NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI®

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

DÉTERMINATION MICROSCOPIQUE DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE DE DÉPASSEMENT POUR LA DÉTERMINATION DU RATIO DÉPASSEMENTS DÉSIRÉS/DÉPASSEMENTS EFFECTUÉS SUR ROUTE RURALE

MATHIEU JACQUOT

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
Mai 2004

© Mathieu Jacquot, 2004

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 0-612-97955-5
Our file Notre référence
ISBN: 0-612-97955-5

NOTICE:
The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:
L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

DÉTERMINATION MICROSCOPIQUE DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE DE DÉPASSEMENT POUR LA DÉTERMINATION DU RATIO DÉPASSEMENTS DÉSIRÉS/DÉPASSEMENTS EFFECTUÉS SUR ROUTE RURALE

présenté par: JACQUOT Mathieu

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

en vue de l'acceptation par le jury d'examen constitué de:

M. CHAPLEAU Robert, Ph.D., président

M. BAASS Karsten, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. THIBEAULT Jacques, M. Ing., membre

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Mr. le professeur Karsten Baass, pour son aide inestimable dans la conduite de ce projet. Les nombreuses et intéressantes rencontres et discussions avec lui m'ont permis d'appréhender comment conduire un travail de recherche et ont abouti à la clarification de nombreuses problématiques qui se sont présentées. L'aide de Mr. le professeur Robert Chapleau a également été décisive. Sans lui, je n'aurais pu saisir comment l'immersion dans le doute conditionne tout travail de recherche. Ma tutrice de l'ENTPE, Mme Odile Jeannin, m'a fourni de précieux conseils pour la suite de ma carrière et de nombreux messages de soutien dans la poursuite de mes travaux.

Je suis également reconnaissant envers le Ministère des Transports, dont le projet « problématique des zones de dépassement sur routes à deux voies contiguës et deux sens de circulation en milieu rural » a initié ma réflexion sur la simulation microscopique des routes rurales. Mes remerciements les plus chaleureux vont à toute l'équipe du centre de service de la direction territoriale d'Abitibi-Témiscamingue-Nord-du-Québec de Rouyn Noranda qui a participé au relevé manuel de la distance de visibilité sur la route 101 et nous a fourni la logistique nécessaire à cette étude terrain.

Le laboratoire de circulation routière de l'École Polytechnique de Montréal a été un lieu incroyable, où la diversité des idées et des projets a apporté une atmosphère particulièrement motivante pour la réalisation de ce travail. Plus généralement, je suis reconnaissant envers tous les étudiants du département de transport pour l'ambiance amicale et agréable que nous avons su créer. Plus particulièrement, la solidarité avec mes amis Hassan et Rolando a été un élément essentiel me permettant de fournir l'effort final de rédaction de ce mémoire.

Il me semble relativement plus complexe de formuler ma gratitude envers ma famille et mes proches que de rédiger un programme simulant le comportement des conducteurs sur route rurale.

Tout d'abord, j'accorde ici une pensée spéciale à Mareike, l'amour de ma vie, qui m'a appris par l'exemple qu'il est possible de travailler nuit et jour. Notre amour a permis à chacun de décupler son énergie et son efficacité. Son intelligence, son humour et sa compréhension m'ont permis de surmonter les moments de doute.

Grâce à ce travail, j'ai pu constater à quel point mes parents avaient su à travers leur éducation susciter une curiosité et une patience qui sont les pierres angulaires de la réflexion scientifique. Leur soutien a pu traverser l'Océan Atlantique pour me conforter dans l'avancement de mes travaux. Je remercie aussi mes deux frères, Bastien pour les conseils scientifiques qu'il m'a prodigués et son vif intérêt pour mes travaux, Adrien pour la joie qui m'est procurée de le voir grandir et s'épanouir.

Finalement, tous mes amis de Montréal m'ont permis de vivre une expérience enrichissante et inoubliable, que je garderai toujours dans mon cœur. Mes amis d'Europe ont également manifesté, malgré l'éloignement, une présence permanente qui m'a vraiment touché.

Résumé

Le projet a abordé le thème complexe de la modélisation microscopique des routes à deux voies contiguës et deux sens de circulation en milieu rural, aiguillé dans cette voie par l'ambition de caractériser l'offre et la demande de dépassement. Dans ce type de modélisation, le mouvement de chaque véhicule est déterminé de manière exhaustive, et généralement réévalué avec un pas de temps constant. Si cette modélisation est attirante du fait de ses capacités à traiter des problèmes qui ne peuvent être résolus par calculs analytiques ou par relevés sur le terrain, elle doit faire face à deux obstacles majeurs :

- la multiplication des paramètres d'entrée rend la tâche de calibration très complexe et coûteuse. Avant d'utiliser la simulation à des fins d'analyse, chaque variable d'entrée doit être minutieusement examinée ;
- certains paramètres n'ont pas de signification physique et ne peuvent donc être obtenus par relevés sur le terrain. Une première procédure doit permettre de déterminer les variables de sortie sensibles à ces paramètres. Une calibration heuristique est utilisée pour déterminer les paramètres de telle sorte que les variables de sortie obtenues par simulations s'ajustent aux relevés.

Deux catégories principales de modèles ont été identifiées dans la littérature. D'une part, de nombreux logiciels de simulation (SIMLA ++, TWOPAS, TRARR) emploient des équations basées sur des principes physiques pour le déplacement des véhicules, combinés avec des modèles empiriques des processus de prise de décision. D'autre part, quelques modèles orientés sur la compréhension comportementale de la conduite ont été développés (Modèle de Stang, ARCHISIM) ; ils sont cependant encore au stade de développement.

Étant donné qu'aucun des travaux cités ci-dessus ne propose une explication complètement satisfaisante des mécanismes microscopiques sous jacents à la demande et à l'offre de dépassement, un modèle propre à cette étude - basé sur la définition d'un élément véhicule/conducteur générique ainsi que l'emploi de paramètres ayant une signification physique et donc directement observables par des études terrain - a été développé. Ne disposant pas de données terrain, une validation de principe a été conduite, se basant sur diverses références de la littérature (notamment d'autres travaux de microsimulation, quelques approches analytiques et diverses études sur le terrain conduites en Australie, en Afrique du Sud et aux États-Unis). L'effort de recherche s'est concentré sur la représentation microscopique des mécanismes qui ont suscité l'intérêt porté au sujet : l'offre et de la demande de dépassement. L'analyse de l'offre nous a conduit à développer un algorithme de calcul de la distance de visibilité qui a été validé par des données relevées à la main et au GPS, collectées sur la route 101 en Abitibi. Les développements ultérieurs de ce modèle reposent sur la répétition du schéma de validation sur d'autres sections de route et sur le développement de méthodes de mesure fiables et peu coûteuses des éléments géométriques de la route (largeur de la plateforme, dévers). L'investigation de la demande de dépassement a été effectuée sous un angle original, tenant compte de la corrélation entre le désir de dépasser et la prise de décision de dépasser. Une variable floue a été créée, nommée l'impatience de dépasser, qui caractérise l'attention que le conducteur consacre à rechercher une opportunité de dépasser.

L'algorithme a été implémenté dans un programme orienté objet ; le langage C++ a été choisi du fait de son utilisation répandue dans le monde entier. Le programme est considéré comme expérimental et donc conçu en source libre, afin de servir de base de tests de diverses compréhensions comportementales de la tâche de conduite sur une route rurale. Le programme a été testé sous diverses configurations de trafic, ce qui a permis dans une première phase de validation de vérifier que la traduction de la modélisation en langage informatique était exempte d'erreur.

Lors de la deuxième phase de validation, le cas d'une route sans contraintes géométriques a tout d'abord été examiné, afin d'observer les propriétés macroscopiques du trafic. Notre modèle a pu reproduire des résultats proches de ceux du Highway Capacity Manual 2000 ; en accord avec d'autres travaux de recherche, il a cependant été trouvé que les formules analytiques proposées par le guide américain ne tiennent pas suffisamment compte de la variabilité du trafic, principalement en ce qui concerne l'écart type des vitesses désirées. En outre, il a également été établi dans cette étape comment la variable d'entrée « vitesses désirées » doit être calibrée pour que le modèle reproduise correctement les distributions de vitesse.

Une analyse des propriétés moyennes des dépassements a également été conduite ; il a été trouvé :

- que les résultats des caractéristiques dynamiques de la manœuvre se situaient dans des ordres de grandeur correspondant aux résultats de relevés terrain et d'autres simulations ;
- qu'aucun résultat dans la littérature ne nous permettait de calibrer notre concept d'offre et de demande de dépassement. Un principe d'expérience est donc proposé, mais n'a pas été appliqué.

Finalement, une analyse sur une section de route existante (route 101 en Abitibi) a été conduite à l'aide du programme développé. Il est constaté que la méthodologie proposée permet une analyse multicritères (étudiant les caractéristiques de la moyenne des vitesses pratiquées, de la formation de pelotons et des possibilités de dépassement), désagrégée spatialement et relationnelle (mise en relief des résultats par rapport aux contraintes géométriques et normatives), sous la condition que beaucoup d'attention soit accordée à la calibration des variables d'entrée.

Ce travail de recherche nous permet de conclure que le développement d'un tel modèle microscopique est pertinent en termes d'analyse. Il s'agit ici d'une première contribution fournissant une base de compréhension de la manœuvre de dépassement,

qui devrait être étoffée de validations sur plusieurs sections de route et de la mise en place de modes standardisés de relevés terrain pour l'obtention de données de calibration. Il s'agira alors d'un outil d'analyse pour la conception et l'amélioration des routes intéressant.

Abstract

This project tackled the complex issue of developing a microscopic model of traffic for two-lane two-way rural roads, idea which came from the intent to characterize passing demand and passing opportunities. Within this kind of modelling, the way each single vehicle moves has to be determined exhaustively and is generally constantly recalculated with constant discrete time steps. Even though this technique appears appealing since it leads to the solving of problems which have proved irreducible to analytical methods, two main obstacles have to be surmounted:

- Input variables are numerous and make the calibration task very complex, which can thus be very expensive. Each single input variable has to be analysed carefully by the analyst to obtain valuable results.
- A certain number of the parameters may have no physical meaning and thus can not be obtained through field studies. Output variables which are sensitive to these parameters should be determined at first. Heuristic methods are used then in order to fit simulation results to field data.

Two main model categories were observed in the literature review. On the one hand, several simulation softwares (SIMLA ++, TWOPAS, TRARR) approached the problem with physical equations of motion, combined with empirical data used for the modelling of the decision taking process. On the other hand, a variety of psychological approaches (Stang's model (1993), ARCHISIM) has developed a behavioural understanding of the driving strategies; these models however are still in the phase of development.

Since none of the previously mentioned works seemed to propose a satisfying explanation of passing opportunities and passing demand at the microscopic level, it was decided to develop our own model, based on the definition of a generic driver/vehicle element, with parameters having a physical meaning directly observable

through field studies. Due to the lack of field measurements, the validation was achieved through the use of references found in the literature (with the most relevant works being other simulation studies, some analytical results and a sample of field studies conducted in Australia, South Africa and in the USA). As they triggered the interest for the subject, especially passing opportunities and passing demand were examined carefully. This led to the production of an algorithm for the automatic determination of sight distance, which was partially validated with manual and GPS data on a section of highway 101 in Abitibi-Témiscamingue. Further improvements of the model rely on the repetition of the validation scheme on other sections of highway and on the development of a measurement procedure enabling to get a precise description of the geometric features of the road at low cost (platform width, super elevation). Also, an original investigation of passing demand was conducted through the combination of the passing desire and passing decision concepts. A fuzzy variable was created, named passing impatience, which characterizes the intensity of the driver's seeking for a passing opportunity.

The algorithm was implemented in an object oriented computer program; the C++ language was chosen because of its widespread use throughout the world. This software was conceived as an experimental one and its source is thus open, so that it could serve as a test laboratory for diverse studies on driving behaviour. The program was tested under numerous traffic conditions, so that transcription errors from the model to the computer language were corrected; our model passed thus the initial validation phase.

In the course of the second validation step, a geometrically perfect road was examined first, in order to verify the macroscopic properties of our traffic stream. Our model was able to reproduce results from the Highway Capacity Manual 2000 with a good level of confidence. However, as quoted by other research projects, it was found that the analytic formulas proposed in the American normative documents did not pay sufficient account of the variability of traffic, mainly as regards the standard deviation

of the desired speeds distribution. Furthermore, it was in this step established how the input variable "desired speed" should be calibrated for the model to produce correct speed distributions.

An analysis of the mean properties of all the individual overtakings was also conducted; the following remarks were then formulated:

- The order of magnitude of the dynamic elements of the overtaking manoeuvres corresponds to field data and other simulation studies;
- The original way of representing passing demand could not be calibrated via field studies available in the literature; as a consequence, an experimental scheme is suggested in the document, which could however not be implemented.

Finally, a section of highway 101 in Abitibi-Témiscamingue was analysed with the help of the developed software. The proposed methodology appeared to be a multifactor (dealing with the mean of instantaneous speeds, the bunching process and the overtaking possibilities), spatially disaggregated and relation-based (in respect of geometric constraints and driving rules) analysis, giving useful results only if care is taken to minutely calibrate the model parameters.

As a conclusion, this research project led to the development of a microscopic model of traffic, which can be of precious help for the analyst. The present document is a first contribution to the theme, dealing with the understanding of the basic properties of an overtaking manoeuvre. Further studies should be dedicated to improve the validation of the model, to set standard experiments to obtain valuable data for the calibration process and to develop driving behaviours still not handled here. It will then become an interesting tool for the conception and the improvement of rural roads.

Table des matières

REMERCIEMENTS ..... **IV**

RÉSUMÉ ..... **VI**

ABSTRACT ..... **X**

TABLE DES MATIÈRES ..... **XIII**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XVIII**

LISTE DES FIGURES ..... **XIX**

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS ..... **XXIII**

LISTE DES ANNEXES ..... **XXIV**

INTRODUCTION **1**

CHAPITRE 1. DÉMARCHE DE RECHERCHE **3**

1.1. Problématique 3

1.2. Revue de littérature 4

1.3. Méthodologie 6

1.3.1. Formulation des indicateurs de dépassement 7

1.3.2. Formulation du modèle de description des routes rurales 7

CHAPITRE 2. DÉFINITION DE MESURES D'EFFICACITÉ POUR LE DÉPASSEMENT 9

2.1. Construction des indicateurs de possibilité de dépassement 10
2.1.1. Principe du LOS – HCM 2000 10
2.1.2. Définition d'un indicateur de possibilités de dépassement 15

2.2. Méthodes d'analyse des routes rurales 18
2.2.1. Rappels théoriques sur le dépassement 18
2.2.2. Description de la méthode de simulation 21
2.2.3. Principe de calcul des indicateurs 23

CHAPITRE 3. DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE SIMULATION MICROSCOPIQUE DES ROUTES RURALES 26

3.1. Historique des logiciels de simulation microscopique des routes rurales 27
3.1.1. Éléments théoriques de la simulation microscopique 27
3.1.2. Caractéristiques des logiciels de simulation des routes rurales 27
3.1.3. Comportements à modéliser 29

3.2. Présentation du modèle développé 30
3.2.1. Notations 30
3.2.2. Génération des véhicules 31
3.2.3. Types de véhicules considérés 33
3.2.4. Diagramme décisionnel 33
3.2.5. Modélisation des manœuvres 36
3.2.6. Modélisation des critères pour la prise de décision 56

CHAPITRE 4. CRÉNEAUX DE DÉPASSEMENT OFFERTS 57

4.1. Calcul de la distance de visibilité de dépassement disponible 58
4.1.1. Méthodes existantes 58

4.1.2. Présentation de l'algorithme proposé 59
4.1.3. Validation de l'algorithme 65
4.1.4. Sensibilité aux paramètres de l'algorithme 75
4.1.5. Conclusion 77

4.2. Procédure de génération des véhicules 77
4.2.1. Distribution des créneaux dans un trafic mixte et à deux phases 77
4.2.2. Variations journalières du débit 80
4.2.3. Génération des nombres aléatoires 81
4.2.4. Génération de nombres aléatoires selon des lois de distribution complexes 82
4.2.5. Introduction des véhicules dans la simulation 83

CHAPITRE 5. MANŒUVRE DE DÉPASSEMENT 86

5.1. Résultats des études sur le dépassement 87
5.1.1. Classification des dépassements 87
5.1.2. Description de la manœuvre 88
5.1.3. Réalisation du dépassement 91

5.2. Décision de dépasser 92
5.2.1. Créneau disponible 94
5.2.2. Créneau nécessaire 95
5.2.3. Impatience de dépasser 106
5.2.4. Cas pour lesquels la manœuvre de dépassement est impossible 115

5.3. Comportement lors du dépassement 116
5.3.1. Dépassement « libre » 117
5.3.2. Abandon ou achèvement forcé du dépassement 118
5.3.3. Coopération du véhicule opposé 119

5.4. Décision de changer de voie 121
5.4.1. Initiation du dépassement 122

5.4.2. Abandon du dépassement 123
5.4.3. Achèvement du dépassement 124

5.5. Synthèse du modèle 125

CHAPITRE 6. IMPLÉMENTATION D'UN OUTIL D'ÉVALUATION DES DÉPASSEMENTS 127

6.1. Variables d'entrée 128
6.1.1. Section de route 128
6.1.2. Véhicules 131
6.1.3. Conducteurs 134
6.1.4. Éléments véhicule/conducteur 136

6.2. Logique de programmation 143
6.2.1. Décélération estimée 143
6.2.2. Zones et temps tampons 145
6.2.3. Structure de programmation 149
6.2.4. Schéma de principe du programme 153

6.3. Variables de sortie 155
6.3.1. Données macroscopiques agrégées spatialement et temporellement 155
6.3.2. Données des capteurs virtuels 156
6.3.3. Trajets des véhicules 157

CHAPITRE 7. PREMIERS RÉSULTATS DE SIMULATION 158

7.1. Validation/vérification du programme 159
7.1.1. Validation 160
7.1.2. Vérification 164

7.2. Exemple d'analyse sur une section de la route 101 184
7.2.1. Taille des pelotons 185

7.2.2. Moyenne des vitesses instantanées 187
7.2.3. Possibilités de dépassements 188
7.2.4. Conclusions de l'analyse 193

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 195

BIBLIOGRAPHIE 199

ANNEXES 211

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : niveaux de service sur une route à 4 voies et deux sens de circulation, extrait du HCM 2000 11
Tableau 2-2 : niveau de service sur une route rurale de classe I, extrait du HCM 2000 14
Tableau 2-3 : niveau de service sur une route rurale de classe II, extrait du HCM 2000 14
Tableau 2-4 : principes de discrétisation 23
Tableau 3-1 : diagramme de prise de décision lors du déplacement sur une route rurale 35
Tableau 4-1 : éléments géométriques de la route virtuelle pour la validation graphique du calcul de la distance de visibilité sur le tracé en plan 67
Tableau 5-1 : détection du véhicule suivant dans le rétroviseur 124
Tableau 6-1 : zones de dépassement sur le RTSC 101-04-33 130
Tableau 6-2 : caractéristiques de la surface de la route, extrait de (Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde, 2001) 131
Tableau 6-3 : coefficients dynamiques* et géométrie** des véhicules 133
Tableau 6-4: débit maximum en fonction de l'estimation de la décélération maximum et du pourcentage de poids lourds 144
Tableau 6-5 : données de sortie de la simulation en fonction de la taille de la zone tampon* 146
Tableau 6-6 : données de sortie de la simulation en fonction de l'étendue de la durée tampon* 148
Tableau 7-1 : temps passé sur la voie opposée lorsque le véhicule dépassé est un poids lourd 179
Tableau 7-2 : créneau post dépassement 183
Tableau 7-3 : créneau pré dépassement 183

Liste des figures

Figure 2-1: diagramme fondamental Q – K 10
Figure 2-2 : schéma « théorique » des niveaux de service sur le diagramme fondamental 12
Figure 2-3: Ratio de dépassement, figure extraite de (Morrall et Werner, 1990) 16
Figure 2-4: nombre de dépassements souhaités et effectués 20
Figure 3-1 : situation de conduite normale, examen de l'effet des véhicules effectuant un dépassement 40
Figure 3-2 : accélération disponible en fonction de la vitesse désirée V_d, avec a_n = 1.7m/s^2 43
Figure 3-3 : accélération disponible et évolution de la vitesse en fonction du temps, selon le modèle de Gipps modifié 45
Figure 3-4 : courbe d'accélération en pente - comparaison modèle de Rakha / TRB 1998, figure de référence extraite de Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde (2001) 50
Figure 3-5 : courbes de décélération en pente - comparaison modèle de Rakha / TRB 1998, figure de référence extraite de Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde (2001) 51
Figure 3-6 : accélération effective en fonction de la vitesse, pente de 0 % 53
Figure 3-7 : décélération à traction nulle 54
Figure 4-1: détermination de la visibilité sur le profil en long 61
Figure 4-2: détermination de la visibilité sur le tracé en plan 64
Figure 4-3: route virtuelle pour la validation graphique de la méthode de calcul de distance de la visibilité sur le tracé en plan 67
Figure 4-4 : visibilité d'arrêt - comparaison expérience / modèle 68
Figure 4-5 : visibilité de dépassement - comparaison expérience/modèle 69
Figure 4-6 : erreur commise lors de la recomposition du tracé en plan 71
Figure 4-7: caractéristiques géométriques de la route 101, section 101-04-33 72

Figure 4-8 : distance de visibilité, comparaison calculs/relevés, cible à gauche de la chaussée, sens de déplacement Sud-Nord 73
Figure 4-9 : comparaison calculs/relevés de la distance de visibilité, route 101, sens Sud-Nord, cible à gauche (respectivement à droite) de la chaussée 74
Figure 4-10 : influence de la largeur de l'accotement dans le calcul de la visibilité..... 76
Figure 5-1 : créneau nécessaire - modèle de Crawford, extrait de Crawford (1963).... 97
Figure 5-2: schéma de référence pour le calcul du créneau nécessaire..... 98
Figure 5-3 : comparaison des valeurs de créneau critique 99
Figure 5-4 : paramètres du modèle de Herman..... 102
Figure 5-5 : courbe représentative de l'impatience en fonction de l'impatience de base..... 108
Figure 5-6 : dépassement en aval..... 110
Figure 5-7 : degré d'appartenance des conditions du dépassement, présence d'un dépassement en aval..... 110
Figure 5-8 : dépassement en amont..... 110
Figure 5-9 : créneau de rabattement après le dépassement..... 111
Figure 5-10 : degré d'appartenance du rabattement après le dépassement..... 112
Figure 5-11 : degré d'appartenance du nombre de véhicules à dépasser..... 113
Figure 5-12 : degré d'appartenance du temps passé à suivre un véhicule lent..... 114
Figure 5-13 : degré d'appartenance de la différence entre la vitesse désirée et la vitesse du véhicule précédent..... 114
Figure 6-1 : distribution du rapport puissance/poids pour les véhicules particuliers, extrait de Traffic Engineering Handbook, 1999 132
Figure 6-2 : distribution des vitesses (St Raymond, période du 19/07/2001 au 23/07/2001)..... 138
Figure 6-3 : moyenne des vitesses désirées en fonction de la période de la journée .. 139
Figure 6-4 : distribution des vitesses désirées observée et théorique..... 140
Figure 6-5: détermination de la taille de zone tampon optimale..... 147
Figure 6-6 : schématisation de la notion de programmation orientée objet..... 150

Figure 6-7 : schéma de principe du programme.....154
Figure 7-1 : diagramme X-T de base utilisé pour la procédure de validation.....161
Figure 7-2 : diagramme V-T de base utilisé pour la procédure de validation.....162
Figure 7-3: comparaison de la valeur moyenne du PTSF HCM 2000 / simulations .167
Figure 7-4 : comparaison des valeurs moyennes d'ATS HCM 2000 / simulations....168
Figure 7-5 : évolution du nombre de dépassements en fonction du débit total.....171
Figure 7-6 : fonction de répartition des vitesses désirées, comparaison simulation/distribution théorique, sans zones de dépassement.....173
Figure 7-7 : distribution des vitesses désirées, comparaison simulation/distribution théorique, avec zones de dépassement.....174
Figure 7-8 : distribution des opportunités de dépassement avec véhicule en sens opposé, reproduction de l'expérience de Farber (1969).....177
Figure 7-9: distribution des opportunités de dépassement sans véhicule en sens opposé, reproduction de l'expérience de Farber (1969).....178
Figure 7-10 : probabilité d'acceptation des créneaux de dépassement avec véhicule en sens opposé.....179
Figure 7-11 : probabilité d'acceptation des créneaux de dépassement sans véhicule en sens opposé.....180
Figure 7-12: temps passé sur la voie opposée lorsque le véhicule dépassé est un véhicule particulier.....182
Figure 7-13 : taille moyenne du peloton sur la route 101, sens Sud-Nord.....186
Figure 7-14: taille moyenne du peloton sur la route 101, sens Nord-Sud.....186
Figure 7-15 : moyenne des vitesses instantanées sur la route 101.....187
Figure 7-16 : comparaison distance de visibilité/zones de dépassement, sens Sud/Nord.....189
Figure 7-17 : comparaison distance de visibilité/zones de dépassement, sens Nord/Sud.....190

Figure 7-18 : légende des Figure 7-19 et Figure 7-20 191
Figure 7-19 : ratio de dépassement dans le sens Sud-Nord 191
Figure 7-20 : ratio de dépassements dans le sens Nord-Sud 192

Liste des sigles et abréviations

AIMSUN : **A**dvanced **I**nteractive **M**icroscopic **S**imulator for **U**rban and non-urban **N**etworks

ARCHISIM : **N/A**

ATS : **A**verage **T**ravel **S**peed

DGPS : **D**ifferential **G**lobal **P**ositioning **S**ystem

FHWA : **F**ederal **H**ighway **A**dministration

GPS : **G**lobal **P**ositioning **S**ystem

HCM : **H**ighway **C**apacity **M**anual

HUTSIM : **H**elsinki **U**niversity of **T**echnology **Si**mulation **M**odel

K : Densité (véhicules/km)

LOS : **L**evel **O**f **S**ervice (niveau de service)

MOE : **M**easure **O**f **E**ffectiveness (mesure d'efficacité)

PTSF : **P**ercent **T**ime **S**pent **F**ollowing

Q : Débit (véhicules/h)

SIMLA ++ : **N/A**

SMARTEST : **S**imulation **M**odelling **A**pplied to **R**oad **T**ransport **E**uropean **S**cheme **T**ests

SSIUEL : **S**tochastische **Si**mulation des **U**eberholverhaltens auf zweistreifigen **L**andstrassen

TRARR : **T**raffic on **R**ural **R**oads

TRB : **T**ransportation **R**esearch **B**oard

TWOPAS : **Two**-lane **Pa**ssing

VTI : **N/A**

Liste des annexes

ANNEXE A : Modélisation microscopique classique – rappels théoriques..... 200

ANNEXE B : Détermination des créneaux intervéhiculaires dans le modèle de voiture suiveuse de Gipps (1981)..... 209

ANNEXE C : Description des modèles de simulation des routes rurales..... 212

ANNEXE D : Recomposition du tracé en plan à partir de données GPS..... 251

ANNEXE E : Procédure de discrétisation d'une géométrie routière connue..... 261

ANNEXE F : Description du tracé en plan du RTS 101-04-33..... 265

ANNEXE G : Reproduction des conditions expérimentales de Farber (1969).... 269

Introduction

Les routes rurales font l'objet d'une étude du ministère des transports du Québec dont l'intitulé est : « Problématique des zones de dépassement sur les routes à deux voies contiguës en milieu rural ». Cette étude est motivée initialement par la prise de conscience de l'existence de comportements dangereux sur les routes rurales[1] ; certaines zones de dépassement sont par exemple plus courtes que la longueur minimale spécifiée dans la norme ne l'exige – elles induisent certains conducteurs à achever le dépassement en dehors de la zone de dépassement, les plaçant à la fois en situation d'infraction et en danger.

