennsylvania, 1999.
- Paterson William D.O. et Bennett, Christopher R. 2000. *HDM-4 : A guide to calibration and adaptation*, The highway development and management series, volume 5, AIPCR, Paris 2000.
- Plourde, Katleen. 2006a. Courriel envoyé par Katleen Plourde, le 19 mai 2006.
- Plourde, Katleen. 2006b. Courriel envoyé par Katleen Plourde, le 9 juin 2006.
- Plourde, Katleen. 2006c. Courriel envoyé par Katleen Plourde, le 15 juin 2006.
- RNC. 2005. *Guide de données sur la consommation d'énergie, 1990, 1997 à 2003*, Office de l'efficacité énergétique, Ressources naturelles Canada, Gatineau, juin 2005.

- Roy, Jean-Philippe, Assaf, Gabriel J. et St-Jacques, Michèle 2006. *Revue des modèles de coûts aux usagers du HERS-ST et du HDM-4, Premier rapport d'étape – version 2.2*, École de technologie supérieure, 6 mars 2006 (Rapport non publié).
- Roy, Jean-Philippe, Assaf, Gabriel J. et St-Jacques, Michèle. 2007a. *Paramètres de modélisation des coûts aux usagers du HERS-ST ET DU HDM-4, Deuxième rapport d'étape – version 2.1*, Roy, J.P., Assaf, G.J. et St-Jacques, M., École de technologie supérieure, 6 mars 2007 (Rapport non publié).
- Roy, Jean-Philippe, Assaf, Gabriel J. et St-Jacques, Michèle. 2007b. *Adaptation au contexte québécois des modules d'évaluation des coûts aux usagers du HERS-ST ET DU HDM-4, Rapport final – version 1.3*, Roy, J.P., Assaf, G.J. et St-Jacques, M., École de technologie supérieure, 15 octobre 2007.
- SAAQ. 2005. *Dossier statistique : bilan 2004, Accidents, parc automobile, permis de conduire*, Direction des études et des stratégies en sécurité routière, Société de l'assurance automobile du Québec, mai 2005.
- SAIC. 1993. *Speed Determination Models for the Highway Performance Monitoring System*, Science Applications International Corporation rapport soumis au U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C, octobre 1993.
- Stannard, Eric E. 2000. *Getting Started with HDM-4 version 2.0*, ISOHDM, School of civil engineering, Birmingham.
- Statistique Canada. 2004. *Le camionnage au Canada*, Ministère de l'industrie, février 2006, Ottawa, 2004.
- TC. 2003. *Operating Costs of Trucks In Canada 2003*, Bulk Plus Logistics, produit pour la direction des Analyses économiques, Transports Canada, Ottawa, 2003.
- TC. 2006. *Estimation of Cars and Light Trucks Use per Vehicle-Kilometer in Canada, Final Report*, Rapport soumis à Transports Canada, Ray Barton Associates Ltd, Orléans, Ontario, mars 2006.
- TC. 2008. Transports Canada. [En ligne]. www.tc.gc.ca, consulté pour la dernière fois le 7 mars 2008.
- TRAC. 2004. *Application of HDM-4 in the WSDOT highway system*, Washington State Transportation Center, Seattle, juillet 2004.
- TRB. 1994. *Highway capacity manual*, Transportation Research Board, Washington: National research council, 1994.
- TRB. 1997. *Highway capacity manual*, Transportation Research Board, Washington: National research council, 1997.

- TRB. 2000. *Highway capacity manual*, Transportation Research Board, Washington: National research council, 2000.
- TRDF. 1982. *Research on the inter-relationships between costs of highway construction, maintenance and utilization*, Austin, 1982.
- Tremblay, Pierre. 2002. *Survol technique du modèle de transport de la région de Montréal*, Pierre Tremblay, Service de la modélisation et des systèmes de transport, Direction du partenariat, de la modélisation et de la géomatique, ministère des Transports du Québec, Montréal, septembre 2002.
- Victoria Transport Policy Institute. 2007. [En ligne]. www.vtpi.org, consulté le 15 novembre 2007.
- VTI. 2003. *An overview of HDM-4 and the Swedish Pavement Management System (PMS)*, Ihs, A. et Sjögren, L., VTI, Linköping, Suède, août 2003.
- Watanatada. 1987. *The highway design and maintenance standards model, Volume 1. Description of the HDM-III model*, The highway design and maintenance standards series, The John Hopkins University press, Baltimore, décembre 1987.
- Weinblatt. 2006. Courriel envoyé par Herb Weinblatt, le 24 août 2006.
- Wightman, D.C., Stannard, E.E. et Dakin, J.M. 2000. *HDM-4 : Guide de l'utilisateur, Série développement et gestion des routes, volume 3*, AIPCR, Paris 2000.
- Winfrey, R. 1969. *Economic Analysis for Highways*, Scranton, Pennsylvania International Textbook Co., 1969.
- Zaniewski, John. 1982. *Vehicle operating costs, fuel consumption, and pavement type and condition factors*, Texas Research and Development Foundation, Federal Highway Administration, Austin, juin 1982.