Plus généralement, une mauvaise conception de la longueur et de la fréquence des zones de dépassement induit un retard – lorsqu'un peloton de « véhicules rapides » se forme derrière un ou plusieurs « véhicule(s) lent(s) » – et accentue l'insécurité de la route. Or, si des outils permettent de caractériser une route selon ces deux facteurs, le ministère désire analyser spécifiquement la problématique du dépassement. Par exemple, la comparaison de l'offre de dépassement (nombre de véhicules pouvant dépasser en un point) et de la demande de dépassement (nombre de véhicules désirant dépasser en un point) est un critère de localisation de sections n'offrant pas suffisamment de possibilités de dépassement.

La modélisation microscopique, décrivant le déplacement de chaque conducteur dans son environnement, permet de conserver « en mémoire » les motivations de conduite et les actions *individuelles*. Le présent mémoire se consacre donc à représenter les interactions entre les véhicules concernés lors d'un dépassement, créant ainsi un outil permettant une analyse géographique et désagrégée des problématiques de dépassement.

---

[1] Dans le reste du document, l'abréviation « routes rurales » remplace l'expression complète « route à deux voies contiguës en milieu rural »

Tout d'abord, le premier chapitre **Définition de mesures d'efficacité pour le dépassement** définit quels critères d'offre et de demande de dépassement devront être déterminés par l'analyse microscopique. Le deuxième chapitre **Développement d'un outil de simulation microscopique des routes rurales** permet de dégager les comportements qui doivent être modélisés. Les troisièmes et quatrièmes chapitres **Créneaux de dépassement offerts** et **Manœuvre de dépassement** décrivent des outils mathématiques et comportementaux simulant les processus mentaux et physiques lors d'un dépassement. Le cinquième chapitre **Implémentation d'un outil d'évaluation des dépassements** est consacré à l'exposition des caractéristiques du programme de microsimulation développé. Le sixième chapitre **Premiers résultats de simulation** propose enfin l'étude d'une section de route au Québec, afin d'illustrer les capacités d'analyse du programme et d'en vérifier sa cohérence. Avant d'entrer dans ce processus de réflexion, un chapitre est consacré à la **Démarche de recherche**.

Cette démarche est effectuée préalablement à la levée de données expérimentales. S'inspirant des travaux de Herman (tels que relatés dans Gazis, 2002), le modèle est développé en tenant compte de considérations physiques rationnelles. Une étude expérimentale ultérieure permettra de valider et de raffiner la compréhension des phénomènes.

La section 101-04-33 de la route 101 en Abitibi-Témiscamingue sera utilisée pour l'étude des caractéristiques du modèle développé. Elle a en effet été l'objet de relevés terrain, dont notamment la mesure de la distance de visibilité.

Chapitre 1. Démarche de recherche

1.1. Problématique

Les routes rurales sont généralement caractérisées par un débit faible ne souffrant pas de problématiques de congestion. Par conséquent, la modélisation de ces routes n'est pas intégrée dans la plupart des outils de simulation du trafic (ce que montre par exemple l'analyse détaillée des logiciels de microsimulation du trafic effectuée par SMARTEST, 1997). Or l'analyse suivante montre cependant que de nombreux enjeux y sont liés.

Tout d'abord, la diversité du trafic a sur cette structure l'effet le plus négatif. En effet, les caractéristiques géométriques de la route, notamment en profil vallonné, diminuent de manière importante les caractéristiques dynamiques de certaines classes de véhicules, tels que les camions. A contrario, les véhicules personnels conservent des capacités d'accélération importantes, ce qui crée une hétérogénéité des vitesses désirées.

De plus, les manœuvres de dépassement sont très dangereuses, du fait de la nécessité de s'insérer sur la voie de circulation en sens opposé. Cette situation crée des problématiques de stress, de retards, d'accidents et éventuellement de pollution.

Le design doit par conséquent être étudié en détails. Il s'agit notamment d'offrir des possibilités de dépassement qui soient suffisantes en termes de longueur (afin de ne pas créer de conflit potentiel avec un véhicule circulant en sens opposé) et en termes de fréquence (de sorte que l'impatience de dépasser ne conduise pas à effectuer des manœuvres dangereuses). Deux aménagements sont à distinguer :

- les zones de dépassement - portions de route où l'insertion du véhicule sur la voie opposée est permise - dépendent de la visibilité, restreinte principalement par les courbes et par les pentes;

- des voies de dépassement sont ajoutées sur certaines portions de la route pour lesquelles les possibilités de dépassement sont trop faibles.

Notre étude se concentre sur le cas des routes rurales sans voies de dépassement. Dans ce contexte, il est inféré que la manœuvre de dépassement est l'élément critique conditionnant tous les indicateurs d'état d'une route (comme la vitesse de parcours ou le temps passé à suivre). En outre, l'objectif n'est pour l'instant pas de réaménager le réseau ; il s'agit plutôt de proposer une méthode permettant de juger la qualité du service rendue par la route, ce qui pose les questions suivantes :

- Avec quels indicateurs et quels outils peut-on déterminer l'offre et la demande de dépassement sur une route rurale ?
- Comment modéliser les interactions complexes entre les différents agents du milieu routier ?
- Comment fonctionne une manœuvre de dépassement ?
- S'il s'avère qu'un modèle peut être construit pour l'examen d'une route rurale, quelles analyses permettra-t-il au planificateur de bâtir ? Quel crédit pourra-t-on leur apporter ?

1.2. Revue de littérature

Normann (1942) établit un modèle déterminant pour un certain débit et une certaine distribution des vitesses le nombre total de véhicules qui seraient rattrapés par un véhicule plus rapide, si les dépassements étaient instantanés et ne provoquaient pas de modification de la vitesse du véhicule dépassant. Il complète son étude par une quantification du nombre de dépassements effectués sur diverses sections de route, ce qui lui permet d'obtenir des données pour l'établissement d'une régression linéaire entre le ratio nombre de dépassements effectués sur nombre de dépassements désirés et le débit total sur la route. Son résultat dépend cependant des faibles capacités dynamiques des véhicules de l'époque, qui permettaient un débit total maximum de

l'ordre de 2000 veh/h. Plusieurs théoriciens (cités dans Luttinen, 2001a ; cf. également Wardrop, 1952) perfectionnent par la suite le modèle déterminant le nombre de dépassements désirés et établissent une formule indiquant, pour une distribution de vitesses désirées connues, le nombre maximum de dépassements possibles sur une route.

Les autres relevés terrain menés sur les manœuvres de dépassements ont plutôt porté sur les caractéristiques dynamiques et décisionnelles. Elles ont notamment pour but la détermination d'une norme pour l'établissement des zones de dépassement. Farber et Silver (1967) effectuent une revue détaillée de ces études. Parmi celles-ci, l'expérience de Crawford (1963) constitue une tentative intéressante de formulation d'une valeur moyenne du créneau minimum nécessaire pour la décision d'initier un dépassement à partir de l'analyse comparée des créneaux acceptés et refusés. Troutbeck (1982) introduit des camions dans la circulation pour induire des dépassements et augmenter la taille de l'échantillon observé ; cette méthode lui permet d'estimer la distribution du créneau minimum nécessaire par une loi log normale. Farber (1969), et Polus (1987) formulent également sur la base d'études terrain d'importantes remarques qualitatives sur les choix effectués lors des manœuvres de dépassement, notamment à travers le concept du confort de conduite.

Ni les modèles théoriques analytiques, ni les relevés terrain ne fournissent suffisamment de données pour la compréhension « qualitative » de l'offre et de la demande de dépassement. Par conséquent, de nombreux analystes se sont orientés sur la conception de simulations de la réalité. La revue de littérature a identifié les logiciels suivants :

- modèles de simulation microscopique à pas de temps discret TWOPAS (St John et Kobett, 1978 ; Leiman, Achilla et May, 1998), SIMLA ++ (Brilon et Brannolte, 1977 ; Brannolte et Holz, 1983), HUTSIM (Kosonen, 2002), SSIUEL (Wu, 1992), TRARR (Hoban, 1982), VTI (Brodin, 1983) ;
- modèle d'automates cellulaires (Simon et Gutowitz, 1998) ;

- modèle de files d'attente de Brilon (1976) ;
- modèle de logique floue de Stang (1993).

Hormis TRARR (Morrall et Werner, 1990), aucun de ces logiciels n'a cependant été exploité pour juger de la qualité de l'offre de dépassement. En outre, Seul SSIUEL décrit exhaustivement les manœuvres reliées à un dépassement sur une route rurale ; les dépassements y sont cependant initiés sur la base d'un raisonnement physique, ce qui conduit à une sous-estimation importante du nombre de dépassements effectués.

Finalement, diverses études se sont intéressées au concept de distance de visibilité de dépassement. D'une part, la distance de visibilité disponible est fournie par diverses approches analytiques (Leiman, Achilla et May, 1998 ; Hassan, Easa et Abd El Halim, 1998). D'autre part, des calculs menés sur des considérations physiques ont mené à l'établissement de normes de détermination de l'emplacement de début et de fin des zones de dépassement et de leur longueur minimale (Baass, 1999 ; Herman, 1972). L'approche employée est normative et ne traduit donc pas la diversité des comportements ; le concept important d'abandon et d'achèvement forcé du dépassement y est cependant introduit.

Sur la base des constatations énoncées pour chaque champ d'étude du dépassement (relevés terrain, modélisation analytique, simulations, considérations physiques), nous constatons qu'aucune approche réelle du concept d'offre et de demande de dépassement n'a abouti à un modèle qualitativement et quantitativement satisfaisant. L'effort de recherche fourni dans ce projet a donc pour objectif d'apporter une contribution pour la détermination des possibilités de dépassement sur une route rurale, en proposant notamment une modélisation originale de la prise de décision de dépasser corrélée au désir de dépasser.

1.3. Méthodologie

La définition de la problématique nous fixe comme objectifs la formulation d'indicateurs traduisant la qualité des possibilités de dépassement sur une route rurale

et la construction et validation d'un logiciel permettant la détermination et l'analyse de ces indicateurs.

1.3.1. Formulation des indicateurs de dépassement

La construction des indicateurs a été établie sur la base d'une analyse critique du concept de niveau de service défini dans le HCM (2000), observant notamment la capacité des indicateurs du HCM 2000 à localiser les points critiques de formation de pelotons et à identifier les raisons de la formation de pelotons (afin d'apporter une réponse adaptée).

Il a ensuite été vérifié d'une part si une méthode de détermination des indicateurs nous était fournie par la théorie des routes rurales et d'autre part si certains outils développés antérieurement ne produisaient pas les valeurs recherchées.

1.3.2. Formulation du modèle de description des routes rurales

L'argumentation développée lors de l'effort de recherche pour la construction des indicateurs a montré que la simulation microscopique du trafic était l'outil le plus adapté à leur détermination. Or, ces modèles nécessitent une quantité importante de relevés terrain, non seulement pour la phase de validation postérieure à la construction du modèle, mais aussi lors de l'établissement même des hypothèses. Considérant les contraintes temporelles et organisationnelles du projet, il était impossible d'obtenir de telles données préalablement à l'obtention d'un modèle. Heureusement, ainsi que souligné dans la revue de littérature, de nombreux projets sont parvenus à l'établissement de logiciels de simulation des routes rurales, ce qui nous fournit une base de connaissance et de comparaison fondant la réflexion. Une analyse comparative des modèles sous-jacents nous permettra donc d'ajuster un modèle possédant des propriétés physiques réalistes.

Le comportement de conduite est généralement décomposé en une série de sous manœuvres. Ceci correspond à l'intuition : la conduite sur une voie est par exemple

composée de phases où aucun véhicule ne gêne le mouvement, de phases d'approche d'un véhicule plus lent, d'une période d'attente derrière le véhicule lent et de situations de danger. De fait, la conduite sur route rurale est représentée par une multiplicité de sous manœuvres, ce qui rend complexe la tâche de modélisation et de présentation du modèle. De fait, aucune revue générale détaillée de la littérature n'est envisageable, et chacune des sous manœuvres sera donc analysée selon le schéma suivant :

- exposition des suppositions et équations développées dans la littérature ;
- choix ou reformulation d'un modèle.

La validation de l'algorithme proposé s'effectuera sur la base de formules analytiques reconnues de la littérature et d'une vérification « philosophique » des divergences entre les résultats des simulations et ces formules. Les paramètres à calibrer sont détaillés exhaustivement, ainsi que des méthodes de relevés pour leur détermination ; la plupart de ces paramètres correspondent à des propriétés simples des véhicules ou à des attitudes psychologiques des conducteurs.

Finalement, une analyse de résultats sera effectuée sur une section de la route 101 en Abitibi-Témiscamingue, ce qui permettra de discerner de quel potentiel le modèle dispose pour l'aide à la décision.

Chapitre 2. Définition de mesures d'efficacité pour le dépassement

Depuis les années 1950 (selon Gazis, 2002), la science « théorie de la circulation » s'est développée afin de fournir aux ingénieurs un outil de compréhension des phénomènes physiques se déroulant sur les routes. Typiquement, une infrastructure ou un projet d'infrastructure est classifié selon un concept de niveaux de service (LOS, *level of service*, cf. HCM 2000). Les LOS sont définis par un ensemble de mesures d'efficacité (MOE : *measure of effectiveness*) traduisant la gêne ou le coût de conduire sur la route – sur une autoroute, la densité de circulation est ainsi la MOE principale. Le LOS est défini selon chaque catégorie de route (i.e. autoroutes, réseau urbain, routes rurales).

La catégorie routes rurales est très délicate à décrire par la théorie de la circulation. Notamment, l'effet du trafic en sens inverse est délicat à prendre en compte et les calculs des MOE sont donc très complexes. De plus, la définition de ces MOE même pose problème. Les sensations de conduite sont ainsi très différentes des autres réseaux routiers, sur lesquels peu de place est laissée au libre-arbitre des conducteurs – les autoroutes sont conçues pour proposer une sécurité maximum, il y est donc possible de conduire à n'importe quelle vitesse, tandis que les réseaux urbains imposent des règles et des conditions de circulation très contraignantes. Le gestionnaire doit distinguer la description du réseau selon un optimum individuel (satisfaction de l'usager) ou selon un optimum collectif (insécurité,…).

Cette analyse conduit à la formulation des questions :

- Quels indicateurs doivent être construits pour l'analyse globale des possibilités de dépassement sur une route rurale ?
- Quelles méthodes permettront la détermination de ces indicateurs ?

2.1. Construction des indicateurs de possibilité de dépassement

2.1.1. Principe du LOS – HCM 2000

2.1.1.1 Concept général

Le LOS est une variable permettant de décrire la qualité du service rendu à l'usager. Chaque type de réseau disposant de ses propres fonctions, le LOS devrait donc être caractérisé par des MOE distinctes. Cependant, la compréhension « classique » macroscopique d'une route se base nécessairement sur la compréhension des trois variables d'état : densité K (veh/km), débit Q (veh/h) et vitesse de parcours V (km/h). Les relations entre ces variables permettent de comprendre le fonctionnement d'une route. La Figure 2-1 illustre un diagramme Q-K pour un cas hypothétique.

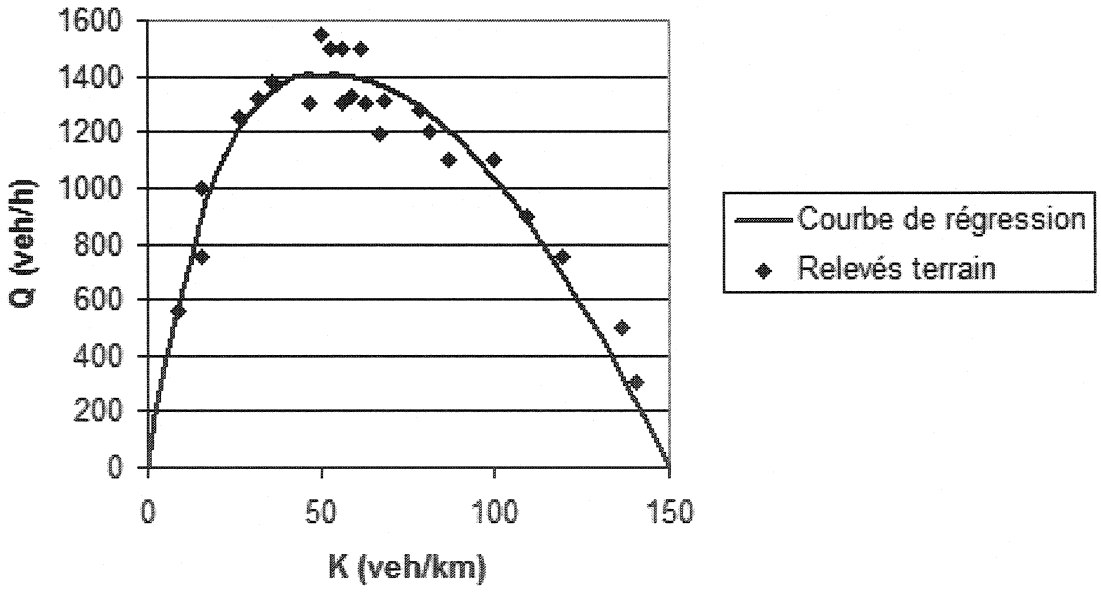


Figure 2-1: diagramme fondamental Q – K

La figure représente des données de trafic (représentés par les points) et une interpolation de ces données (ligne continue). Les caractéristiques de la route sont les suivantes :

- lorsque la vitesse est nulle, la concentration est maximum, il y a blocage de la circulation, le débit est donc également nul ;
- lorsque aucun véhicule n'est présent sur la portion de route, le débit et la concentration sont donc nuls, les conducteurs ne subissent pas de gêne et roulent donc à leur vitesse désirée, la vitesse moyenne de parcours est donc maximum.
- entre ces deux instants se trouve une densité de véhicules qui correspond à la capacité maximum de la route, au-delà de laquelle un phénomène de congestion se développe.

Tableau 2-1 : niveaux de service sur une route à 4 voies et deux sens de circulation, extrait du HCM 2000

		Niveau de service				
Vitesse libre (km/h)	Critère	A	B	C	D	E
100	Densité maximum (uvp/km)	7	11	16	22	25
	Vitesse moyenne (km/h)	100	100	98.4	91.5	88
	Rapport débit maximum/capacité	0.32	0.50	0.72	0.92	1
	Débit maximum de service par voie (uvp/h)	700	1100	1575	2015	2200
90	Densité maximum (uvp/km)	7	11	16	22	26
	Vitesse moyenne (km/h)	90	90	89.8	84.7	80.8
	Rapport débit maximum/capacité	0.3	0.47	0.68	0.89	1
	Débit maximum de service par voie (uvp/h)	630	990	1435	1860	2100
80	Densité maximum (uvp/km)	7	11	16	22	27
	Vitesse moyenne (km/h)	80	80	80	77.6	74.1
	Rapport débit maximum/capacité	0.28	0.44	0.64	0.85	1
	Débit maximum de service par voie (uvp/h)	560	880	1280	1705	2000
70	Densité maximum (uvp/km)	7	11	16	22	28
	Vitesse moyenne (km/h)	70	70	70	69.6	67.9
	Rapport débit maximum/capacité	0.26	0.41	0.59	0.81	1
	Débit maximum de service par voie (uvp/h)	490	770	1120	1530	1900

Ces propriétés sont valables pour tout type de route. Le LOS est fondé sur ce type de diagrammes fondamentaux.

Dans le cas d'une route à au moins 4 voies et à deux sens de circulation (il s'agit de routes utilisées en contexte plutôt périurbain), le niveau de service est décrit comme sur le Tableau 2-1. Les valeurs frontières (pour différents indicateurs) entre les différents niveaux de service y sont indiquées. À chaque lettre correspond un état de service de la route. Le niveau de service A est celui pour lequel tous les véhicules peuvent circuler à leur vitesse désirée, tandis que le niveau de service E correspond à la capacité de la route (c'est l'état de la route correspondant au débit maximum sur le diagramme fondamental, cf. Figure 2-1). Si on reporte ces valeurs sur le diagramme fondamental, on obtient la Figure 2-2. Cette figure indique en ligne continue le diagramme Q-K dans le domaine non congestionné ; la ligne discontinue est une extrapolation pour le domaine congestionné.

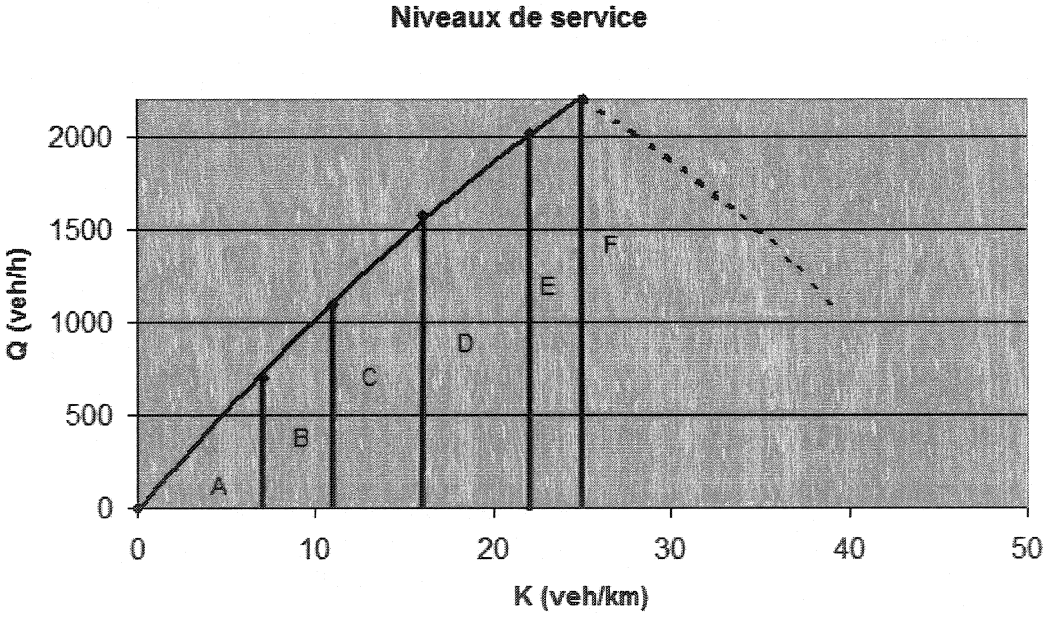


Figure 2-2 : schéma « théorique » des niveaux de service sur le diagramme fondamental

2.1.1.2 LOS sur une route rurale

Dans le cas des routes rurales, les contraintes géométriques (courbes à rayon faible, pentes importantes), l'influence du trafic en sens opposé (nombre d'opportunités de

dépassement) ou le temps perdu derrière un véhicule lent sont des indices de la qualité des conditions de circulation fournies. Par ailleurs, si le HCM 2000 considère que la capacité de ces routes est de 3200 veh/h pour l'ensemble des deux sens de circulation, il est noté dans la littérature (St John et Kobett, 1978) qu'aucun cas de route rurale fonctionnant à capacité n'a été observé jusqu'alors. L'étude classique du diagramme fondamental perd donc de sa pertinence.

Les chapitres 12 et 20 du HCM 2000 déterminent la problématique des routes à deux voies contiguës et définissent une méthode pour déterminer le LOS. Ce type de route est distingué en 2 catégories, selon l'objectif des usagers sur cette route. La classe I concerne les jonctions entre centres urbains importants, qui peuvent contenir une proportion importante de véhicules commerciaux (type poids lourd), sur lesquelles les conducteurs visent à minimiser le temps de parcours ; la classe II concerne les connections entre les itinéraires importants, les zones résidentielles, il peut s'agir également de routes à caractère récréatif ou fortement montagneuses. Sur les routes de classe I les indicateurs de vitesse moyenne de parcours et de pourcentage du temps passé à suivre un véhicule lent (formation de pelotons) caractérisent le niveau de service tandis que les routes de classe II sont caractérisées uniquement par le pourcentage de temps passé à suivre un véhicule lent.

Les Tableau 2-2 et Tableau 2-3 indiquent les seuils des indicateurs pour la détermination des niveaux de service.

La demande de trafic, donnée mesurée sur la plupart des grands axes, est l'élément de base du calcul. Or, cette demande est hautement variable (au sein d'une journée, d'une semaine ou d'une année). La méthode d'analyse propose de considérer la $30^{ème}$ ou la$100^{ème}$ heure la plus chargée de l'année. Brilon (2000) indique que cette méthode n'est pas adaptée à une réelle analyse bénéfice coût d'un projet. Il propose de déterminer le trafic pour chaque heure de l'année, à partir de schémas standardisés de demande sur l'année, la semaine et la journée.

Tableau 2-2 : niveau de service sur une route rurale de classe I, extrait du HCM 2000

Level of service	Percent time spent following	Average travel speed (km/h)
A	≤ 35	> 90
B	> 35-50	> 80-90
C	> 50-65	> 70-80
D	> 65-80	> 60-70
E	> 80	≤ 60

Note: Level-of-service F applies whenever the demand flow rate exceeds the segment capacity.

Tableau 2-3 : niveau de service sur une route rurale de classe II, extrait du HCM 2000

Level of service	Percent time spent following
A	≤ 40
B	> 40-55
C	> 55-70
D	> 70-85
E	> 85

Note: Level-of-service F applies whenever the demand flow rate exceeds the segment capacity.

Afin de déterminer le niveau de service, la route doit également être découpée en segments sur lesquels les conditions de circulation (trafic, rayons des courbes, pentes verticales) sont considérées homogènes. Cette agrégation des données semble peu adaptée au cas d'une route rurale pour laquelle les données de trafic varient pratiquement à chaque instant du fait de l'influence très forte de la géométrie sur la conduite.

2.1.1.3 Applicabilité du concept de LOS à la caractérisation du dépassement

La norme américaine définit donc un indicateur (le pourcentage du temps passé à suivre un véhicule lent) donnant une appréciation indirecte des possibilités de dépassement, justifiant ce choix par l'impossibilité de réaliser des mesures plus directes telles que la proportion de dépassements effectués parmi la population des conducteurs désirant effectuer un dépassement. L'information fournie par cet indicateur est cependant pauvre, car elle ne permet pas de reconstituer la raison pour laquelle beaucoup de conducteurs doivent suivre un véhicule lent. De fait, la construction d'un outil d'aide à la décision de réaménagement d'une route rurale nécessite une étude

détaillée permettant non seulement de détecter les zones où le dépassement est difficile, mais aussi les causes, afin de sélectionner la mesure appropriée. Ainsi, si le dépassement est rendu impossible principalement à cause du trafic opposé, une voie de dépassement pourrait être envisagée, tandis que si la situation provient d'une longueur insuffisante de zone de dépassement il peut être suffisant de rectifier le tracé routier pour augmenter la distance de visibilité disponible.

2.1.2. Définition d'un indicateur de possibilités de dépassement

Revue de littérature

Selon Morrall et Werner (1990), le LOS perçu sur une route rurale dépend de la possibilité pour les conducteurs d'effectuer des dépassements lorsqu'ils le désirent. L'analyse le conduit à proposer un indicateur supplémentaire à l'analyse du HCM, à savoir le ratio entre la demande de dépassement et l'offre de dépassement. Grâce au logiciel de simulation TRARR (Lovell, Lau et May, 1988 ; Hoban, 1982), Morrall et Werner comparent les variations de pourcentage de temps passé à attendre et du ratio de dépassement en fonction du débit, pour des conditions idéales avec 0% de zones de non dépassement (Figure 2-3). Le ratio de dépassement est la courbe initialement maximale et décroissant en fonction du débit total[2].

L'indicateur du ratio de dépassement semble pertinent ; la décroissance du ratio de dépassement est ainsi plus prononcée que la croissance du pourcentage de temps passé à suivre un véhicule pour des débits entre 200 et 800 véh.h^{-1}. Morrall et Werner proposent cependant une analyse de type « HCM », i.e. agrège les données sur des sections de route, ce qui implique un découpage progressif d'une route afin de trouver des zones à caractéristiques homogènes. Cependant, du fait du développement de capacités de calcul et de représentation des données (Systèmes d'Informations

[2] Dans le reste du document débit total = somme des débits directionnels ; débit directionnel = débit dans un sens de circulation

Géographiques), deux conditions sont indispensables à l'établissement d'un logiciel d'analyse performant :

- les données sont représentées à une échelle fine, permettant de détecter les endroits précis d'intervention;
- l'analyse est désagrégée et établit donc précisément les causes de l'éventuelle insuffisance.

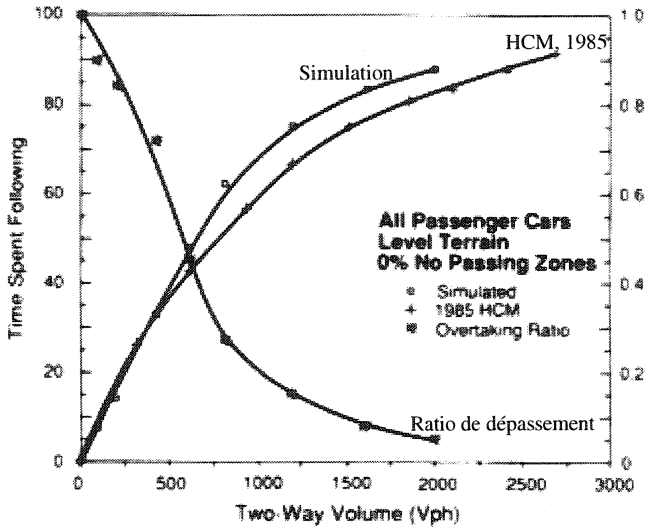


FIGURE 7 Overtaking ratio and percent time delay versus two-way volume for ideal conditions.

Figure 2-3: Ratio de dépassement, figure extraite de (Morrall et Werner, 1990)

Modèle proposé

Il est possible de déterminer en chaque point d'une route le nombre Nd de véhicules désirant dépasser et ne le pouvant pas et Ne de ceux effectuant un dépassement. Le rapport Ne / (Nd+Ne) correspond au ratio de dépassement tel que proposé par (Morrall et Werner, 1990). Cet indicateur est cependant une idéalisation du comportement des conducteurs. Il suppose que le désir de dépasser est un processus binaire conduisant à une volonté d'effectuer la manœuvre dès que son coût (variation de la vitesse, prise de risque) est plus important que celui de suivre (perte de vitesse, de plaisir, retard). Dans les faits, le désir de dépasser est un processus « flou ». Ainsi, considérons un véhicule

se trouvant en queue d'un peloton à une distance importante du véhicule de tête, lui imposant une vitesse si faible qu'il lui est inimaginable d'y effectuer l'intégralité de son trajet. Il ne va considérer un dépassement que si cela lui est profitable, c'est-à-dire s'il dispose d'un créneau suffisant dans la circulation opposée pour lui faire dépasser plusieurs véhicules : son désir de dépasser est donc relativement faible. Supposons maintenant que les autres véhicules du peloton aient dépassé le véhicule de tête. Le véhicule considéré se retrouve alors immédiatement derrière le véhicule de tête. Son désir de dépasser devient maximum et la taille du créneau accepté diminue fortement.

Le désir de dépasser est donc une variable reliée au créneau de dépassement. Il caractérise l'attention portée à saisir une opportunité de dépassement. Si le désir est maximum, l'attention est intense et le conducteur saisit la première opportunité dont il dispose puis module son dépassement en fonction des circonstances de dépassement. Cette caractéristique des conducteurs sera représentée par un terme générique appelé l'impatience, compris entre 0 et 1, qui pondère le créneau minimum qui peut être accepté par un conducteur. Il distingue deux effets différents de l'environnement sur le choix : l'utilité du dépassement (gain de vitesse) et les conditions du dépassement (danger de la manœuvre, facilité à se réinsérer après l'accomplissement de la manoeuvre). L'impatience sera modélisée au Chapitre 5 Manœuvre de dépassement.

L'introduction de la notion d'impatience rend difficile le calcul du nombre de dépassements désirés ; il est estimé en considérant que les conducteurs ayant une impatience strictement positive désirent dépasser. On propose en fait de caractériser le dépassement en mesurant en chaque point le nombre de dépassements effectués, non effectués et les valeurs moyennes[3] de l'impatience de dépasser ainsi que ses deux composantes. Une étude ultérieure pourrait déterminer d'autres facteurs tel que le temps de dépassement, les marges de sécurité (témoin d'un dépassement difficile) ou

---

[3] Les véhicules effectuant un dépassement n'ont plus de désir de dépasser et sont donc retirés de la population pour le calcul de la moyenne.

encore la taille des pelotons ; il s'agit donc de construire un outil pouvant s'adapter ensuite à ces besoins.

Dans notre cas, l'analyse s'effectuera sur une simulation d'un certain trafic à une certaine période et en un seul lieu – section 33 de la route 101, Abitibi-Témiscamingue. Selon les indications de Brilon (2000), les projets doivent être dimensionnés sur une année complète. Par conséquent, il est conseillé que les méthodologies ultérieures utilisant le logiciel développé ici tiennent compte de l'évolution de la demande de trafic sur une année.

2.2. Méthodes d'analyse des routes rurales

L'objectif de ce paragraphe est de rechercher dans la littérature une méthode permettant de procéder au comptage précédemment envisagé.

2.2.1. Rappels théoriques sur le dépassement

Luttinen (2001a) décrit les recherches effectuées sur le mécanisme de la manœuvre de dépassement, ayant pour objectif de déterminer l'offre et la demande de dépassement.

La demande de dépassement provient de la différence de vitesse entre les véhicules. La formule de Wardrop (1952) (telle qu'indiquée dans Luttinen, 2001a) approxime cette demande par : $N = \frac{\sigma Q^2}{V^2 \sqrt{\pi}}$. Cette formule lie le nombre N de dépassements par heure et par kilomètre au débit directionnel Q (veh/h) sur la route, à la vitesse moyenne V (km/h) pratiquée et à l'écart type σ (km/h) des vitesses. Elle suppose une distribution normale des vitesses, un débit dans le sens opposé nul, une route de largeur et de longueur infinie et des véhicules roulant et dépassant à vitesse constante. En outre, les véhicules de vitesse v_i désirent dépasser les véhicules de vitesse v_j dès que $v_i > v_j$. N correspond en fait à la demande maximale de dépassements dans des conditions idéales. La demande effective est restreinte par les retards occasionnés lorsqu'un véhicule rattrape un véhicule lent et ne peut dépasser immédiatement du fait d'une

mauvaise visibilité ou de l'absence d'un créneau de dépassement dans le trafic en sens opposé. Luttinen (2001a) n'indique aucune estimation de la demande tenant compte de ces facteurs.

Une opportunité de dépassement se présente lorsqu'une distance de visibilité minimale est disponible, que le véhicule se situe dans une zone de dépassement et qu'un créneau de dépassement C_{opp} dans le trafic en sens opposé se présente. Ce dernier est comparé au créneau C_{nec} correspondant à la distance à parcourir ou au temps passé dans la voie opposée par le véhicule dépassant. Si $C_{opp}>C_{nec}$, un dépassement est entamé. Moyennant certaines hypothèses sur la dynamique des véhicules, ces différents éléments peuvent être calculés et comparés, en fonction de la taille du peloton à dépasser. La combinaison de ces paramètres (visibilité, zone de dépassement, créneau suffisant, peloton) dans une approche statistique similaire à celle développée par Wardrop dans son calcul de la demande de dépassement, crée de telles difficultés de calculs que des simplifications importantes doivent être apportées au modèle pour obtenir un résultat. Kallberg (1980) développe par exemple un modèle tenant compte de la distance de visibilité en considérant une probabilité constante P_S que la distance de visibilité soit suffisante en chaque point.

Lorsque de telles difficultés théoriques sont présentes, une recherche empirique est développée. Normann (1942) effectue des relevés sur les dépassements et obtient une équation décrivant le ratio dépassements observés sur dépassements désirés P :

$P = 0.903 - 0.000467q$, où q est le débit total de la route. Ces résultats n'ont cependant pas été confirmés par d'autres études empiriques et sont donc caractéristiques d'une situation particulière. La Figure 2-4, extraite de Vouland (2003), indique en traits continus le nombre de dépassements désirés (selon le modèle de Wardrop, courbe du dessus) et effectués (selon les mesures effectuées par Normann, courbe du dessous) par heure et par kilomètre et en points discontinus les mêmes indicateurs, divisés par le nombre de véhicules impliqués.

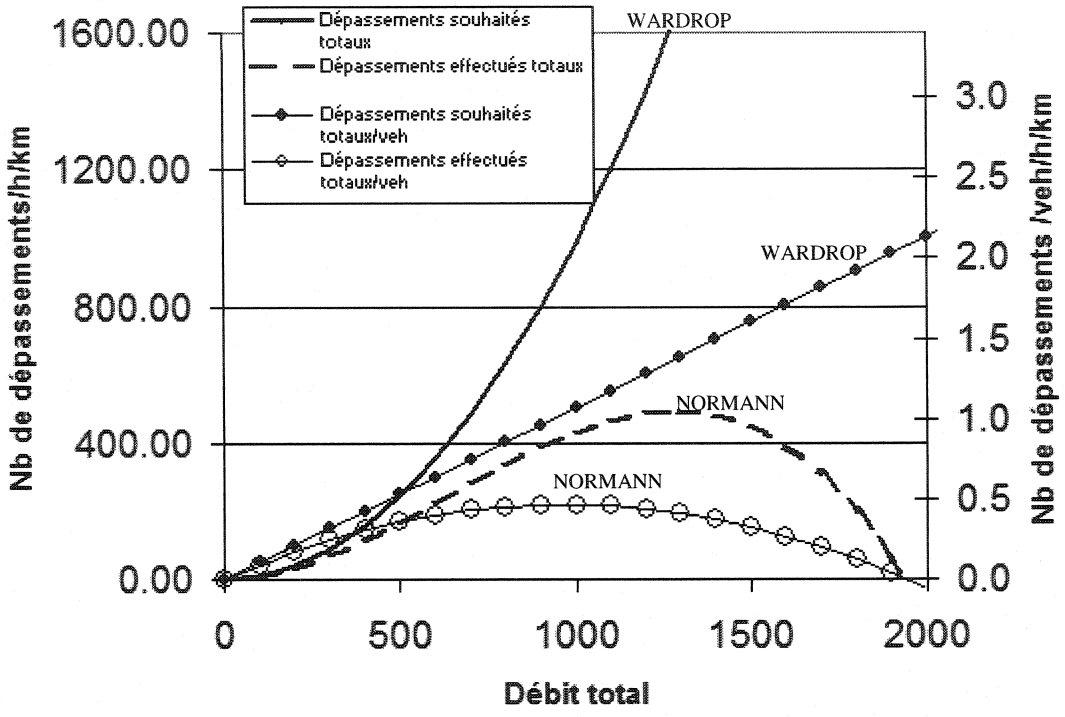


Figure 2-4: nombre de dépassements souhaités et effectués

La Figure 2-4, pour un débit sur la route principale égal à deux tiers du débit total, montre une certaine cohérence entre l'approche empirique de Normann et les travaux théoriques sur la demande de dépassement. Lorsque le débit est faible, tous les dépassements désirés peuvent être effectués. Cependant, comme il y a peu de voitures, le nombre de dépassements est faible. Lorsque le débit total augmente, les opportunités de dépassement diminuent, car les véhicules en sens opposé sont plus proches, mais le désir de dépasser augmente, car la route est caractérisée par une plus grande hétérogénéité des vitesses désirées. Le nombre de dépassements croît donc plus faiblement que le nombre de dépassements désirés. Finalement, à un certain point de trafic, les créneaux de dépassement disponibles sont tellement courts que le nombre de dépassements effectués diminue pour atteindre une valeur nulle à partir d'un certain débit. Toute analyse des dépassements devrait au minimum reproduire ces caractéristiques.

La théorie sur les routes rurales n'a donc pour l'instant pas d'outil générique à proposer qui permettrait une comparaison de l'offre et de la demande de dépassement. D'une part, la demande n'est déterminée que dans des conditions idéales, d'autre part l'offre n'a pas pu être calculée de manière concluante. Ceci tient à la nature locale (distance de visibilité) et dynamique (comportements des conducteurs, accès aux créneaux de dépassement) de la manœuvre. Cette réflexion nous conduit à proposer une simulation permettant une représentation géographique – s'adaptant à chaque route – et une considération des motivations de chaque conducteur.

2.2.2. Description de la méthode de simulation

2.2.2.1 Propriétés désirées

Un modèle simulant une route rurale de façon à représenter l'offre et la demande de dépassement en chaque point d'une route doit être construit. Il doit également permettre de distinguer les causes de l'impossibilité de dépasser. Enfin, les comportements individuels doivent être pris en compte.

De nombreux facteurs interviennent donc, distribués selon des lois complexes. Ainsi, un dépassement dépend des caractéristiques suivantes :

- Les caractéristiques géométriques du véhicule : longueur et largeur influencent la distance de dépassement ;
- Les caractéristiques dynamiques : décélération maximum acceptée, accélération disponible et vitesse désirée ;
- Un processus de choix : créneau de dépassement accepté, créneau pour lequel un conducteur abandonne un dépassement ;
- Un processus dynamique du dépassement : accélération acceptée, vitesse de dépassement ;

- Une coopération entre les véhicules : à quel niveau de danger les conducteurs dépassés et arrivant en sens opposé vont adapter leur conduite pour éviter un accident avec le véhicule dépassant ?

La simulation microscopique étudie les mouvements et les décisions de chaque conducteur sur l'intégralité de son trajet (cf. Rothery, 1992), en décrivant exhaustivement les interactions entre celui-ci et l'environnement. L'agrégation des données pour la représentation de l'offre et de la demande de dépassement nécessite simplement une procédure de comptage et de stockage des états des véhicules. En outre, les motivations des conducteurs peuvent être conservées – i.e. les interactions qui ont basé le choix de dépasser ou non. Ces propriétés nous conduisent à proposer un modèle microscopique pour la détermination de l'offre et de la demande de dépassement.

2.2.2.2 Principes de la simulation

Plusieurs méthodologies de simulation microscopique ont été développées. (Lieberman et Rathi, 1992) les classifie selon le principe (simulation par évènements discrets ou discrétisée selon le temps ou l'espace) et la nature (stochastique ou déterministe). Étant donné que l'approche n'est pas normative, un modèle à caractère stochastique s'impose. La simulation par évènements discrets a historiquement été utilisée lorsque les performances de calcul sont un facteur limitant. Elle nécessite généralement un effort de modélisation et de programmation plus important. Choisir une telle méthode reviendrait à recréer les problèmes rencontrés par la tentative de détermination analytique de l'offre et de la demande de dépassement.

Une simulation discrétisée et stochastique est donc sélectionnée. Trois discrétisations sont possibles, présentées dans le Tableau 2-4, qui indique quelques modèles développés dans chacun des cas.

Tableau 2-4 : principes de discrétisation

Temps \ Espace	Continu	Discret
Continu		Gipps, Pipes, GM,…
Discret	N/A[4]	Automates cellulaires

Le processus décisionnel étant fortement relié au temps, la plupart des modèles traite le temps de façon discrète. Certaines avancées scientifiques récentes considèrent cependant que l'univers dans lequel nous vivons est composé de cellules (dans sa dimension spatiale) et n'est pas « trompeusement » continu, cf. Wolfram (2002). La complexité émergerait de l'interaction de divers automates cellulaires à plusieurs échelles. Cependant, la description du réseau routier ainsi que le traitement des vitesses par ces modèles sont trop peu détaillées pour le niveau de compréhension des caractéristiques de dépassement envisagées.

Le choix se porte sur des modèles à pas de temps discret et à espace continu, qui permettent une modélisation simple et comportementale. Les principes généraux se rapportant à ces modèles vont être décrits au Chapitre 3 Développement d'un outil de simulation microscopique des routes rurales.

2.2.3. Principe de calcul des indicateurs

La simulation développée considère l'évolution du système à certains instants, entre lesquels l'intervalle Δt est constant. À chaque pas de temps, les indicateurs sont obtenus simplement par un comptage des dépassements en cours ou une sauvegarde des

[4] Aucun travail à ce sujet n'a été trouvé dans les ressources d'information reconnues (TRB, Journal of transportation engineering,…), ceci n'assure en aucun cas que des modélisations de ce type n'ont pas été étudiées.

propriétés psychologiques de chaque conducteur. Cependant, la représentation désirée est désagrégée géographiquement, ce qui suppose qu'on désire connaître les indicateurs en tout point de la route. À chaque modification des propriétés du conducteur dans la simulation, celles-ci sont valables à partir d'une certaine position x(t) et jusqu'à une position $x(t+\Delta t)$ connues. Étant donné que les diagrammes X-T (trajectoires des véhicules dans le temps) sont une donnée de sortie impérative pour un tel modèle, car elle permet une validation de principe (vérification de l'absence de comportement irréaliste), les points x(t) sont sauvegardés pour chaque véhicule. Conserver parallèlement les indicateurs de dépassement pourrait donc être possible. Cependant, deux remarques nous conduisent à renoncer à cette démarche :

1. Tout d'abord, les données devraient subir un post-traitement permettant de visualiser non pas uniquement une situation individuelle, mais également l'intégralité du trafic. Étant donné la quantité d'information à traiter (une simulation de 1 heure avec un pas de temps de 1 s et un trafic de 1000 véhicules exige 3 600 000 enregistrements par variable), il semble plus efficace de réaliser le traitement au cours de la simulation ;
2. Les comportements temporels sont simplifiés. Le désir de dépasser n'est en fait pas constant entre t et $t+\Delta t$ mais varie continûment. Par conséquent, si l'espace est discrétisé par des points x_i, et qu'au minimum un point x_i est toujours situé dans l'intervalle temporel, les propriétés de dépassement seront suffisamment finement décrites.

Le comptage des propriétés de dépassement est effectué par des détecteurs situés à des emplacements ponctuels, selon un schéma de discrétisation spatial. Le pas de discrétisation Δx doit être déterminé de telle sorte que :

- la représentation spatiale soit quasi-continue (Δx de l'ordre du mètre);

- les données pour un véhicule et un pas de temps Δt soient la plupart du temps enregistrées une unique fois (Δx fonction du produit de la vitesse maximale par Δt).

On considère qu'une valeur de 10 mètres pour Δx permet de tenir compte de ces remarques. Avec cette valeur, sachant que Δt est généralement de l'ordre d'une seconde et que la vitesse des véhicules est située dans la fourchette [15 m/s ; 30 m/s], il est assuré qu'au moins un point d'enregistrement sera disponible sur Δt pour chaque véhicule, sauf en cas de congestion. Dans ce dernier cas, les conditions de circulation sont telles que le dépassement est de toute façon impossible. Celles-ci changent cependant brusquement à la sortie de la zone de congestion. Cependant, le conducteur ne considérera pas un dépassement avant la fin de la manœuvre de redémarrage. À ce moment, ses caractéristiques dynamiques sont telles que notre densité de points d'enregistrement (x_i) est suffisante pour à nouveau capter finement les variations spatiales des indicateurs.

Dans notre analyse, uniquement l'évolution spatiale des indicateurs est considérée. Cependant, il s'agit dans les faits de processus dynamiques qui évoluent constamment dans le temps, du fait des caractéristiques de la circulation (absence ponctuelle de véhicules). Une compréhension détaillée visant à distinguer des pistes d'amélioration du réseau impose une compréhension de ces phénomènes temporels, elle n'entre cependant pas dans les objectifs de ce mémoire. Le lecteur peut se référer à Brilon (2000) pour une méthode d'analyse bénéfice coûts.

Chapitre 3. Développement d'un outil de simulation microscopique des routes rurales

La simulation microscopique est un outil gagnant rapidement en popularité. Ce pouvoir d'attraction est expliqué partiellement par la capacité à représenter des animations en 3D proches de la réalité qui permettent une compréhension simple et accessible à tous. Le projet SMARTEST (1997) effectue une revue de 57 logiciels existants, parmi lesquels AIMSUN, VISSIM ou CORSIM ont été développés à l'échelle internationale et sont maintenant couramment utilisés pour la réalisation de projets routiers.

Notre méthode d'analyse des possibilités de dépassement nécessite l'utilisation d'un logiciel basé sur ces principes, caractérisant les routes rurales. La revue de littérature effectuée dans ce projet identifie cinq logiciels principaux, développés spécifiquement pour ces réseaux : il s'agit de TWOPAS (St John et Kobett, 1978), SIMLA ++ (Brilon et Brannolte, 1977 ; Brannolte et Holz, 1983), HUTSIM (Kosonen, 2002), SSIUEL (Wu, 1992) et TRARR (Hoban et Mc Lean, 1982). En outre, (Brannolte et Holz, 1983) et Wu (1992) identifient de nombreux modèles développés en Allemagne mais qui n'ont pas connu de publication internationale. Le lecteur est renvoyé à ces auteurs pour une description de ceux-ci. Une approche par le biais d'automates cellulaires (Simon et Gutowitz, 1998) décrit le comportement sur une route à deux voies et deux sens de circulation – mais sans courbes et sans pentes. Enfin, Stang (1993) modélise les comportements de conduite sous un angle psychologique et calibre son modèle sur les routes rurales.

Dans un premier temps, l'absence d'un modèle, permettant de dégager les indicateurs définis au Chapitre 2 Définition de mesures d'efficacité pour le dépassement, est constatée, nous obligeant à la construction d'un modèle. Une revue détaillée de ces modèles nous a permis de développer une philosophie de modélisation des comportements. Ce chapitre illustre cette démarche.

3.1. Historique des logiciels de simulation microscopique des routes rurales

3.1.1. Éléments théoriques de la simulation microscopique

Une simulation microscopique « classique » (à pas de temps constant) examine le changement de position de chaque véhicule à intervalles de temps constants (typiquement 1s). La taille du pas dépend de la capacité des ordinateurs et du principe de modélisation (certains modèles supposent un temps de réaction des conducteurs constant et prennent ce temps comme référence pour les calculs). Historiquement, ces modèles ont été développés pour les artères urbaines et autoroutières et comprennent deux composantes :

1. un modèle permettant de calculer l'accélération du véhicule en réponse à son environnement et aux programmes de conduite du conducteur, souvent appelé « modèle de voiture suiveuse »;
2. un diagramme permettant d'effectuer une décision de changer de voie.

Les deux composantes sont décrites en détail à l'annexe A. En ce qui concerne la première composante, le lecteur peut également se reporter à (Brackstone et McDonald, 1999).

3.1.2. Caractéristiques des logiciels de simulation des routes rurales

La modélisation des routes rurales à deux voies et deux sens de circulation n'est pour l'instant pas prise en compte par les logiciels de microsimulation utilisés couramment par les ingénieurs à des fins telles que le contrôle en temps réel, l'aide à la décision en matière de restructuration du réseau routier (localisation des origines des problèmes de congestion, comparaison d'alternatives d'aménagements) ou la compréhension de l'impact de systèmes intelligents (contrôle automatique de la vitesse, proposition intelligente d'itinéraires). Ainsi, SMARTEST (1997) ne mentionne qu'un seul logiciel de microsimulation des routes rurales (TRARR) et n'identifie cependant aucune lacune de modélisation reliée à ce réseau, alors que les objectifs du projet étaient les suivants :

> *« i) review existing micro-simulation models, so that gaps can be identified.*
> *[...]*
> *ii) investigate how the existing models could best be enhanced to fill the identified gaps, thus advancing the State-of-the-Art.*
> *[...]*
> *iii) incorporate the findings of the study into a best practice manual for the use of microsimulation in modelling road transport and to disseminate these findings widely throughout Europe. »*

De fait, la littérature ne propose que très peu d'études comparatives des logiciels qui permettraient de choisir une interface pour la détermination de nos indicateurs. Harwood, May, Anderson, Leiman, et Archilla (1999) identifient deux logiciels (TWOPAS et TRARR), pour lesquels il estime que les capacités et les caractéristiques sont comparables. Koorey (2002) compare les performances de TWOPAS, TRARR et PARAMICS – un logiciel de simulation adapté aux cas périurbains – pour la modélisation des routes rurales en Nouvelle Zélande et conclue que TWOPAS montre le comportement général le plus robuste, car le modèle est spécifique aux routes rurales et encore en phase de développement.

Cette première revue centrée sur les utilisations des logiciels n'est certes pas concluante, car elle n'a pas permis de distinguer si les logiciels seront capables d'intégrer l'indicateur de dépassement développé au chapitre précédent. Une consultation directe des guides d'utilisateur et des documents techniques décrivant les modèles utilisés a donc été effectuée. Elle a concerné les logiciels SIMLA ++ (Brilon et Brannolte, 1977 ; Brannolte et Holz, 1983), SSIUEL (Wu, 1992), TWOPAS (St John et Kobett, 1978 ; Leiman, Achilla et May, 1998), HUTSIM (Kosonen, 2002), TRARR (Hoban et Mc Lean, 1982), VTI (Brodin, 1983) ainsi qu'un modèle d'automates cellulaires (Simon et Gutowitz, 1998) et un modèle psychologique (Stang, 1993). Un résumé des principales caractéristiques de ces modèles est fourni à l'annexe C. On observe que les données de sortie de ces logiciels se concentrent toujours sur des données très agrégées tels que les indicateurs du LOS ou le nombre de dépassements sur une certaine section. L'utilisation d'un de ces logiciels nécessiterait donc une re-

programmation, afin que ceux-ci satisfassent aux besoins décrits au Chapitre 2 Définition de mesures d'efficacité pour le dépassement. Étant donné la finesse de description recherchée, il est nécessaire de comprendre les modèles développés pour chaque manœuvre. Le choix d'une interface se ferait en outre sur une base de comparaison des différents modèles. Dans ce cadre il nous apparaît plus pertinent de développer un modèle propre, se basant sur les remarques et pistes d'amélioration de ces différents modèles, qui permettra à une étape ultérieure du projet de recherche sur la problématique des zones de dépassement d'intégrer des comportements non détectés dans la littérature et spécifiques au cas du Québec.

3.1.3. Comportements à modéliser

La comparaison des modèles de route rurale montre à quel point le déplacement d'une voiture sur une route rurale a des caractéristiques très différentes du milieu urbain ou d'une autoroute : le trafic opposé a une influence importante (si la largeur de la chaussée est restreinte, si un conducteur désire dépasser), la négociation des courbes impose une réduction de la vitesse, des pentes à fort pourcentage peuvent se présenter, des véhicules très lents peuvent s'insérer dans le réseau.

Principalement, l'analyse soulève quatre questions de modélisation spécifiques aux routes rurales :

- Comment sont générés les véhicules ?
- Comment est modélisée la dynamique dans les virages ?
- Comment est modélisée la dynamique dans les pentes ?
- Quel est le processus de dépassement ?
  - Désir de dépasser
  - Décision de dépasser
  - Réalisation du dépassement

Le deuxième point concerne principalement la perte de performance des moteurs des véhicules peu performants (du type camion ou véhicule récréatif), qui fournissent alors une accélération inférieure à celle que le conducteur accepte dans l'optique d'une conduite confortable. De même le troisième point correspond à la détermination de l'accélération disponible, restreinte par les sensations de confort de conduite du conducteur et/ou la limite de renversement du véhicule.

3.2. Présentation du modèle développé

Dans le cadre du projet, du fait de contraintes temporelles et organisationnelles, une campagne de mesures ne sera effectuée qu'après la mise en place d'un modèle et la programmation d'un logiciel correspondant. La compréhension des processus provient donc d'une comparaison détaillée des modèles de la littérature, qui ont été développés pour les logiciels susnommés, qui sont les résultats d'une étude de terrain spécifique ou qui correspondent à une description de la physique en jeu. Cette méthodologie impose cependant la contrainte de réaliser une programmation permettant ultérieurement une modification des modèles comportementaux, une fois que les données relevées auront permis une meilleure compréhension. L'étape de validation ne devra également pas être négligée : elle doit conduire à un détail exhaustif des paramètres à calibrer et également vérifier la « rationalité du modèle » (i.e. constater si les données de sortie obtenues peuvent être expliquées « physiquement » ou par comparaison avec la littérature).

En outre, les efforts de développements de modèle se sont concentrés uniquement sur la description de la manœuvre de dépassement. Celle-ci est en effet d'une part la manœuvre critique que nous désirons observer et quantifier ; d'autre part, le modèle doit permettre de caractériser les motifs du dépassement. De fait, les chapitres Chapitre 4 et Chapitre 5 seront consacrés au dépassement.

3.2.1. Notations

• Le pas de discrétisation temporel est pris égal au temps de réaction des conducteurs τ, supposé constant et égal à 2/3 s.

• On considère une section de route à deux sens 1 et 2 sur laquelle une file de N véhicules est considérée. Les caractéristiques du $n^{ième}$ véhicule à l'instant t sont :

$x_n(t)$: position sur la section de route – le déplacement se fait de 0 à x_{max} dans le sens 1 et de x_{max} à 0 dans le sens 2.

$v_n(t)$: vitesse instantanée

• Dans le reste du document, les expressions suivantes correspondent aux définitions ci-dessous :

Véhicule considéré : véhicule dont on désire déterminer les caractéristiques à $t + \tau$.

Véhicule précédent : véhicule situé directement en aval du véhicule considéré, dans le même sens de circulation et sur sa voie de circulation.

Véhicule suivant : véhicule situé directement en amont du véhicule considéré, dans le même sens de circulation.

Véhicule opposé : véhicule situé directement en aval du véhicule considéré, dans le sens de circulation opposé et sur sa voie de circulation.

3.2.2. Génération des véhicules

Cette procédure permet de créer des objets « véhicules » qui vont se déplacer sur le réseau. Elle influence d'une part l'offre de dépassement, puisque les écarts intervéhiculaires générés deviendront des créneaux de dépassement pour la circulation en sens inverse, et d'autre part la demande de dépassement puisque l'ordre de circulation (position des poids lourds par rapport aux véhicules particuliers) ainsi que le type de conduite au moment de la génération (libre ou en peloton) vont influencer le désir de dépasser.

Afin de reproduire un trafic fidèle à la réalité, plusieurs techniques complémentaires sont utilisées :

1. Une analyse statistique permet de détailler les caractéristiques du trafic aux points de génération (cf. Chapitre 4 Créneaux de dépassement offerts) ;

2. Une portion de route tampon est ajoutée à chaque extrémité de la zone simulée. Les véhicules sont générés sur cette section virtuelle. Aucune mesure n'y est effectuée, le but consiste en l'autorégulation du trafic. À l'extrémité de cette zone, des pelotons réalistes doivent s'être formés. Sa longueur doit être ajustée de telle sorte qu'au point d'entrée des véhicules la composition du trafic (nombre de pelotons de chaque taille, composition des pelotons) soit réaliste. De cette manière, l'effort de génération des véhicules est moins crucial. Il n'est ainsi pas nécessaire de générer des pelotons. SSIUEL propose 300 mètres, tandis que SIMLA ++ considère qu'une telle zone tampon devrait nécessairement être très longue ; Archilla et Morrall (1995) indiquent qu'une zone de 5-6 km est nécessaire pour obtenir des conditions d'équilibre – ils ne précisent cependant pas si la zone tampon permet ou non le dépassement. Ce point sera réétudié au Chapitre 6 Implémentation d'un outil d'évaluation des dépassements.

3. Un temps tampon est ajouté à la durée de la simulation ; la route a ainsi un état initial. Les mesures peuvent théoriquement débuter lorsque le premier véhicule est sorti de la section de route (tampon compris), la route n'étant alors plus vide. Cependant, SSIUEL considère que la répartition des véhicules ne serait pas encore réaliste, car les premiers véhicules peuvent bénéficier de la route vide. Par conséquent, les estimations des paramètres débutent après la sortie des 5 premiers véhicules dans SSIUEL. Les performances modernes de calcul nous permettent d'attendre la sortie de véhicules jusqu'à l'obtention d'un trafic réaliste à la sortie (en termes de débit). Ce point sera également réétudié au Chapitre 6 Implémentation d'un outil d'évaluation des dépassements.

3.2.3. Types de véhicules considérés

Les différents modèles cités plus haut permettent la représentation de 2 (SIMLA ++, SSIUEL) à 18 (TRARR) types de véhicules. Cette distinction a sur les routes rurales une importance très particulière, car l'effet de la géométrie sur la dynamique des véhicules a différentes intensités.

La conduite peut généralement être considérée comme un compromis individuel entre trois facteurs : confort de conduite, acceptation d'un niveau de risque et adaptation au trafic (Espié, 2004), si on suppose que le conducteur est l'élément déterminant dans la dynamique. Or, les modèles ci-dessus ont considéré que les capacités des moteurs des véhicules étaient dans certaines conditions la contrainte principale. Ils ont par conséquent développés pour certaines manoeuvres (conduite en pente notamment) des modèles mathématiques distincts pour chaque type de véhicule.

L'étude va se limiter à deux catégories (poids lourd et véhicules particuliers), car l'absence de données détaillées nous empêche :

- de déterminer la composition du trafic de manière plus détaillée ;
- de développer notre propre compréhension de certaines manœuvres (pentes, courbes) ;
- d'examiner la pertinence de sélectionner un plus grand nombre de catégories.

Les types de véhicules vont être caractérisés par des distributions particulières pour certaines valeurs telles que la longueur, l'accélération maximale ou le rapport poids puissance.

3.2.4. Diagramme décisionnel

Le Tableau 3-1 : diagramme de prise de décision lors du déplacement sur une route rurale explique le processus décisionnel permettant de déterminer pour un véhicule considéré quel type de manœuvre il adopte. Celles-ci sont de 7 types :

Le véhicule considéré ne dépasse pas

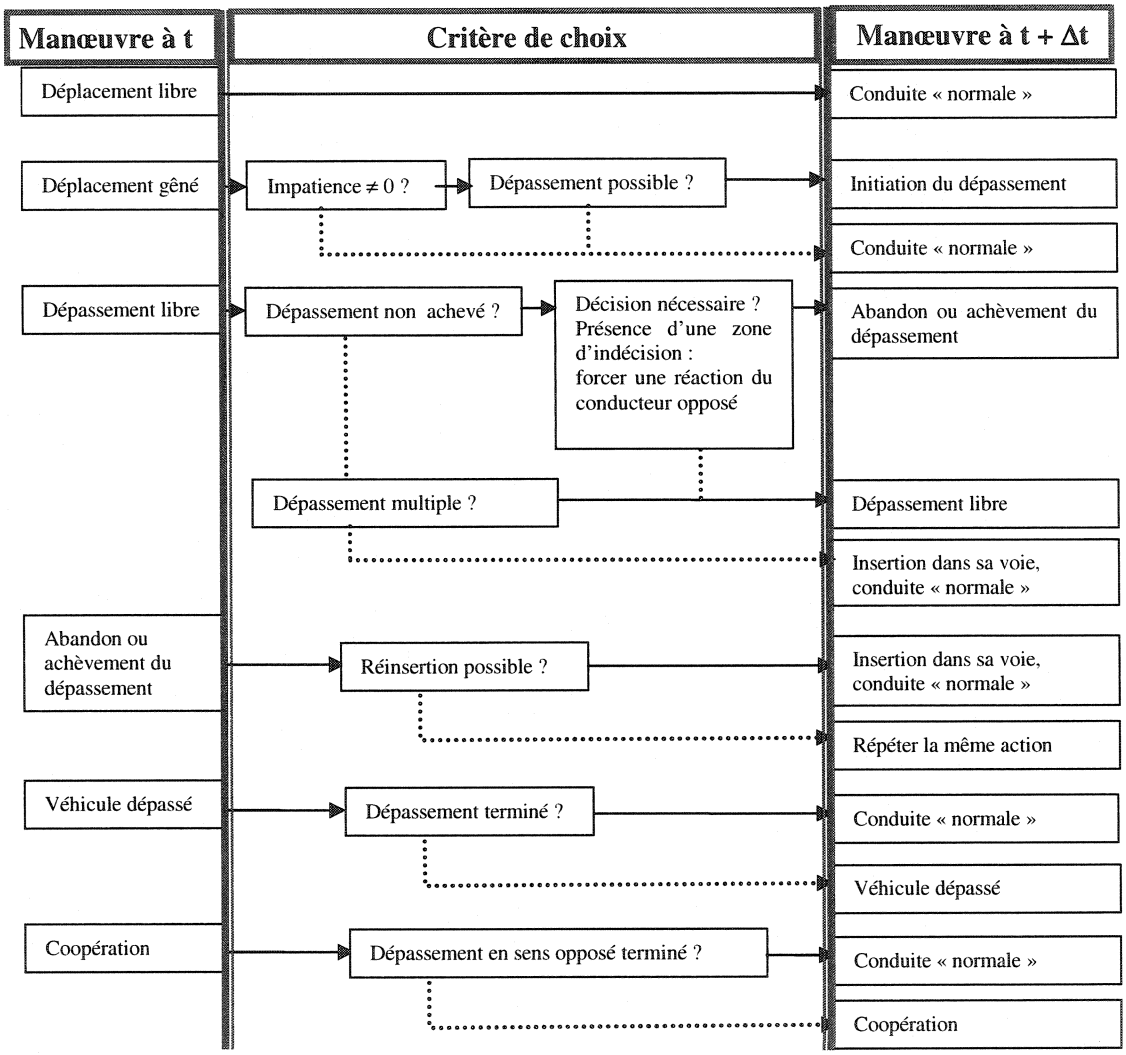
1. Déplacement libre : le véhicule considéré peut se déplacer sur sa voie sans être gêné par d'autres véhicules – ceux-ci sont invisibles ou trop éloignés ;
2. Déplacement gêné : l'espacement par rapport à un (ou plusieurs) véhicule(s) de l'environnement force le véhicule considéré à adapter sa vitesse à l'espace disponible et à la vitesse du véhicule contraignant ;
3. Véhicule dépassé : un dépassement est en cours sur le véhicule considéré ;
4. Coopération : un dépassement est effectué par un véhicule en sens opposé et s'avère dangereux ; le véhicule considéré doit freiner pour l'aider à compléter son dépassement ;

Le véhicule considéré effectue une manœuvre de dépassement

5. Dépassement libre : le créneau avec le véhicule opposé est suffisamment important pour que le véhicule considéré puisse finir son dépassement de manière confortable ;
6. Abandon du dépassement : le véhicule considéré effectue un dépassement qui ne pourra pas être complété, le véhicule considéré doit se rabattre sur sa voie de circulation (en freinant si nécessaire) ;
7. Achèvement du dépassement forcé : le véhicule considéré effectue un dépassement qui ne pourra être réalisé qu'en utilisant les capacités d'accélération maximales du véhicule ;

Le Tableau 3-1 indique dans la colonne manœuvre à t les différents types de manœuvres qui ont pu être effectuées au pas de temps précédent. La colonne critère de choix identifie la situation dans laquelle se trouve le véhicule considéré par rapport à son environnement. Les flèches pointillées correspondent au cas où la réponse à un critère est négative et continues à une réponse positive. Enfin la colonne manœuvre à t + Δt indique quelle manœuvre va être effectuée au pas de temps suivant.

Tableau 3-1 : diagramme de prise de décision lors du déplacement sur une route rurale



Les paragraphes suivants s'attachent à décrire les modèles mathématiques correspondant aux critères et manœuvres. À noter qu'il est considéré que la trajectoire de changement de voie n'est pas un aspect prioritaire de modélisation. En effet, notre démarche s'appuyant sur la caractérisation du nombre de dépassement, il semble plus important de concentrer la réflexion sur le processus de décision de dépasser.

3.2.5. Modélisation des manœuvres

3.2.5.1 Conduite normale

Deux questions caractérisent typiquement (selon SSIUEL) les raisonnements qu'effectue le conducteur pour déterminer sa vitesse lorsqu'il circule dans sa voie de circulation :

- Existe-t-il des dépassements en cours dans l'environnement de perception du conducteur ? L'influence de ces véhicules est présentée dans b) Influence des véhicules effectuant un dépassement.
- Le véhicule précédent exerce-t-il une influence sur la conduite ? La réaction est détaillée dans a) Modèle de voiture suiveuse.

Si aucune influence n'est détectée, le véhicule se déplace librement (cf. c) Modèle de voiture libre). Dans la simulation, chacun des trois cas est considéré, permettant la détermination d'une vitesse à $t+\tau$. La manoeuvre effectivement choisie correspond au minimum de ces trois valeurs.

(a) Modèle de voiture suiveuse

Revue de littérature

Il s'agit de décrire comment un véhicule se déplace sur sa voie de circulation, réalisant un compromis entre ses motivations de conduite et l'environnement. L'annexe Annexe A

Modélisation microscopique classique – rappels théoriques décrit les différentes classes de modèles qui ont été conçus pour le cas des autoroutes et des réseaux urbains. Dans le cas des réseaux ruraux, trois types de modèles sont présents :

1. SSIUEL et SIMLA ++ utilisent la structure du modèle psychologique / physique de Wiedemann (1974), divisant les réactions d'un conducteur en quatre domaines en fonction de la distance et de la vitesse relative (mouvement libre, phase d'approche,

voiture suiveuse et freinage). Les développements proposés consistent uniquement à calibrer pour le cas d'une route rurale les accélérations choisies par les conducteurs dans chaque domaine.

2. TWOPAS propose une approche du type stimulus réponse, dans laquelle la vitesse du conducteur considéré au temps t + Δt est calculée comme une fonction rationnelle de la distance désirée et de la vitesse du véhicule précédent.

3. HUTSIM détaille le déplacement selon un modèle de type automates cellulaires. Les vitesses sont uniquement discrètes (avec un pas de 1 km/h) et peuvent uniquement changer d'une unité à chaque pas de temps.

Par conséquent, les principes de conduite sont identiques aux autres réseaux et il est donc acceptable de choisir un modèle « classique » développé spécifiquement pour ceux-ci. Or Brackstone et McDonald (1999) constatent qu'aucun consensus scientifique ne s'est établi sur ces modèles. En fait, ceux-ci ont généralement été établis en considérant que le conducteur cherche à optimiser son déplacement. Ceci conduit à l'établissement de modèles possédant des paramètres déconnectés de caractéristiques physiques et nécessitant une quantité de données de calibration très importante. Boer (1999) indique que les conducteurs se contentent en fait d'obtenir des conditions de circulation satisfaisantes et propose un modèle comportemental, basé sur une compréhension des processus de perception de l'environnement par le système sensoriel du conducteur.

Modèle proposé

Étant donné qu'aucun modèle basé sur une étude psychologique n'a encore fait l'attention d'une vérification d'un point de vue « ingénieur » détaillée (selon Brackstone et McDonald, 1999), notre choix se porte sur un modèle basé sur des principes physiques clairs et dont les paramètres correspondent à des données physiques accessibles et compréhensibles. Gipps (1981) a conçu des équations décrivant le mouvement des véhicules sur cette base ; ce modèle est utilisé par le

logiciel AIMSUN, dont les données de sortie de débit ont été validées sur plusieurs réseaux (TSS, 2001). À chaque pas de temps (correspondant au temps de réaction τ, supposé constant sur la population et égal à 2/3 s), la vitesse $v(t + \tau)$ de chaque véhicule est calculée par l'équation :

$$v_n(t+\tau) = b_n\tau + \sqrt{(b_n\tau)^2 - b_n \cdot \left[2 \cdot \left(x_{n-1}(t) - S_{n-1} - x_n(t) \right) - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}_n} \right]}$$

avec (*les valeurs proposées sont les paramètres choisis par Gipps, 1981)* :

a_n : accélération maximum qu'un conducteur peut accepter (*distribution normale de moyenne 1.7m/s² et d'écart type 0.3 m/s²*);

b_n : décélération maximum qu'un conducteur peut accepter (*égale à -2a_n*, étant donné que ces deux paramètres dépendent fortement de l'agressivité du conducteur);

S_n : taille effective du véhicule n + taille de l'espace au sein duquel le véhicule suivant ne désire pas entrer (*distribution normale de moyenne 6.5 m et d'écart type 0.3 m* ; ce paramètre, ainsi que l'accélération maximum, donne la possibilité de prendre en compte très facilement différentes classes de véhicules);

τ : temps de réaction (*valeur constante de 2/3 s*);

$\hat{b}_n$: décélération maximale supposée du véhicule précédent (*minimum de -3 m/s² et de* $\frac{b_n - 3}{2}$; ce terme traduit la difficulté à estimer la décélération du véhicule précédent).

Cette équation est obtenue en établissant une équation de condition de non collision lors de l'arrêt brusque du premier conducteur. Le lecteur peut se référer à Jacquot (2003) pour une description des propriétés du modèle.

(b) Influence des véhicules effectuant un dépassement

Revue de la littérature

L'hypothèse qu'un conducteur se base uniquement sur le comportement du conducteur situé immédiatement devant lui est irréaliste.

D'une part, l'expérience de conduite et la phase d'apprentissage inculquent au conducteur une capacité à anticiper. El Hadouaj, Drogoul et Espié (2000) et Stang (1993) estiment que l'anticipation provient de l'attention portée à certains éléments de la scène. Prenons pour exemple l'arrêt d'une file de véhicules à un feu de circulation. Le déplacement du premier véhicule est contraint par le passage du feu au rouge. Dans la théorie de voiture suiveuse « classique », le deuxième véhicule s'arrête afin de ne pas entrer en collision avec le véhicule précédent. Dans la réalité, il observe tout autant le feu rouge (contrainte d'arrêt) que le véhicule précédent (contrainte de collision) et se comporte en fonction de la contrainte la plus pénalisante. Ce type de problèmes se retrouve en milieu rural lorsqu'un véhicule situé en aval dans la file de véhicules freine. Ce type d'anticipation peut être intégré au modèle de Gipps en calculant les vitesses $v(t + \tau)$ possibles en fonction de chaque véhicule situé en aval et en choisissant la vitesse minimale parmi celles-ci. Cependant, une telle application du modèle de Gipps n'ayant pas été testée, il est ici recommandé que l'anticipation soit incorporée ultérieurement.

D'autre part, le conducteur ajuste son comportement aux véhicules effectuant un dépassement dans son champ de vision. Cette situation est présente à divers degrés dans TWOPAS, SIMLA ++ et TRARR ; seul SSIUEL la décrit cependant en détails. Trois situations sont considérées, correspondant à la réponse à la présence (elles sont présentées Figure 3-1) :

1. d'un véhicule dans le même sens de circulation, situé en aval et effectuant un dépassement ;
2. d'un véhicule dans le sens opposé, situé en aval et effectuant un dépassement ;
3. d'un véhicule dans les même sens de circulation, situé en amont et effectuant un dépassement.

Dans SSIUEL, une description détaillée de tous les cas pouvant se présenter est effectuée (cf. Annexe C).

Modèle proposé

Considérons les situations de circulation présentées sur la Figure 3-1.

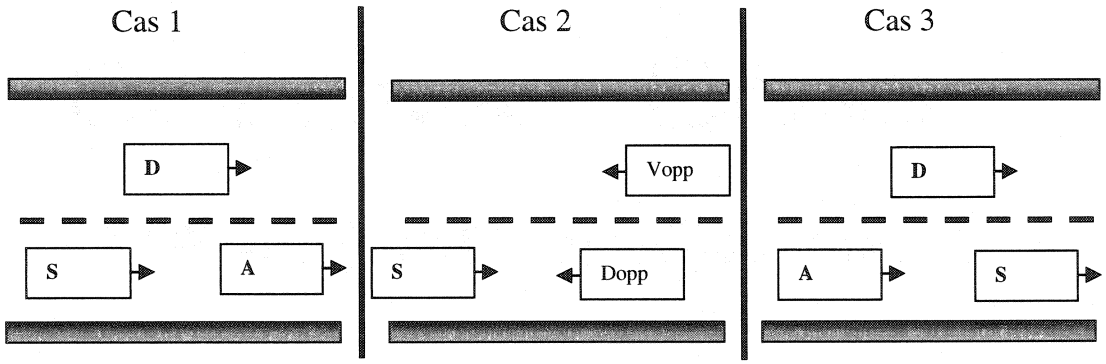


Figure 3-1 : situation de conduite normale, examen de l'effet des véhicules effectuant un dépassement

On désire déterminer la vitesse du véhicule considéré S au temps $t+\tau$. En se basant sur les acquis de la méthode développée dans SSIUEL, les considérations suivantes nous permettent de représenter les différentes situations identifiées ci-dessus :

1. Si S est dépassé, son accélération est nulle – manœuvre « véhicule dépassé ». Sinon, si le dépassement sur S est terminé et que le véhicule dépassant D désire se réinsérer ou si D dépasse un autre véhicule A en aval du véhicule S, appliquer le modèle de Gipps aux véhicules A et D et choisir la vitesse minimum. Ainsi, le conducteur considéré anticipe le retour éventuel d'urgence du véhicule D – indiqué à l'aide du clignotant.

2. Un véhicule D_{opp} en sens opposé effectue un dépassement. Il s'agit de la manœuvre « coopération ». Une approche « sécuritaire » permet de déterminer la vitesse maximale du véhicule considéré. Elle est décrite au Chapitre 5 Manœuvre de dépassement.

3. Si la manœuvre de dépassement du véhicule D s'effectue sur le véhicule considéré S, aucune accélération n'est possible ; il s'agit de la manœuvre « véhicule dépassé » telle que décrite dans le diagramme décisionnel. Sinon D dépasse un véhicule A également en amont et aucune réaction du véhicule considéré n'est prise en compte.

(c) Modèle de voiture libre

Tous les modèles de route rurale considèrent que chaque conducteur dispose d'une vitesse désirée V_d propre, qu'il souhaite atteindre et idéalement conserver. Les divergences portent sur les capacités d'accélération, lorsque le véhicule se retrouve à une vitesse inférieure à V_d et de décélération lorsqu'il se retrouve à une vitesse supérieure.

Revue de la littérature

Dans la théorie « physique », un moteur fournit des accélérations décroissantes par rapport à la vitesse du véhicule. Représenter la relation entre ces deux variables permet de comprendre le déplacement libre du conducteur, lorsqu'il cherche à atteindre sa vitesse désirée, que ce soit en situation de dépassement ou de conduite sur sa voie de circulation. Un conducteur conduisant à une vitesse V (km/h) – respectivement v (m/s) – peut donc utiliser une accélération maximale a_n (m/s^2) :

- Selon TWOPAS :

$$a_n = a_0 \cdot \left(1 - \frac{V}{V_m}\right)$$

avec

a_0 : accélération maximale d'un véhicule à vitesse nulle (m/s^2)

V_m : vitesse maximale d'un véhicule (km/h)

- Selon SIMLA ++ :

$a_n = (0,2 + 0,8 \cdot x) \cdot \left(7 - \sqrt{v}\right)$ pour les véhicules particuliers

et $a_n = 1,9 - 0,07 \cdot v + 0,5 \cdot ZFWU + 1,5 \cdot x$ pour les poids lourds

x est une variable décrivant l'agressivité de chaque conducteur (lorsque x vaut 1, l'accélération maximale est utilisée)

ZFWU est une variable aléatoire de distribution normale centrée réduite, caractérisant la vitesse désirée du conducteur (plus ZFWU est important, plus la vitesse désirée est importante)

- Selon SSIUEL :

$a_n = 0,6 \cdot \left(7 - \sqrt{v}\right)$ pour les véhicules particuliers

$a_n = 1,236 \cdot e^{-0.0352v}$ pour les poids lourds

avec une pondération par un facteur représentant l'agressivité du conducteur.

Les trois modèles ne reproduisent pas le comportement du conducteur, mais une caractéristique physique maximale. Les conducteurs n'utilisent en fait pas constamment les capacités maximales du moteur pour des raisons d'économie, de pollution ou de confort. L'accélération choisie est souvent progressive – ce détail étant plus ou moins marqué selon l'agressivité du conducteur – croissant d'une valeur minimale vers une valeur maximale pour devenir nulle lorsque la vitesse désirée est atteinte. Akçelik et Besley (2001) proposent ainsi un modèle présentant ces caractéristiques. Leur procédure consiste en une analyse statistique permettant de construire un modèle d'accélération parabolique d'une vitesse initiale vers une vitesse finale lorsque des temps et distances d'accélération ont été mesurés sur le terrain.

Ainsi que proposé dans les modèles SSIUEL et SIMLA ++, il s'agit donc d'adopter une approche comportementale tenant compte d'une capacité d'accélération maximale. Nous optons pour la définition d'une accélération désirée par le conducteur, correspondant à un schéma de conduite, et d'une capacité maximale du moteur. L'accélération disponible sera le minimum de ces deux valeurs.

Gipps (1981) propose une approche empirique basée sur une compréhension comportementale. La courbe représentative du modèle développé est donnée sur la Figure 3-2.

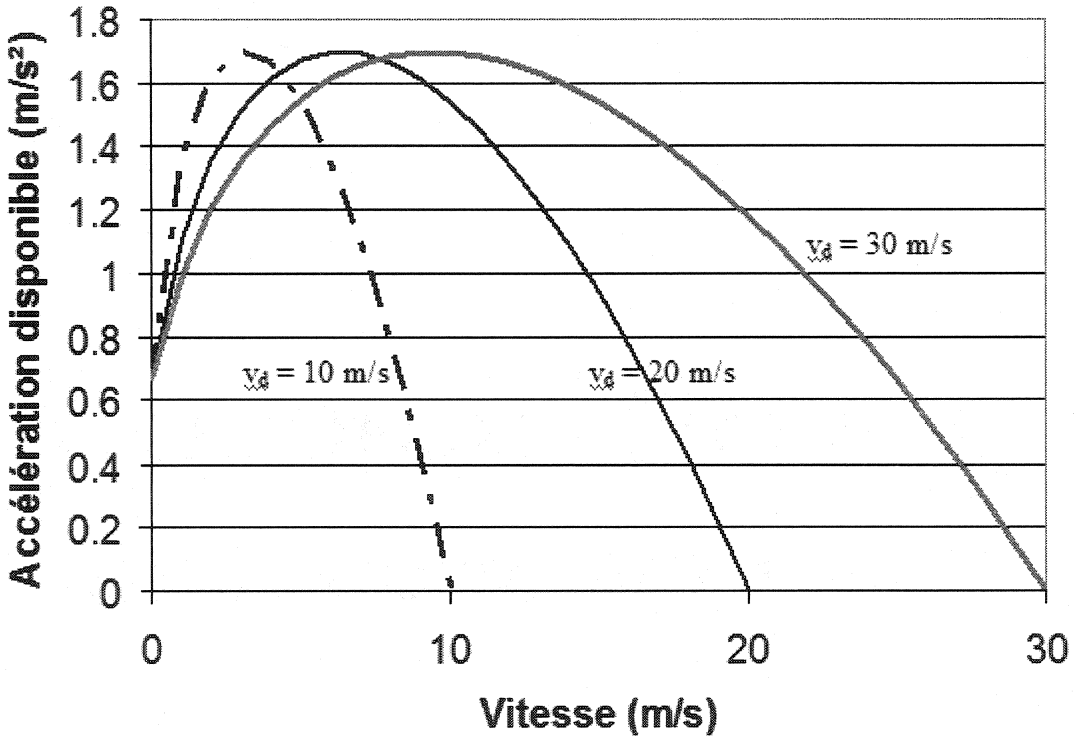


Figure 3-2 : accélération disponible en fonction de la vitesse désirée V_d, avec $a_n = 1.7m/s^2$

L'équation correspondante régissant la vitesse $v_n(t+\tau)$ (m/s) du véhicule n au temps $t+\tau$ s'exprime par :

$$v_n(t+\tau) = v_n(t) + 2.5 \cdot a_n \cdot \tau \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_d}\right) \sqrt{0.025 + \frac{v_n(t)}{V_d}}$$

avec

a_n: accélération maximum qu'un conducteur peut accepter (m/s^2)

V_d: vitesse à laquelle le conducteur n désire rouler (m/s)

τ : temps de réaction (valeur constante de 2/3 s);

Cette représentation nécessite comme paramètres la vitesse désirée v_d, qui peut varier selon le type de manœuvre et le contexte et l'accélération maximale a_n. Plusieurs hypothèses sont sous-jacentes à ce modèle :

- Lors d'un démarrage, tous les éléments véhicule-conducteur ayant la même valeur de a_n ont une accélération initiale identique a_0, indépendamment de la vitesse qu'ils désirent atteindre.
- L'accélération maximale a_n est une constante et est atteinte pour des vitesses v_{max} décroissantes avec la vitesse désirée.
- Si $v_n(t)>v_{max}$, il n'y a pas de phase d'accélération progressive.

Modèle proposé

La troisième remarque indique que le modèle ne se base sur le comportement des conducteurs que pour des vitesses initiales inférieures à V_{max}, ce qui nous conduit à reformuler l'équation de Gipps, de telle sorte qu'une phase d'accélération progressive soit présente quelle que soit la vitesse initiale :

$$\begin{cases} v_n(t+\tau) = v_n(t) + 2.5 \cdot a_n \cdot \tau \left(1 - \dfrac{u_n(t)}{U_d}\right) \sqrt{0.025 + \dfrac{u_n(t)}{U_d}} \\ u_n(t) = v_n(t) - v_0 \end{cases}$$

avec

v_0 : vitesse initiale de la manœuvre de conduite libre (m/s)

a_n: accélération maximum qu'un conducteur peut accepter (m/s^2)

$U_d = V_d - V_0$

V_d: vitesse à laquelle le conducteur n désire rouler (m/s)

τ : temps de réaction (valeur constante de 2/3 s);

Dans ce modèle, l'accélération initiale vaut toujours a_0 puis croît jusqu'à atteindre a_n, quelle que soit la vitesse désirée à atteindre.

Il semble également d'après les deux premières remarques que la formule est contredite par les travaux de SSIUEL et de SIMLA ++ selon lesquels des vitesses désirées élevées

sont le signe d'un conducteur agressif, donc accélérant plus rapidement. La Figure 3-3 indique les variations de la vitesse et de l'accélération en fonction du temps pour une vitesse initiale v_0 = 0 m/s, une accélération maximum de 1.7 m/s^2 et des vitesses finales désirées 10 m/s, 20 m/s et 30 m/s. L'accélération maximale est effectivement atteinte d'autant plus tôt que la vitesse désirée est faible. Cependant, les vitesses restent tout d'abord très proches et lorsque un véhicule i de vitesse désirée faible atteint V_{di}, les véhicules de vitesses désirées supérieures ont atteint des vitesses plus élevées ; l'accélération moyenne est donc plus élevée pour un véhicule de forte vitesse désirée.

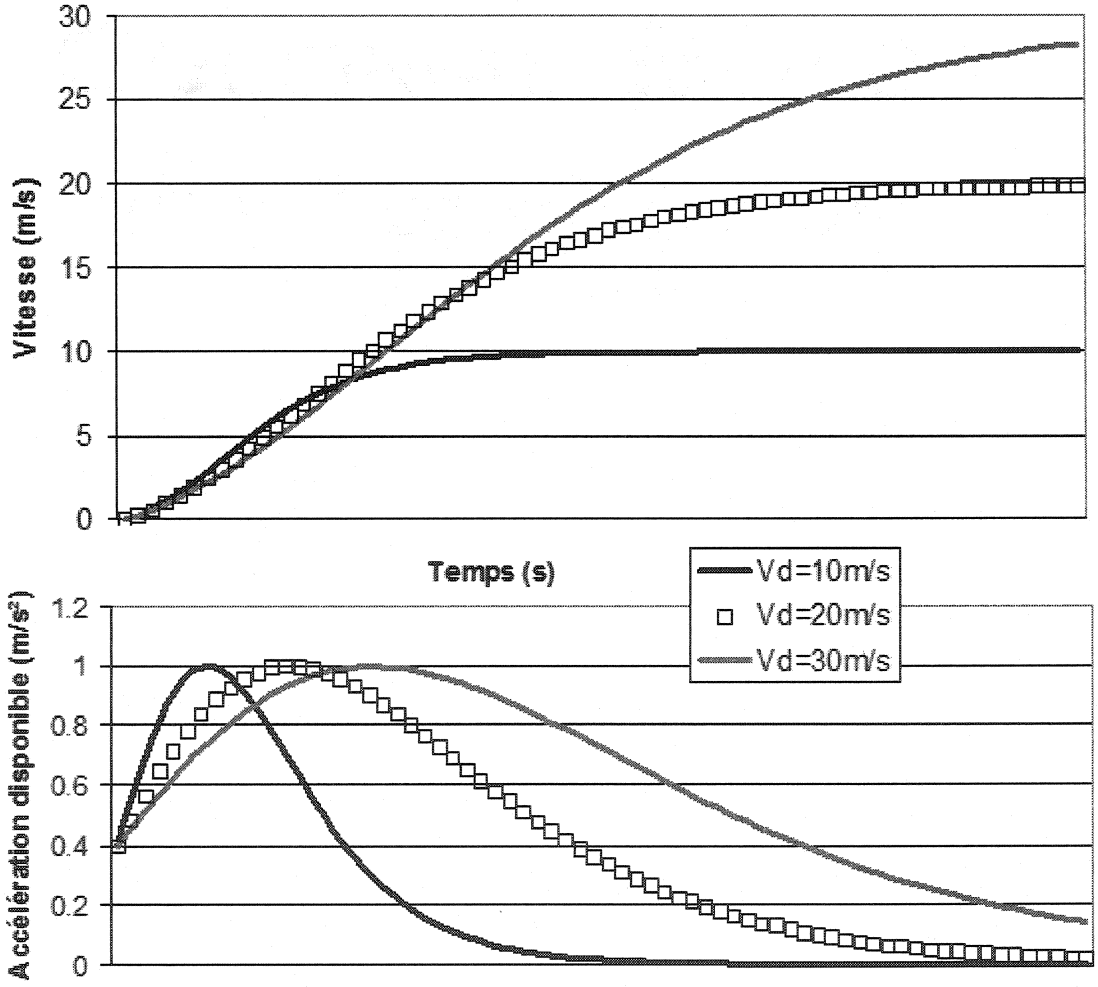


Figure 3-3 : accélération disponible et évolution de la vitesse en fonction du temps, selon le modèle de Gipps modifié

Dans ce modèle, pour une même vitesse désirée relative U_d, la forme de l'accélération est identique quelle que soit la vitesse initiale. Une étude ultérieure du modèle devrait considérer une accélération initiale variant avec la vitesse initiale.

(d) Capacités maximales d'accélération

La description précédente correspond au cas d'une section de route sans pentes et sans courbes. La demande de dépassement va cependant être fortement influencée par le ralentissement possible d'un camion dans les pentes ou d'un conducteur prudent dans les courbes. Une incidence similaire sur l'offre peut être détectée.

Revue de la littérature

Un modèle comportemental devrait considérer les anticipations des usagers. Par exemple, certains conducteurs agressifs peuvent avoir tendance à accélérer avant une pente, afin de prendre de l'élan et de pouvoir franchir la pente en fournissant une accélération confortable ; la distance de visibilité se réduisant lorsqu'une pente est gravie, certains conducteurs prudents pourraient avoir tendance à restreindre leur accélération. En outre, le comportement des usagers devrait être homogène en ligne droite, en pente et dans les courbes et non pas dépendre d'équations distinctes. Étant donné les limites établies du modèle, mais considérant l'importance de ces éléments sur le résultat de la simulation, des modèles existants pertinents vont être sélectionnés.

Dans la littérature consultée, une seule référence tente de prendre en compte les effets combinés de la pente et des courbes (Mavromatis et Psarianos, 2003). Les équations d'équilibre dynamiques relatives à chaque axe sont détaillées, en tenant compte d'un facteur d'utilisation de la puissance maximale. Une équation polynomiale du quatrième degré sur l'accélération du véhicule est ainsi obtenue ; il est donc possible de déterminer la vitesse maximale du véhicule en tout point d'un parcours par un schéma numérique. L'utilisation d'une solution si détaillée requiert la définition de nombreux paramètres individuels (position du centre de gravité, aire frontale du véhicule, position du centre de gravité de l'aire frontale,...), de coefficients de frottement et de forces de

résistance de l'air, alors même que le phénomène décisif du changement de rapport dans la boîte de vitesse n'est pas caractérisé. Cette approche n'est donc pas utilisable au sein d'une simulation microscopique.

L'analyse des modélisations effectuées pour décrire les deux situations met en lumière la complexité de l'analyse combinée des deux effets. La vitesse maximale va donc être définie comme le minimum entre la vitesse maximale permise dans la courbe et la vitesse maximale permise en pente.

(i) Comportements dans les pentes

Revue de la littérature

Les calculs sont généralement effectués séparément pour les véhicules lourds et les véhicules particuliers ; cette caractéristique provient vraisemblablement du fait que la capacité d'accélération des véhicules particuliers versus celle des poids lourds est restreinte pour des pentes plus abruptes.

En ce qui concerne les véhicules particuliers, TWOPAS et SIMLA ++ s'accordent pour restreindre l'accélération maximum d'une valeur $\sin(\alpha)\cdot g$ où α est l'angle en radian de la pente et g l'accélération de la gravité. HUTSIM utilise cette approche pour l'ensemble des véhicules. La vitesse désirée n'est modifiée que par SIMLA ++, qui propose un facteur multiplicatif 1 – V_L avec : $V_L = 10\cdot(\tan\alpha)^2\cdot e^{1-fb}$ où fb est une variable distribuée normalement autour de 0.5 et d'écart type 0.15 caractérisant les acceptations individuelles de niveaux d'accélération.

En ce qui concerne les poids lourds, TWOPAS propose une modélisation détaillée tenant compte de l'effet des changements de vitesse et des différentes forces entrant en compte (forces aérodynamiques, de gravité, de résistance au roulement et de traction), multipliant ainsi les variables d'entrée du modèle. Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde (2001) effectuent quant à eux uniquement un équilibre dynamique. Leur modèle (appelé aussi dans la suite modèle de Rakha) permet une détermination de

l'accélération et de la vitesse maximum sur l'ensemble du tracé, via un processus de discrétisation eulérien. La validation du modèle montre un accord acceptable avec une série de tests sur piste. Rakha et Lucic (2002) ajoutent l'hypothèse supplémentaire que l'efficacité de la transformation de la puissance du moteur en une force de traction croît avec la vitesse, mais reconnaîssent qu'un effort de calibration supplémentaire serait nécessaire. Enfin, SIMLA ++ développe un modèle basé sur des données expérimentales. La vitesse désirée en pente est calculée comme le minimum entre les capacités du véhicule et la vitesse désirée.

D'après cette analyse, le modèle de Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde (2001) nous fournissent un résultat suffisamment précis. Il peut être appliqué au cas des poids lourds et des véhicules particuliers. Les détails des calculs sont fournis ci-dessous.

Modèle proposé

À tout instant t, l'accélération a(t) (m/s^2) le long de la trajectoire de la route vaut :

$M \cdot a(t) = F(t) - R(t)$, où M (kg) est la masse du véhicule, F (N) correspond aux forces de traction et R (N) aux forces de résistance.

La force de traction est déterminée par l'ensemble d'équations :

$$\begin{cases} F = \min(F_t, F_{\max}) \\ F_{\max} = 9.8066 \cdot M_{ta} \cdot \mu \\ F_t = 3.6 \cdot \eta \cdot \dfrac{P}{v} \end{cases}$$

F_{max} : force de traction maximale (N)

M_{ta} : masse du véhicule se reportant sur l'axe de traction (kg)

μ : coefficient de friction entre la chaussée et les pneus

F_t : force de traction développée par les roues (N)

P : puissance fournie par le moteur (kW)

V : vitesse du véhicule (km/h)

η : efficacité de transmission de la puissance

Les forces de résistances sont de trois types :

1. Résistance aérodynamique $R_U = c_1 \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$

   Avec

   v : vitesse du véhicule (m/s)

   c_1 : densité de l'air à 15°C (kg/m^3)

   A : surface frontale du véhicule (m^2)

   C_d : coefficient de dragage aérodynamique

2. Résistance au roulement $R_r = 9.8066 \cdot C_r \cdot C_{ty} \cdot M$

   Avec

   C_r : coefficient de roulement dépendant de la chaussée (type, état)

   C_{ty} : coefficient de roulement entre le pneu et la chaussée croissant avec la vitesse du véhicule ;

3. Résistance de la gravité $R_g = 9.8066 \cdot M \cdot i$

   où i est le pourcentage de la pente.

$R = R_U + R_r + R_g$

Le temps est discrétisé selon un pas de temps constant Δt (s) ; on suppose une vitesse initiale du véhicule v_0. La solution approximée du problème est alors :

$$\begin{cases} a(t_i) = \dfrac{F(t_i) - R(t_i)}{M} \\ v(t_i) = v(t_{i-1}) + a(t_{i-1}) \cdot \Delta t \end{cases}$$

Les données nécessaires à l'application du modèle sont :

1. Des données de véhicule : rapport poids/aire frontale, poids/puissance, répartition du poids sur l'axe de traction, efficacité de la transmission de la puissance aux roues, coefficient de dragage aérodynamique et coefficients de roulement des pneus;

2. Des données sur la route : coefficient de friction et coefficient de roulement.

Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde (2001) fournissent quelques propositions de paramètres, permettant de dégager diverses constantes et de cibler que les spécificités d'un véhicule proviennent principalement du rapport poids puissance et du rapport poids aire frontale. La calibration des modèles est traitée plus spécifiquement au Chapitre 6 Implémentation d'un outil d'évaluation des dépassements.

Les Figure 3-4 et Figure 3-5 présentent une comparaison entre le modèle de Rakha et la norme américaine (TRB 1998), respectivement pour une situation d'accélération et de décélération dans des pentes constantes variant entre 0 et 8 %. Les courbes correspondant au modèle de Rakha ont été obtenues en considérant un camion d'un rapport poids puissance de 120 kg/kW, de masse 30.10^3 kg dont 20 % sur l'axe avant, d'aire frontale 10.66 m^2, d'efficacité de transmission de la puissance de 0.89, de coefficient de dragage aérodynamique 0.7, dont les pneus ont un coefficient de friction avec le sol de 0.5 et avec une route dont le coefficient de roulement est 2.0.

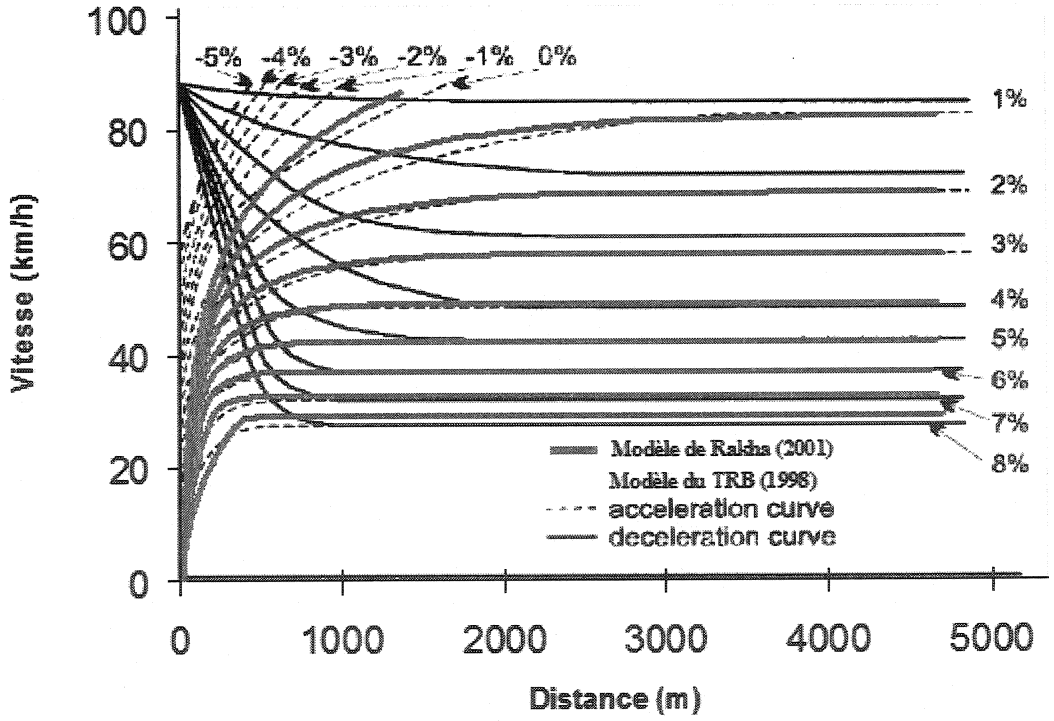


Figure 3-4 : courbe d'accélération en pente - comparaison modèle de Rakha / TRB 1998, figure de référence extraite de Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde (2001)

En situation d'accélération, les courbes obtenues dans le modèle de Rakha s'ajustent de manière satisfaisante aux courbes du TRB 1998. Notamment, les vitesses d'équilibre atteintes pour chaque pente sont identiques selon les deux méthodes – hormis pour une pente de 8%. Les divergences principales concernent les situations de décélération. En fait, selon le modèle de Rakha, les vitesses d'équilibre pour une certaine pente i sont identiques à celles atteintes pour la même pente i en phase d'accélération, ce qui n'est pas le cas sur les courbes du TRB (1998). En ce sens, le modèle de Rakha semble plus réaliste. Par ailleurs, l'investigation des différences de comportement au départ de la pente a permis de conclure qu'elles n'étaient pas liées aux suppositions du modèle mais aux valeurs de paramètres employés. Une calibration exacte n'a cependant pas été recherchée.

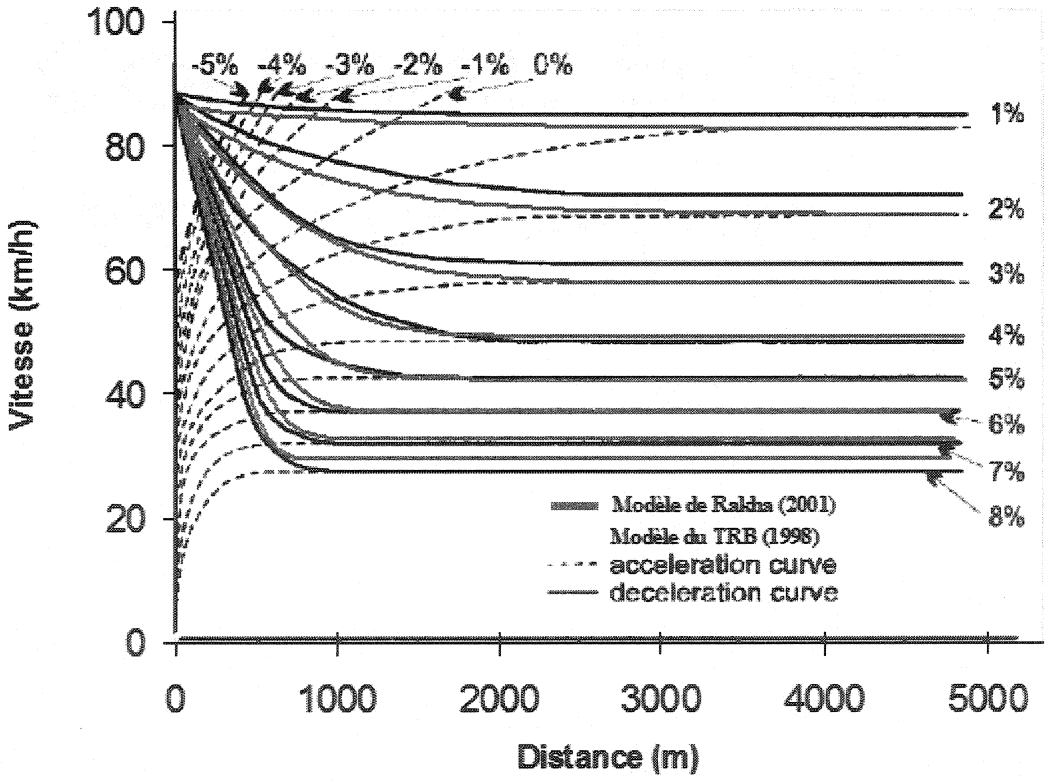


Figure 3-5 : courbes de décélération en pente - comparaison modèle de Rakha / TRB 1998, figure de référence extraite de Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde (2001)

Ce modèle simplifié nous permet donc d'obtenir de premiers résultats satisfaisants nécessitant peu de paramètres. Grâce au modèle de Rakha, la vitesse maximum v_{max} sur le plat peut également être déterminée. Naturellement, un conducteur ne désire pas circuler à des vitesses plus élevées que cette valeur v_{max}. Il existe donc une relation entre la vitesse désirée et la vitesse maximum sur le plat : cette dépendance sera simplement modélisée par une test vérifiant, lorsque les caractéristiques d'un véhicule sont produites (cf. Chapitre 4 Créneaux de dépassement offerts), si la vitesse désirée est inférieure à la vitesse maximum. Il est à noter que l'adoption de ce modèle nous impose la génération de variables d'entrée supplémentaires (puissance du véhicule, aire frontale ainsi que divers coefficients de friction).

(ii) Comportements dans les courbes

TWOPAS et SIMLA ++ caractérisent le comportement dans les courbes. La vitesse désirée en courbe est déterminée dans TWOPAS par une condition de non renversement, et dans SIMLA ++ par des distributions empiriques de vitesses. Cependant, TWOPAS repose également sur des données empiriques permettant la détermination du coefficient de frottement dans l'air et du coefficient de frottement latéral par régression. En outre, le calcul des zones d'influence des courbes est relativement complexe et basé d'un côté (TWOPAS) sur une supposition de décélération linéaire avec une valeur moyenne et de l'autre (SIMLA ++) sur le moment où le changement de l'angle d'orientation du véhicule dépasse un seuil de perception. Enfin, les deux modèles permettent de tenir compte de l'agressivité des véhicules. TWOPAS permet donc un calcul plus général (SIMLA ++ ne fonctionne qu'avec une distribution de vitesses particulière), mais détaille moins le comportement dynamique dans la courbe.

Étant donné que les courbes sur la section d'étude (route 101) ne sont pas très prononcées (SIMLA ++ note une influence des courbes uniquement en deçà de 500 mètres de rayon ; or, aucun rayon n'est inférieur à ce seuil), celles-ci ne sont pas prises en compte dans la dynamique. S'il s'avère qu'un modèle soit nécessaire, il est conseillé

de se baser sur la démarche de SIMLA ++ (cf. Brannolte et Holz, 1983) et de conduire une analyse détaillée des vitesses sur un itinéraire. En effet, la vitesse choisie correspond certainement plus à une notion de confort qu'à une limite de renversement.

(e) Accélération effectivement utilisée

En manœuvre de voiture libre, lorsque la vitesse initiale est v_0, l'accélération disponible à $t+\tau$ en fonction de la vitesse est finalement schématisée sur la Figure 3-6, pour un véhicule de rapport poids puissance 60 kg / kW. La courbe en pointillés représente les capacités maximales du moteur ; la courbe représentée selon des points discrets correspond au modèle comportemental de Gipps modifié ; l'accélération est obtenue comme le minimum entre les deux valeurs.

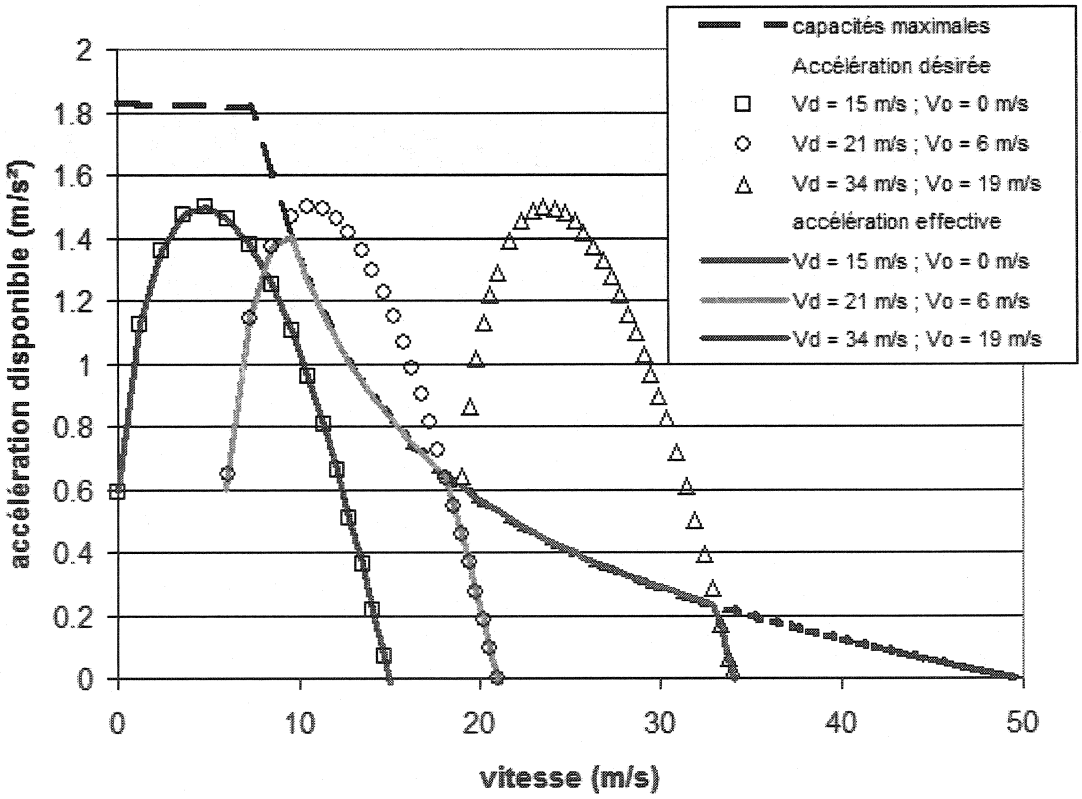


Figure 3-6 : accélération effective en fonction de la vitesse, pente de 0 %

(f) Réduction de la vitesse désirée

Dans certains cas, des zones de limite de vitesse réduite imposent une modification de la vitesse désirée du conducteur, ainsi qu'un modèle dynamique permettant de décélérer non abruptement – et non de réagir à des conditions de freinage brusques. Ce cas ne se présente pas dans la section de route que nous étudions. Le lecteur peut se référer à TWOPAS pour un détail de ce type de comportement. Il est également conseillé de réétudier les équations de Gipps.

Cependant, lors du dépassement, le conducteur est éventuellement amené à utiliser une vitesse supérieure à la vitesse désirée. S'il repasse ensuite en mode de conduite « libre », il doit alors réduire la vitesse de son véhicule. La décélération associée vers la vitesse désirée est également fonction de la vitesse, car le freinage n'est pas effectué brutalement. En réalité, on peut considérer que le conducteur n'appuie pas sur la pédale de frein. Par conséquent, il se laisse freiner par les forces de résistance aérodynamique et de roulement.

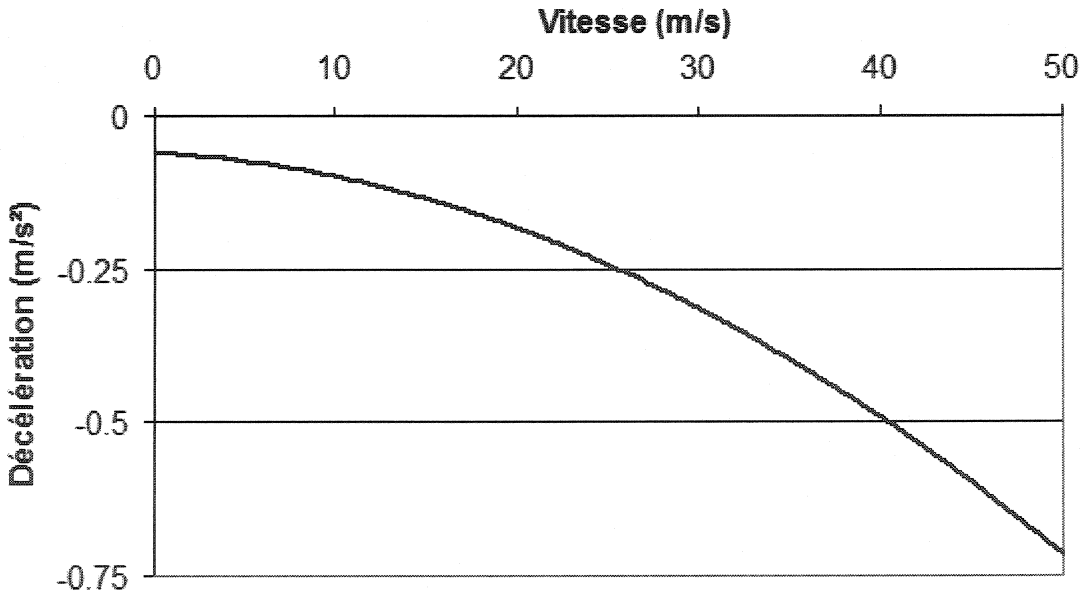


Figure 3-7 : décélération à traction nulle

À tout instant t, l'accélération a(t) (m/s^2) le long de la trajectoire de la route vaut donc, selon l'équation de Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde (2001) :

$M \cdot a(t) = -R(t)$, où M (kg) est la masse du véhicule et R (N) correspond aux forces de résistance.

Les forces de résistance aérodynamique et de résistance au roulement restent identiques (cf. Comportements dans les pentes), tandis que la résistance de la gravité est traitée différemment. Celle-ci vaut : $R_g = 9.8066 \cdot M \cdot i$ (N) où i est le pourcentage de la pente. Si la pente est négative, R_g est une composante positive, le conducteur doit donc utiliser la pédale de frein. Un modèle psychologique doit alors être intégré. Nous considérerons que le freinage est utilisé pour annuler cette composante – force de freinage de $-R_g$. Dans le cas où la pente est positive, la résistance de la gravité est prise en compte, elle permet d'atteindre plus rapidement la vitesse désirée.

La résolution de l'équation différentielle est effectuée comme dans le cas des pentes. Le schéma de la décélération en fonction de la vitesse est présenté sur la Figure 3-7. La décélération décroît avec la vitesse et permet donc au conducteur d'adopter sa nouvelle vitesse sans changement brusque.

(g) Oscillation de la vitesse désirée

Finalement, SSIUEL et Sima ++ incorporent un mécanisme d'oscillation de la vitesse du conducteur autour de sa vitesse désirée, sur une bande de largeur respectivement 3 % et 1 %, correspondant à l'imprécision du conducteur à déterminer sa vitesse – imprécisions de perception de la vitesse pratiquée et d'appui sur la pédale d'accélération. Le choix de la largeur de la bande semble arbitraire et la variation est suffisamment faible pour avoir peu de conséquences ; de fait, l'incorporation de ce phénomène est abandonnée.

(h) Synthèse

Si l'environnement est pris en compte, la vitesse est calculée en tout temps comme le minimum des valeurs correspondant aux :

1. désirs du conducteur (vitesse libre, modèle de voiture suiveuse, influence des véhicules dépassants) ;
2. capacités du moteur en pente ;
3. choix d'un confort de conduite en courbe.

3.2.5.2 Description de la manœuvre de dépassement

Les trois manœuvres : dépassement libre, achèvement du dépassement et abandon du dépassement sont décrites au Chapitre 5 Manœuvre de dépassement.

3.2.6. Modélisation des critères pour la prise de décision

Les critères, formant la base de décision des conducteurs, correspondent à des informations portant sur le dépassement. Les cas complexes (réinsertion après un dépassement ou un abandon de dépassement, décision de dépasser) sont traités au Chapitre 5 Manœuvre de dépassement. Les autres cas consistent en une vérification de la présence ou non d'un véhicule dépassant sur la voie opposée. Dans le cas de la vérification de l'initiation d'un dépassement par le véhicule précédent, étant donné qu'une anticipation est possible grâce aux feux clignotants, on considère que cette information est disponible sans temps de réaction.

Chapitre 4. Créneaux de dépassement offerts

L'offre de dépassement est conditionnée par l'interdiction ou non de dépasser. Le marquage de ces zones impose que la distance de visibilité de dépassement soit suffisante pour compléter une manœuvre avant la fin de la zone.

On se place dans le cas d'une zone de permission de dépasser. Lorsqu'un véhicule rattrape un autre véhicule plus lent, deux choix se présentent :

1. adapter la vitesse et demeurer derrière le véhicule ;
2. entamer une manœuvre de dépassement.

Le choix est effectué en fonction de la perception de l'environnement, i.e. le conducteur détecte le créneau disponible pour effectuer le dépassement (distance par rapport au prochain véhicule opposé ou distance de visibilité) et estime s'il est suffisant pour effectuer une manœuvre de dépassement. De même lorsqu'un dépassement est entamé, le conducteur vérifie continuellement s'il peut achever son dépassement ou s'il est dans l'obligation de l'abandonner. Le conducteur procède tout d'abord à une collecte d'information concernant le trafic environnant : vitesse des véhicules précédents ou créneaux intervéhiculaires dans la file de véhicule par exemple.

Dans les deux cas, le facteur primordial caractérisant l'offre de dépassement dans la prise de décision concerne le créneau disponible pour le dépassement, i.e. la distance ou le temps séparant le véhicule considérant le dépassement et le véhicule arrivant en sens opposé.

D'une part, ce dernier peut être caché par la géométrie du tracé routier. Un calcul géométrique doit donc permettre de déterminer sur quelle distance le véhicule désirant dépasser peut observer des véhicules roulant en sens opposé.

D'autre part, il s'agit de produire une simulation réaliste, i.e. les créneaux de dépassement offerts doivent correspondre à des situations réelles. Une procédure de génération des véhicules doit donc être établie.

4.1. Calcul de la distance de visibilité de dépassement disponible

4.1.1. Méthodes existantes

Le calcul de la visibilité est rendu complexe par deux facteurs :

1. la combinaison des formes géométriques peut être complexe et rendre délicates les résolutions analytiques;
2. les données sur la géométrie de la route ne sont pas nécessairement complètes.

SIMLA ++ considère uniquement les limitations sur le tracé en plan et distingue des courbes positives ne restreignant pas la visibilité et des courbes négatives sur lesquelles la vue est restreinte à une valeur minimum. La visibilité varie linéairement entre les courbes négatives. Les clothoïdes sont supposées ne pas influencer la visibilité. Cette méthode est d'une part très simplifiée et d'autre part ne prend pas en compte le profil en long (qui masque la route à travers la combinaison des courbes verticales). En outre, la distinction entre courbes positives et courbes négatives reste floue.

Dans TWOPAS, les distances de visibilité sont a contrario déterminées analytiquement, en traçant des lignes de vision tangentes au tracé routier ; le calcul exige cependant de nombreuses données sur la géométrie des sections de route. TWOPAS intègre séparément l'effet du tracé en plan et du profil en long et détermine la visibilité effective comme le minimum des deux valeurs.

Hassan, Easa et Abd El Halim (1998) remarquent que les effets des courbes horizontales et verticales se combinent en réalité en trois dimensions (3D). Il introduit le concept de ligne d'obstacle continue sur le tracé en plan (correspondant par exemple à un mur de neige), prend en compte les pertes de visibilité, les obstacles surplombant la route (ponts) et calcule la visibilité de nuit obtenue par les phares. Il propose deux modèles discrétisant la route sur les deux plans 2D (MARKS) ou en 3D (MARKC) – aussi désignés dans la suite par modèle de Hassan. La visibilité est calculée selon une procédure itérative en lançant une ligne de vision à une certaine distance, jusqu'à ce

que la ligne soit tangente à la ligne d'obstacle. L'intersection de cette ligne avec les éléments géométriques du tracé routier est déterminée analytiquement. Hassan effectue une étude sur le terrain et constate que la procédure en 2D surestime ou sous-estime la visibilité avec une erreur importante. Une étude récente au Québec de l'utilisation de plusieurs outils pour la détermination automatique des zones de dépassement contredit cependant ce résultat et conseille un calcul basé sur des données GPS du profil en long et du tracé en plan (Leroux et Beaudoin, 2003).

L'utilisation de modèles détaillés tels que TWOPAS ou MARKC exige une connaissance détaillée de la route, alors que l'objectif est ici de déterminer une méthode efficace permettant de déterminer la distance de visibilité sur une route de géométrie inconnue mais sur laquelle des relevés GPS de la ligne centrale peuvent être effectués. Une méthode itérative en 2D se basant sue des relevés discrets de l'axe central de la route va donc être ici construite.

Généralement, deux distances de visibilité sont calculées pour la conception routière : à l'arrêt et au dépassement. La procédure développée peut s'appliquer aux deux cas, le principe étant similaire. La différence réside dans les caractéristiques de l'objet à détecter :

1. position – sur la même voie de circulation respectivement en sens opposé ;
2. hauteur – les phares arrière respectivement le toit de la voiture.

4.1.2. Présentation de l'algorithme proposé

4.1.2.1 Profil en long

Il s'agit de la méthode proposée par AASHTO (telle que présentée dans Harmignies, 2003), qui consiste en l'algorithme suivant :

3 lignes doivent être définies, telles que représentées sur la Figure 4-1 :

1. ligne axe : profil en long de l'axe de la route ;

2. ligne œil : translation verticale de l'axe de la route d'une hauteur variable selon la nature du véhicule considéré, correspondant à la hauteur de l'œil et fixée par la norme de signalisation routière, Ministère des Transports du Québec (1999) à 1.05 m ;
3. ligne obstacle : translation verticale de l'axe de la route d'une hauteur correspondant à la hauteur de l'obstacle ou du véhicule à repérer – selon le type de manœuvre : à l'arrêt 0.38 m, au dépassement 1.15 m ; cf. Signalisation Routière, Ministère des Transports du Québec (1999).

Les lignes doivent être définies par des vecteurs discrets de coordonnées (chaînage horizontal, z_{UTM}), approximant la géométrie réelle. Si les données de géométrie sont disponibles, un processus de discrétisation est utilisé (cf. annexe E). Les calculs de la distance de visibilité sont ensuite effectués :

4. Un point i de coordonnées ($chaînage^i$, $z_{UTM}{}^i$) est sélectionné sur la ligne œil ; initialement le premier point de la ligne œil ; sélection successive des points du vecteur œil ;
    a. Pour une valeur de i, sélection d'un point j ($chaînage^j$, $z_{UTM}{}^j$) de la ligne d'obstacle ; initialement le premier point de la ligne obstacle ; sélection successive des points de la ligne obstacle ;
        i. Tracé d'une droite entre i et j : obtention de l'équation $z = a * chaînage + b$;
        ii. Vérification pour tous les points k ($chaînage^k$, $z_{UTM}{}^k$) de la ligne axe de la route de la propriété $z_{UTM}{}^k < a*chaînage^k + b$;
        iii. Dès qu'un point k tel que $z_{UTM}{}^k > a*chaînage^k + b$ est trouvé ou que $chaînage^k > chaînage^{final}$, arrêter la boucle sur j ;
    b. La visibilité au $chaînage^i$ est déterminée par la formule : $(chaînage^j + chaînage^{j-1}) / 2 - chaînage^i$

5. Dès que le dernier point de la ligne œil[5] est atteint, arrêter la boucle sur i;

La Figure 4-1 permet de comprendre le processus. Elle représente les trois lignes déterminées sur une section de la route 101. Les données ont été relevées par GPS à des intervalles de 1s et une vitesse constante de 60 km/h.

Une droite est tracée entre le point i où la distance de visibilité doit être calculée et les points j de la ligne d'obstacle. S'il y a intersection entre cette droite et l'axe de la route, le point de la ligne d'obstacle j n'est pas visible. La droite tangente à l'axe de la route est celle permettant de déterminer la distance de visibilité. Elle est approximée par une droite reliant i au point situé à mi-distance de j et de j-1.

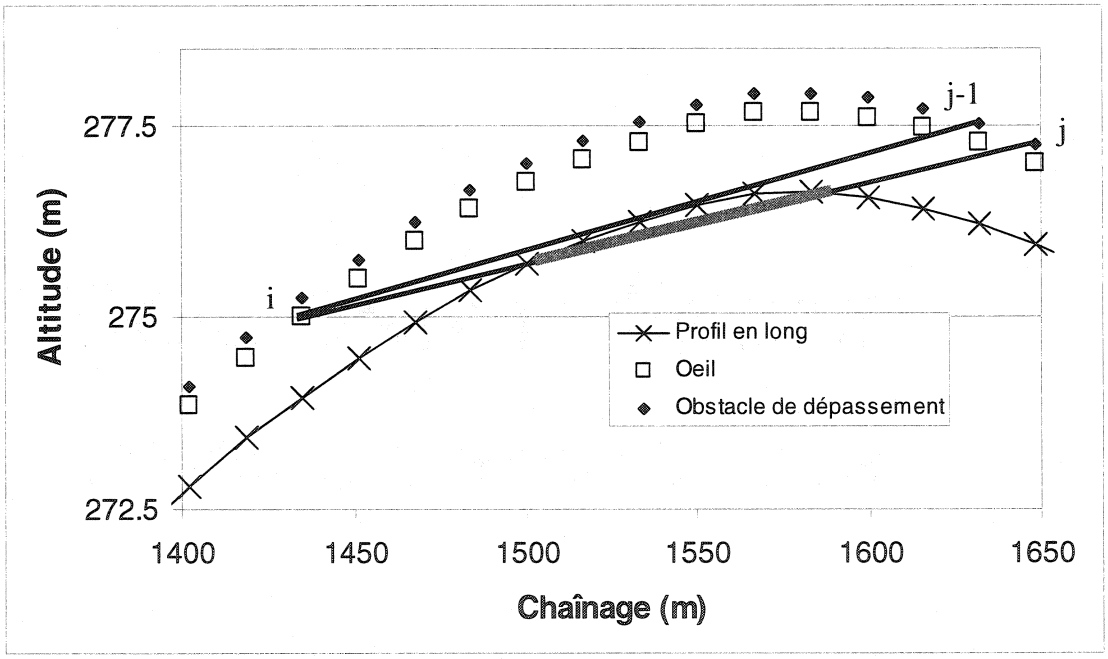


Figure 4-1: détermination de la visibilité sur le profil en long

[5] La ligne axe et la ligne obstacle doivent donc être connues sur une étendue spatiale supérieure à celle de la ligne œil, de sorte que le calcul de la visibilité pour le dernier point de la ligne œil soit possible.

4.1.2.2 Tracé en plan

Une procédure similaire en simplicité et en principe à celle pour le profil en long a été établie. Elle se base sur les considérations suivantes, illustrées sur la Figure 4-2 :

- sur le tracé en plan, la vision est limitée par une combinaison de la géométrie et d'obstacles ; il est possible de tracer deux lignes d'obstacle (à gauche et à droite) aux delà desquelles il est impossible de voir (il peut s'agir d'une montagne, d'une forêt...d'éléments plus hauts que la hauteur des yeux). En ce qui concerne la Signalisation Routière, Ministère des Transports du Québec (1999), au Québec, la ligne de vision est tangente au bord de la chaussée pour les virages intérieurs (c'est-à-dire lorsque la voie de circulation est la plus proche du centre de l'arc de cercle) et au bord de l'accotement lorsque le virage est extérieur[6].
- en outre, il s'agit de distinguer la manœuvre effectuée : le regard porte sur la voie de circulation pour détecter un véhicule à l'arrêt ou sur la voie en sens opposé pour évaluer une manœuvre de dépassement.

L'algorithme construit selon ces réflexions est le suivant :
5 lignes doivent être définies, telles que représentées sur la Figure 4-2 :

1. ligne axe : l'axe de la route sur le tracé en plan ;
2. ligne axe de circulation : le centre de la voie de circulation ;
3. ligne axe opposé : le centre de la voie de circulation des véhicules en sens opposé (inutile pour la mesure de la visibilité d'arrêt) ;
4. ligne obstacle gauche : elle correspond à l'ensemble des points formant à gauche de la ligne de circulation un obstacle de plus de 1.15 m de hauteur. En pratique (signalisation routière, 1999), il s'agit du bord de l'accotement ;
5. ligne d'obstacle droit : elle correspond à l'ensemble des points formant à droite de la ligne de circulation un obstacle de plus de 1.15 m de hauteur. En

---

[6] La distinction entre les deux cas tient au fait que, dans le cas d'un virage intérieur, la ligne de vision passe par la voie de circulation et peut être bloquée par des véhicules y circulant

pratique (signalisation routière, Ministère des Transports du Québec, 1999), il s'agit du bord de la chaussée.

Les lignes doivent être définies par des vecteurs discrets de coordonnées (x_{UTM}, y_{UTM}), approximant la géométrie réelle. De même que pour le profil en long, si la géométrie du tracé routier est connue, une procédure de discrétisation est utilisée (cf. annexe E). Les calculs de la distance de visibilité sont ensuite effectués :

6. Un point i de coordonnées (x_{UTM}^i, y_{UTM}^i) est sélectionné sur la ligne axe de circulation ; initialement le premier point de la ligne axe de circulation ; sélection successive des points du vecteur axe de circulation;
   a. Pour une valeur de i, sélection d'un point j (x_{UTM}^j, y_{UTM}^j) de la ligne axe opposé (respectivement axe de circulation pour le calcul de la visibilité d'arrêt) ; initialement le premier point de la ligne axe opposé (respectivement axe de circulation) ; sélection successive des points de la ligne axe opposé (respectivement axe de circulation);
      i. Tracé d'une droite entre i et j : obtention de l'équation

         $y = a * x + b$

      ii. Vérification pour tous les points k (x_{UTM}^k, y_{UTM}^k) de la ligne d'obstacle droit de la propriété :

$$\text{Si } (x_{UTM}^j > x_{UTM}^i ; y_{UTM}^k < a * x_{UTM}^k + b \text{) sinon } (y_{UTM}^k > a * x_{UTM}^k + b \text{)}$$

      iii. Vérification pour tous les points k (x_{UTM}^k, y_{UTM}^k) de la ligne d'obstacle gauche de la propriété :

$$\text{Si } (x_{UTM}^j > x_{UTM}^i ; y_{UTM}^k > a * x_{UTM}^k + b \text{) sinon } (y_{UTM}^k < a * x_{UTM}^k + b \text{)}$$

   b. Dès qu'un point k est tel qu'une des deux propriétés ii ou iii prend la valeur faux, arrêter la boucle sur j
   c. La visibilité au chaînage^i est déterminée par (chaînage^j + chaînage^{j-1}) / 2 – chaînage^i

7. Dès que le dernier point i de la ligne axe de circulation[7] est atteint, arrêter la boucle sur i.

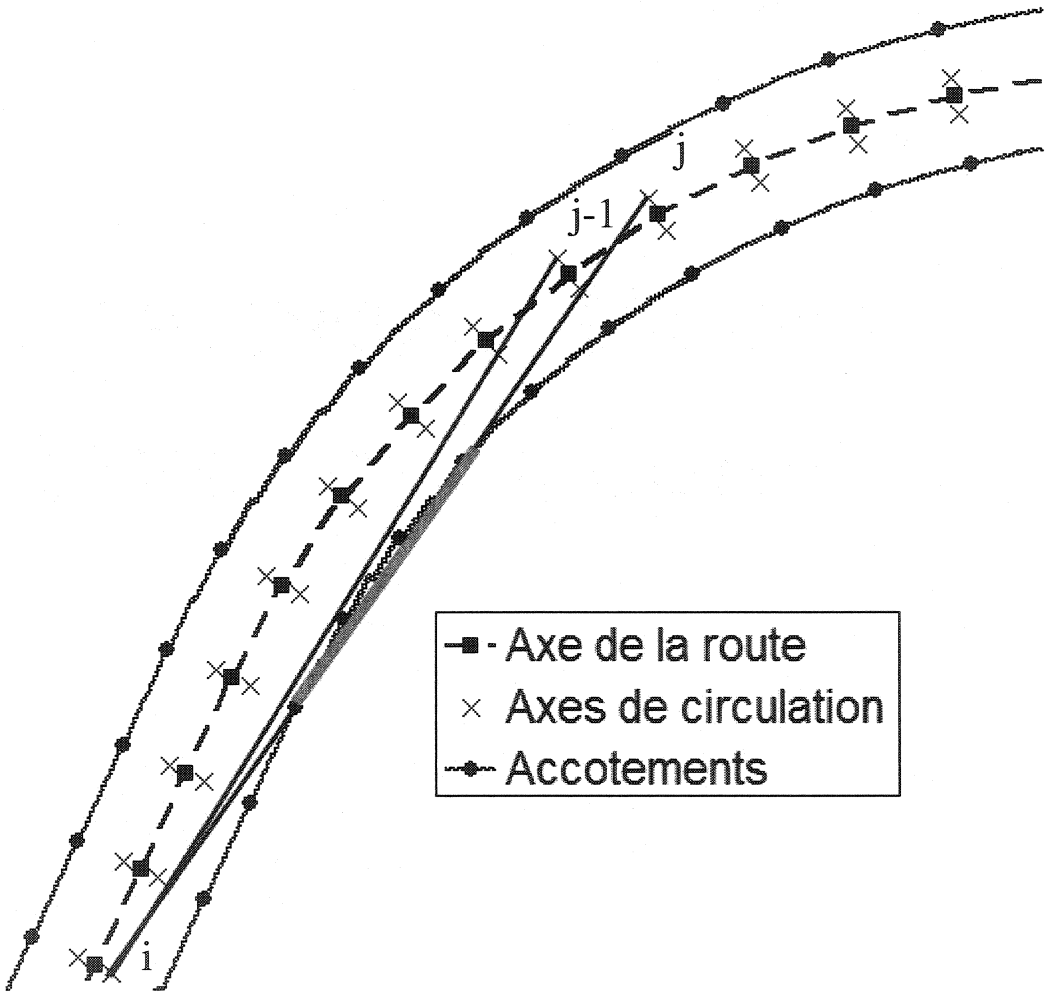


Figure 4-2: détermination de la visibilité sur le tracé en plan

La Figure 4-2 permet de comprendre le procédé. Elle représente les cinq lignes déterminées sur une section de la route 101. Les données ont été relevées par GPS à des intervalles de 1s et une vitesse constante de 60 km/h.

---

[7] La ligne axe de circulation et la ligne obstacle doivent être connues sur une étendue spatiale supplémentaire par rapport au dernier point de calcul de la visibilité, de telle sorte que ceux-ci soient possibles.

Une droite est tracée entre le point i où la distance de visibilité doit être calculée et les points j de la ligne axe de circulation en sens opposé. S'il y a intersection entre cette droite et une ligne d'obstacle (dans notre exemple, l'accotement), le point de la ligne axe de circulation en sens opposé (respectivement axe de circulation) j n'est pas visible. La droite tangente à la ligne d'obstacle est celle permettant de déterminer la distance de visibilité. Elle est approximée par la droite reliant i au point situé à mi-distance entre j et j-1.

4.1.2.3 Visibilité effective

La visibilité est le minimum des deux valeurs calculées. Cette méthode permet une approche normative déterminant la visibilité sur l'ensemble du tracé et prend beaucoup d'importance en tant qu'outil d'évaluation des conditions de dépassement. Ainsi, aux points où l'offre de dépassement est insuffisante, il sera possible de détecter un manque potentiel de visibilité et de proposer d'y remédier par un reprofilage – dont les effets sur la visibilité seront calculables.

4.1.3. Validation de l'algorithme

4.1.3.1 Validation par rapport à la littérature

Hassan, Easa et Abd El Halim (1998) notent tout d'abord comme problématique la combinaison des alignements. Celle-ci peut par exemple causer des pertes de visibilité. Cette remarque serait valable pour un modèle analytique. Notre modèle examine itérativement si tous les points situés devant lui sont visibles. Cette problématique ne se pose donc pas. Par contre, ni la visibilité de nuit, ni les obstacles surplombant la route ne sont considérés.

Hassan, Easa et Abd El Halim (1996) proposent un exemple montrant que la visibilité doit être calculée en 3D. Il s'agit d'un alignement avec une droite de 500 mètres, un cercle de rayon 800 mètres et une ligne droite de rayon 500 mètres combiné avec une pente constante de 6%, une parabole symétrique de longueur 500 mètres et une pente

constante de -6%. Si un dévers est présent, la visibilité 3D à l'origine de la courbe vaut 207.7 mètres tandis que la visibilité 2D égale au minimum des visibilités 2D du profil en long et du tracé en plan vaut 197.2 mètres. Notre modèle donne effectivement une visibilité de 196.5 mètres. Ainsi que le souligne Hassan, la représentation 2D peut donc conduire à des erreurs d'estimation importantes. Notamment, l'obstacle[8] cachant l'objet à détecter est mal défini. En effet, l'axe central de la route est considéré comme obstacle au cours du chemin de la ligne de vision. En réalité, cet obstacle varie constamment le long de la ligne de vision, car celle-ci traverse toute la largeur de la route sur laquelle la hauteur n'est pas constante du fait du dévers. Dans le cas d'une courbe, comme dans l'exemple proposé par Hassan, Easa et Abd El Halim (1996), le profil en travers ne correspond plus à un toit mais à un plan incliné. Par conséquent, le point de tangence ne sera pas obligatoirement situé sur l'axe de la route, ce qui explique l'erreur commise.

Grâce à la connaissance du dévers et de la position sur le profil en travers de la ligne d'obstacle, il est possible de reconstituer la hauteur réelle de l'obstacle pour chaque point de la ligne de vision. Cependant, dans le cas de la route 101, les données expérimentales relevées montrent que le modèle est satisfaisant dans l'état actuel (cf. Relevés sur le terrain). Un développement n'est donc pas jugé immédiatement critique.

4.1.3.2 Validation graphique

(a) Validation de la méthode pour le profil en long

La méthode pour la détermination de la visibilité fournie par le profil en long a été effectuée par Harmignies (2003) lors d'un projet de fin d'étude réalisé à l'École Polytechnique de Montréal.

---

[8] Par obstacle, le lecteur comprendra non l'objet à distinguer mais la disposition du terrain – i.e. de la route – bloquant la ligne de vision vers ce même objet

(b) Validation de la méthode pour le tracé en plan

La route « virtuelle » suivante a été étudiée à fins de validation de la mesure de la distance de visibilité :

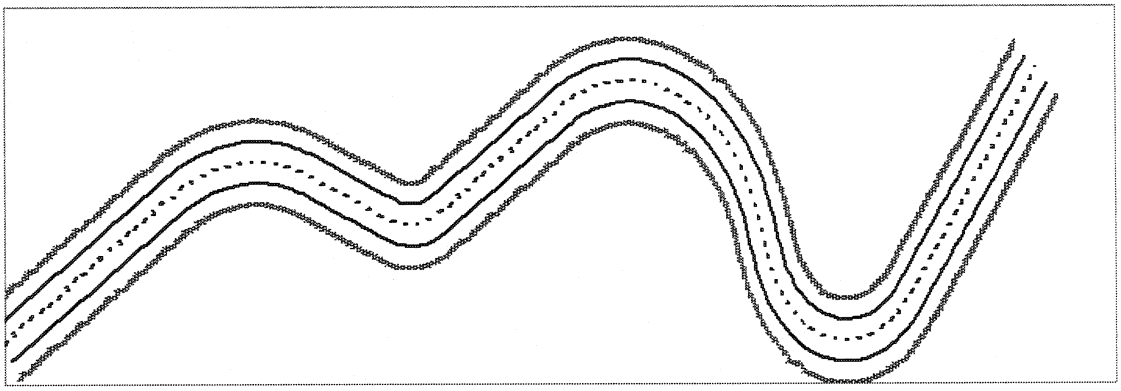


Figure 4-3: route virtuelle pour la validation graphique de la méthode de calcul de distance de la visibilité sur le tracé en plan

Les éléments géométriques (cercles et lignes droite) retenus ont été convertis en vecteurs de coordonnées par traitement VBA, ils sont résumés dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1 : éléments géométriques de la route virtuelle pour la validation graphique du calcul de la distance de visibilité sur le tracé en plan

type	X	Y	Azimuth (°)	Longueur (m)	rayon (m)	angle au centre (°)
origine	0.00	0.00				
droite	606.22	350.00	60.00	700.00		
arc	1111.43	394.20	110.00		600.00	50.00
droite	1393.34	291.59	110.00	300.00		
arc	1561.74	306.33	60.00		-200.00	50.00
droite	1994.75	556.33	60.00	500.00		
arc	2714.60	294.33	160.00		500.00	100.00
droite	2748.80	200.36	160.00	100.00		
arc	3260.52	110.13	40.00		-300.00	120.00
droite	3710.48	646.36	40.00	700.00		

Les relevés de visibilité ont été effectués à la main grâce à une règle, sur un tracé des éléments géométriques. Cette méthode grossière tient compte du fait qu'aucune donnée de visibilité précise n'est disponible sur le réseau québécois. Elle avait pour but de vérifier que le mode de calcul ne commettait pas d'erreur importante due à une erreur de raisonnement. Il a donc été choisi de n'effectuer aucun test statistique – celui-ci n'aurait en effet pas de valeur, car la précision de nos relevés est trop faible. Une estimation « visuelle » est donc effectuée

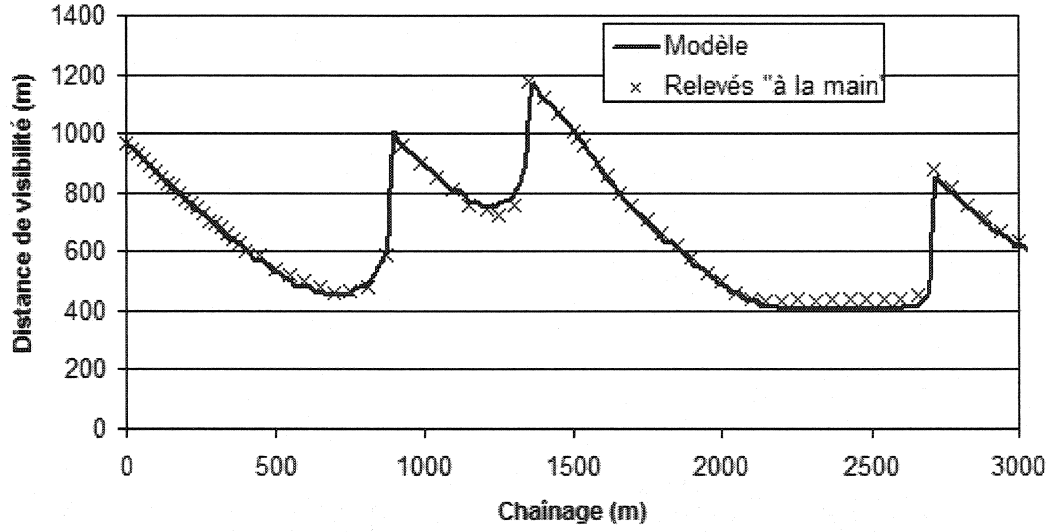


Figure 4-4 : visibilité d'arrêt - comparaison expérience / modèle

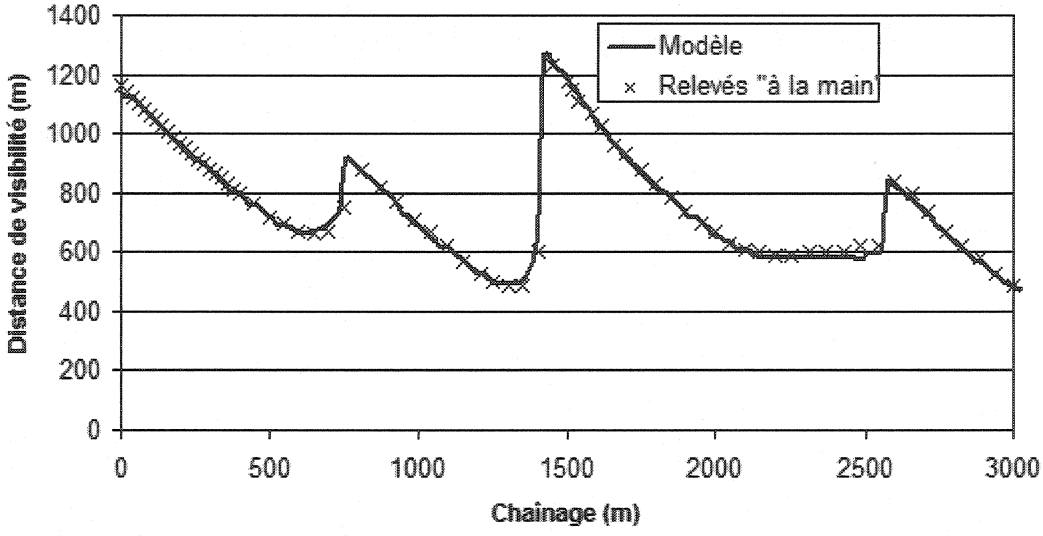


Figure 4-5 : visibilité de dépassement - comparaison expérience/modèle

Sur les figures Figure 4-4 et Figure 4-5, un relevé des distances de visibilité au dépassement et à l'arrêt effectué à la main est comparé aux résultats de l'algorithme. Étant donné que le pas de détermination de la visibilité lors des mesures à la main était plus important que celui utilisé lors des calculs, le relevé à la main est moins précis pour la détermination exacte des emplacements des pics. Malgré cette légère inadéquation, les graphiques suffisent à justifier la pertinence de la méthode.

4.1.3.3 Relevés sur le terrain

Afin d'étudier plus en détails si le modèle capture effectivement la visibilité réelle, des mesures sur le terrain de visibilité ont été effectuées ; le protocole de mesure est expliqué dans Baass et Grange (2004). Elles concernent la route 101, sur la section 101-04-33. La visibilité a été mesurée sur 6 km dans le sens Sud-Nord et 3 km dans le sens Nord-Sud. Aucune information quant à la conception de la géométrie routière n'était disponible. Par conséquent, une méthode basée sur le relevé GPS sur 15 km de l'axe central a dû être mise en place. Les données concernant les 9 derniers kilomètres n'ont pu être exploitées, car certaines erreurs sur les données verticales y étaient apparentes. En outre, étant donné que nous ne disposions pas de données de visibilité sur cette portion, leur traitement ne paraissait pas pertinent.

Les données obtenues sont disponibles sous forme d'un vecteur de coordonnées UTM $\begin{pmatrix} x_{UTM} \\ y_{UTM} \\ z_{UTM} \end{pmatrix}_i$. Or, l'algorithme bâti repose sur l'obtention de données discrètes indexées par le chaînage. Il s'agit donc de déterminer le chaînage de chaque point GPS. Il est approximé par la distance à vol d'oiseau :

$$chaînage_i = chaînage_{i-1} + \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}\ .$$

À partir de ces données, un vecteur à quatre dimensions ($chaînage_i$, x_i, y_i, z_i) est disponible. Cependant cette information n'est disponible que sur l'axe central. 4 lignes sur le tracé en plan et 2 sur le profil en long restent donc à définir.

En ce qui concerne le profil en long, il s'agit d'effectuer une translation verticale des coordonnées z de 1.15 m pour la ligne d'obstacle et de 1.05 m pour la ligne de visée. Les trois vecteurs à deux dimensions suivants sont donc exploitables :

- Axe de la route $\left(chainage^i, z^i_{UTM}\right)$
- Axe de l'obstacle $\left(chainage^i, z^i_{UTM} + 1.15\right)$
- Axe de vision $\left(chainage^i, z^i_{UTM} + 1.05\right)$

En ce qui concerne le tracé en plan, il s'agit d'obtenir les courbes parallèles à l'axe de la route. Dans un premier temps, les éléments du tracé routier sont recomposés sous forme de droites et de cercles – les clothoïdes ne sont pas considérées. Cette méthode est effectuée selon un procédé itératif :

1. Obtention d'un design géométrique « initial » par une méthode manuelle (Autocad, ou tracé à la main)
2. Détermination des chaînages de début et de fin des éléments
3. Détermination des points GPS entrant dans la composition de chaque élément
4. Obtention des caractéristiques géométriques des droites et des cercles par des méthodes de régression aux moindres carrés
5. Calcul de l'erreur commise (calcul de la distance entre les point GPS et le tracé)
6. Recommencer les étapes 2,3,4 et 5 jusqu'à ce que les points GPS entrant dans le calcul de chaque élément ne varient plus et que l'erreur soit suffisamment faible

Les différentes étapes sont décrites à l'annexe D. L'obtention d'un cercle par régression aux moindres carrés constitue une adaptation d'une méthode développée par Rusu, Tico, Kuosmanen et Delp (2003). L'erreur finale est sensible à la précision du relevé GPS, combinant une erreur systématique lié au mode de mesure (précision des satellites, précision de la correction DGPS) et des erreurs dues au mode de relevé (du fait de la présence de circulation importante sur la route, les mesures ont été faites sur une voie de circulation en positionnant le GPS le plus à gauche possible sur la voiture de mesure).

Le diagramme suivant présente l'erreur réalisée lors de la recomposition du tracé en plan :

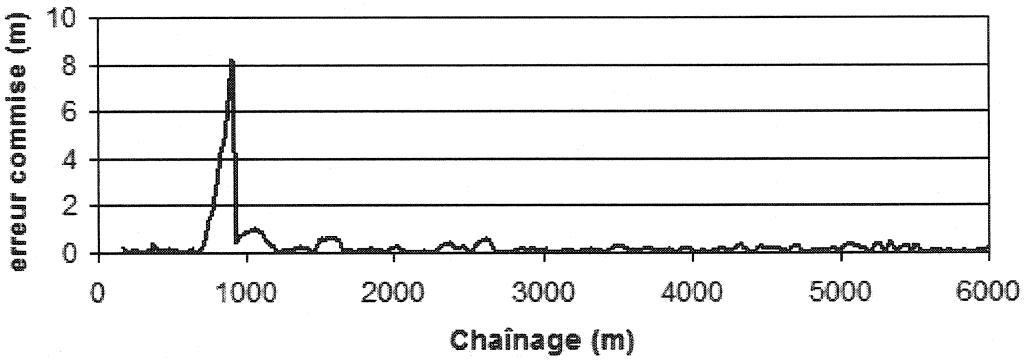


Figure 4-6 : erreur commise lors de la recomposition du tracé en plan

L'erreur maximum supérieure à 8 mètres correspond à un cercle de rayon très important. Hormis cet élément, le tracé est très bien représenté avec une erreur moyenne de 17 cm. Les quelques pics distinguables correspondent à la position des courbes, pour lesquels le parti pris de négliger les clothoïdes a une influence importante. La comparaison portant sur la distance de visibilité nous permettra de justifier si la représentation du tracé en plan telle qu'effectuée est pertinente.

Pour obtenir les informations souhaitées (lignes d'obstacles et lignes de circulation), il suffit de discrétiser l'alignement théorique obtenu (cf. annexe E) puis de réaliser, en chaque point du tracé, une translation selon un vecteur perpendiculaire à la tangente au

tracé. Il faut prêter attention à calculer la visibilité sur le profil en long et sur le tracé en plan au même chaînage. Pour ce faire, le chaînage réel des points GPS est calculé puis réaffecté aux points du profil en long.

Le profil en long et les éléments du tracé en plan (caractérisés par les rayons des courbes) pour les 6 km étudiés sont représentés sur la Figure 4-7. Les données géométriques sont fournies à l'annexe F.

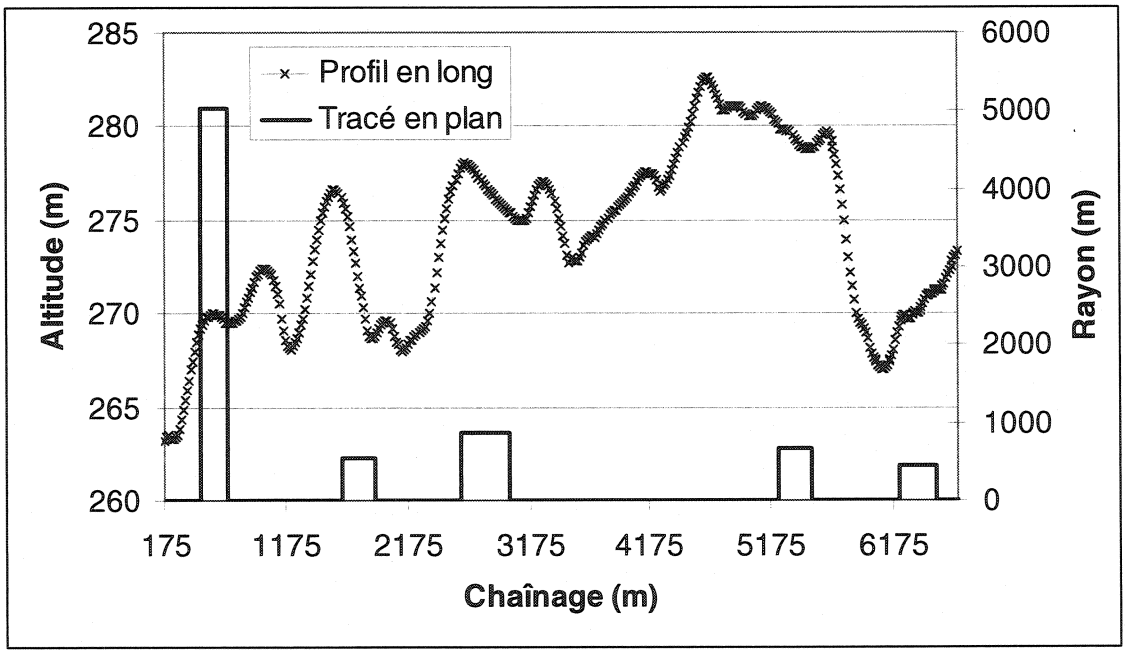


Figure 4-7: caractéristiques géométriques de la route 101, section 101-04-33

La Figure 4-8 permet la comparaison des distances de visibilité mesurées et calculées, pour une circulation dans le sens 1 (sud vers nord). Il est à noter qu'en raison de contraintes de sécurité, il était impossible de mesurer la distance de visibilité de dépassement réelle (avec un observateur circulant sur sa voie de circulation et une cible située au milieu de l'axe de la route). Deux séries de mesures ont donc été prises parallèlement : l'observateur était situé au milieu de l'accotement et les cibles au bord de l'accotement respectivement à gauche et à droite de la chaussée. Les deux comparaisons présentées correspondent aux calculs faits dans chacune des situations décrites, en considérant que la chaussée a une largeur totale de 7 mètres, que

l'observateur est situé à 1 mètre de la chaussée et que l'accotement a une largeur de 3 mètres. Les dévers sont supposés nuls.

Sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, les lignes continues représentent la distance de visibilité calculée tandis que les points correspondent aux relevés sur le terrain. Les lignes noires situées sur l'axe du chaînage indiquent que la visibilité est limitée par le profil en long. La correspondance entre les données mesurées et les calculs est très bonne.

Les calculs semblent cependant imprécis dans quelques cas où la visibilité est limitée par le tracé en plan. Le rapport de mesures Baass et Grange (2004) souligne qu'il était très délicat de mesurer la distance de visibilité lorsque celle-ci est limitée par le tracé en plan, car la détermination de la limite de l'accotement par les observateurs est subjective. De plus, les chaînages pour cette série de données avaient été déterminés avec une erreur très importante. Outre les données entre le chaînage 2700 et 2800, l'erreur reste néanmoins relativement faible.

La Figure 4-8 illustre la comparaison des données, uniquement pour la distance de visibilité avec observateur à gauche (cas s'approchant le plus de la distance de visibilité de dépassement), dans le sens 2 de circulation (nord vers sud). Les résultats coïncident également sur cette portion, avec une exactitude plus faible dans les courbes.

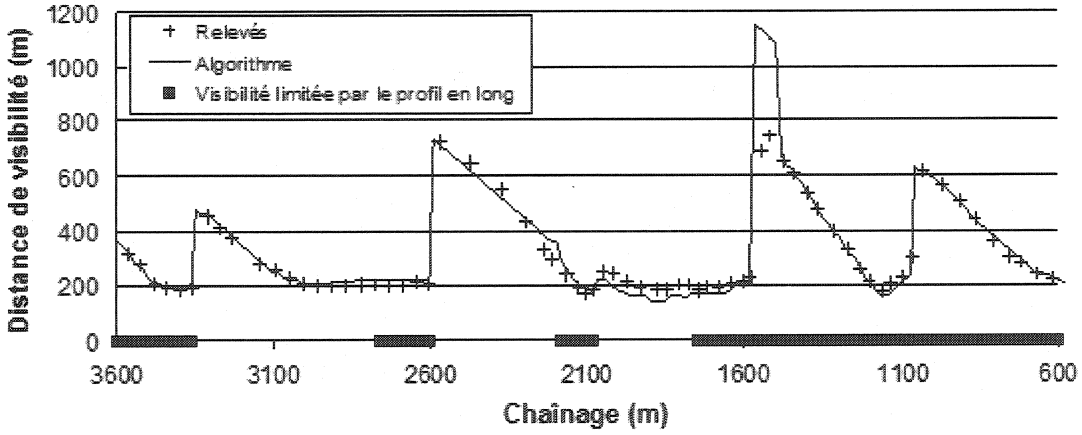


Figure 4-8 : distance de visibilité, comparaison calculs/relevés, cible à gauche de la chaussée, sens de déplacement Sud-Nord

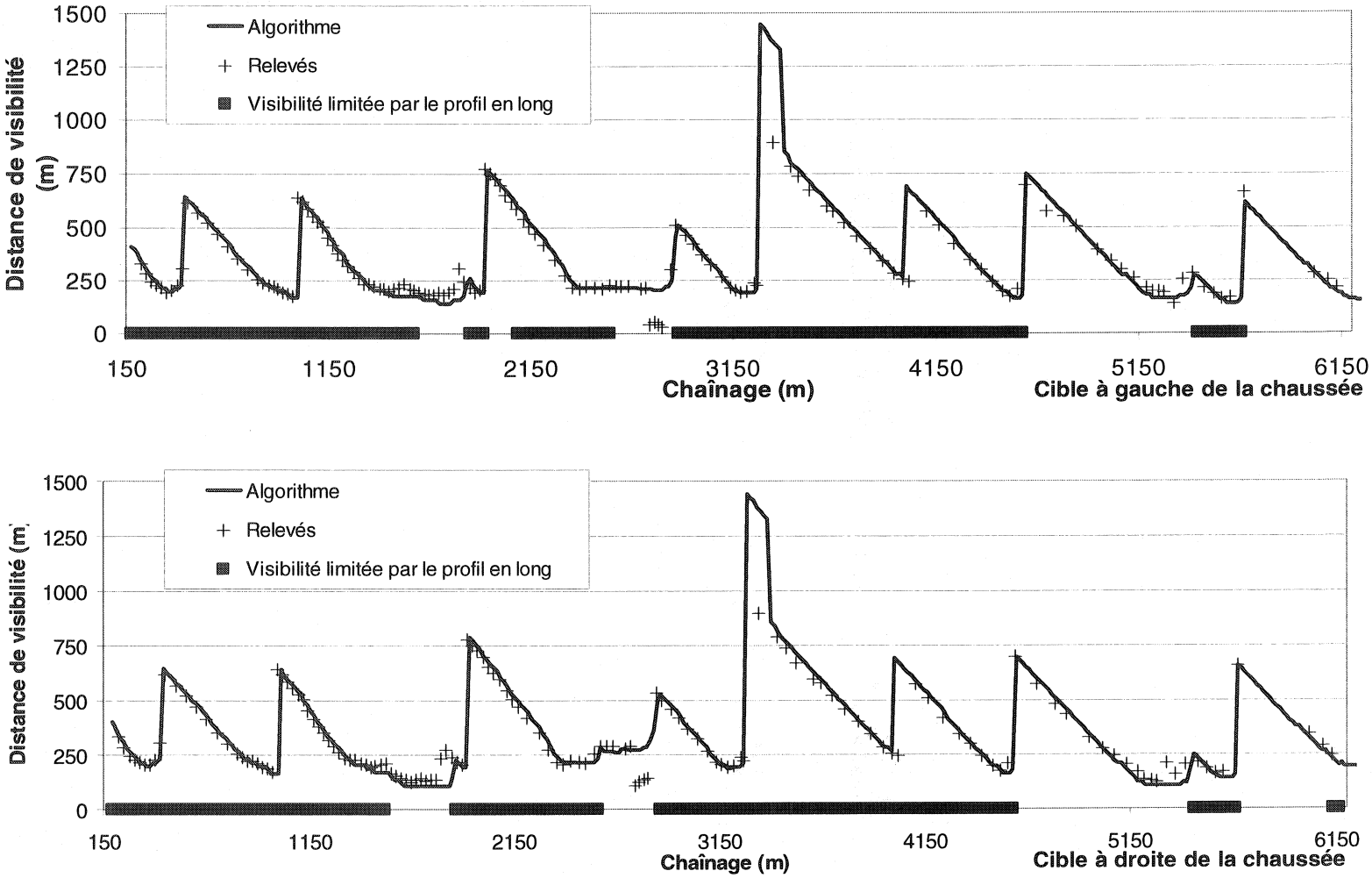


Figure 4-9 : comparaison calculs/relevés de la distance de visibilité, route 101, sens Sud-Nord, cible à gauche (respectivement à droite) de la chaussée

Les imprécisions des mesures sont détaillées dans Baass et Grange (2004). Les principaux facteurs d'erreur sont les instruments GPS, la méthode de reconstitution du tracé en plan, la discrétisation du calcul de la visibilité, la subjectivité des observateurs et les odomètres. Compte tenu de la multiplicité des sources d'inexactitude commises et du fait que la méthode est validée pour trois séries de données, le résultat est très satisfaisant. Des relevés terrain ultérieurs, effectués par d'autres observateurs, sont recommandés afin de valider définitivement la procédure et de vérifier si le doute soulevé par Hassan, Easa et Abd El Halim (1998) est suffisamment contraignant pour nécessiter une modélisation fine du dévers.

4.1.4. Sensibilité aux paramètres de l'algorithme

4.1.4.1 Dévers

La comparaison entre la visibilité réelle et celle obtenue par l'algorithme ne présente apparemment pas de point, où la combinaison en 3D d'une courbe et d'une pente a un effet important sur la distance de visibilité. Par conséquent, aucune modification algorithmique, tenant compte de la variation de la hauteur de la route sous la ligne de vision, n'a été effectuée pour l'instant.

Le dévers influence également la visibilité à travers la position verticale de l'objet à distinguer et de l'observateur. Or, nous ne disposons pas du profil en travers de la section de route. En outre, seule la visibilité offerte par le profil en long est concernée. Comme les distances de visibilité mesurée et calculée présentent une très bonne adéquation lorsque la visibilité est contrainte par le profil en long, il est pour l'instant jugé qu'une modification de l'algorithme en ce sens n'est pas nécessaire, au vu des hypothèses que nous serions contraints de formuler pour déterminer une valeur approchée du dévers.

4.1.4.2 Largeur de l'accotement

La largeur de l'accotement a été inférée égale à 3 mètres. Étant donné que la valeur exacte est ignorée, et que la perception de l'accotement par les observateurs est subjective, il était important de vérifier que ce facteur était explicatif des erreurs plus importantes commises dans les courbes. La sensibilité de la distance de visibilité par rapport à ce paramètre a été explorée en appliquant l'algorithme pour une largeur de 4 mètres et une largeur de 2 mètres. Le schéma ci-dessous indique la visibilité pour ces trois largeurs d'accotement dans une courbe de la route 101. Plus l'accotement est large, plus la valeur de la visibilité dans les courbes (approximativement constante) est importante – d'une valeur oscillant entre 10 et 30 mètres - et plus l'augmentation de visibilité à la sortie de la courbe se fait tôt – également d'une valeur de l'ordre de 15 mètres. Ces résultats sont conformes à l'intuition. Il est suggéré pour l'analyse qu'un relevé approximatif des largeurs d'accotement d'une précision de 50 cm soit effectué. Ce relevé devrait être disponible à chaque changement de la largeur de l'accotement.

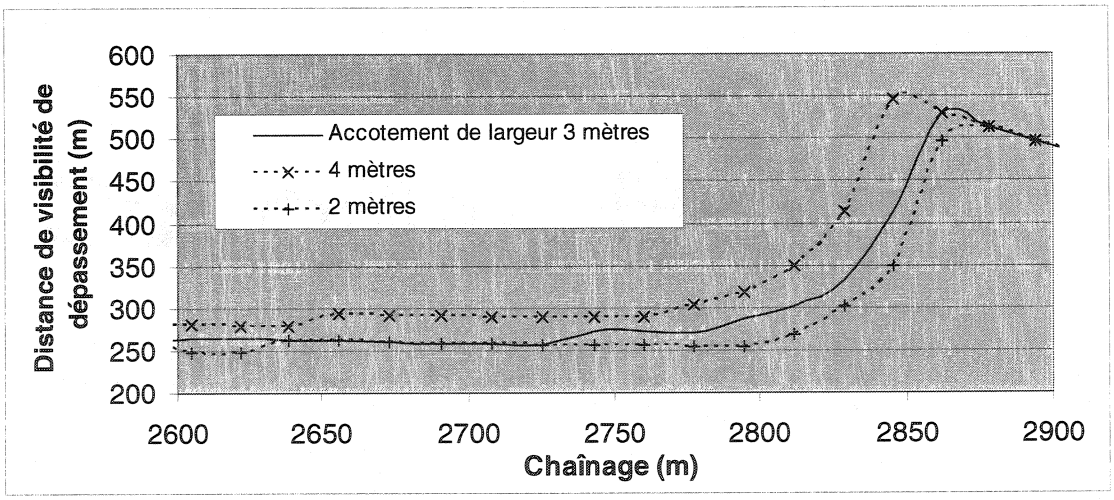


Figure 4-9 : influence de la largeur de l'accotement dans le calcul de la visibilité

4.1.5. Conclusion

L'algorithme semble fonctionnel sur une section de route avec une géométrie relativement simple – peu sinueuse et présentant peu de dénivelés. Il demande à être validé sur une variété de tracés routiers plus importante. Dans ce cas, une modification permettant de tenir compte du dévers s'avérera sans doute nécessaire ; il s'agit de réévaluer la hauteur de l'œil et de l'objet à distinguer, ainsi que de caractériser la variation de l'altitude de la route sous la ligne de vision. Enfin, si l'analyse implique une connaissance très précise de la visibilité dans les courbes, il est impératif d'effectuer un relevé de la largeur de l'accotement.

D'un point de vue algorithmique, la méthode développée est adaptée à des pas de calculs relativement grands (de l'ordre du mètre). Si la précision des données GPS est telle qu'un calcul à des ordres de grandeur inférieurs est possible (décimètre, centimètre) ou si une méthode de recomposition du profil en long est développée, l'algorithme sera modifié comme suit :

1. application de l'algorithme avec un pas de 1 mètre : détection du point distingué le plus éloigné à un mètre près;
2. recherche de la position précise par un algorithme divisant en deux l'intervalle entre le dernier point détecté et le point suivant et déterminant dans quelle portion se situe le point visible limite, jusqu'à ce qu'une taille minimum d'intervalle soit atteinte.

4.2. Procédure de génération des véhicules

4.2.1. Distribution des créneaux dans un trafic mixte et à deux phases

Il s'agit dans cette section de s'intéresser au moment d'arrivée des véhicules dans la simulation. Celui-ci est déterminé à partir de la date d'arrivée du véhicule précédent et d'un créneau temporel les séparant. La distribution des types de véhicules et des créneaux temporels produits comme variables d'entrée de la simulation doit

correspondre à la réalité. La tâche consiste en apparence à déterminer ces distributions au point d'entrée ; la génération des propriétés des véhicules étant effectuée indépendamment. En réalité, ainsi que le souligne l'analyse développée par SIMLA ++, les trois variables aléatoires (caractéristiques des véhicules, type de véhicule et temps d'arrivée) sont corrélées. Par exemple, il est intuitif que la vitesse désirée influence la taille des créneaux ; le premier véhicule d'un peloton devrait avoir une vitesse désirée faible. L'écart choisi par les conducteurs dans un peloton est aussi fonction de ses paramètres de voiture suiveuse et de sa volonté ou non de dépasser. Étant donné l'impossibilité de mesurer sur le terrain certaines caractéristiques psychologiques des conducteurs, l'interdépendance entre ces trois facteurs ne peut être établie empiriquement.

Une approche « classique » consiste donc tout d'abord à générer un temps d'apparition du véhicule selon deux modes possibles (libre ou en peloton), à déterminer indépendamment du véhicule précédent le type de véhicule et enfin à utiliser une zone tampon de sorte que le trafic s'autorégule. SIMLA ++ propose pour la deuxième étape une approche empirique alternative, qui consiste à analyser dans quelles proportions un type de véhicule suit un autre (par ex. : véhicule particulier suit véhicule particulier). Dans une évolution du modèle, la proportion de pelotons de chaque taille (jusqu'à 9 véhicules) est estimée, puis la distribution des quantités de poids lourds dans chaque taille de peloton. Cependant, la génération des caractéristiques individuelles des véhicules peut alors créer des situations non réalistes. Un véhicule lent peut ainsi être produit au milieu d'un peloton de véhicules plus rapide ; le peloton est alors mal défini.

Du fait des diverses méthodes, et en tenant compte des fonctions de distributions proposées dans SSIUEL et SIMLA ++, l'approche suivante est proposée :

- Le débit est observé sur des intervalles d'une heure ;
- Les flux sont séparés en deux types : circulation libre 1 et gênée 2 ;
- Les fonctions de répartition proposées par SSIUEL sont retenues ;

Circulation libre : $P_f\left(t_1 > t\right) = e^{-\frac{t - t_{\min 1}}{t_{\mu 1} - t_{\min 1}}}$

Circulation gênée : $P_g\left(t_1 > t\right) = e^{-k\frac{t - t_{\min 2}}{t_{\mu 1\,2} - t_{\min 2}}} \cdot \sum_{x=0}^{k-1} \frac{\left[k \cdot \frac{t - t_{\min 2}}{t_{\mu 2} - t_{\min 2}}\right]^x}{x!}$

P_f (respectivement P_g) est la probabilité qu'un créneau de taille $t_l > t$ se présente dans la circulation libre (dans la circulation gênée) ; t_{min1} (t_{min2}) est la valeur du créneau minimum en conditions de circulation libre (gênée) et vaut 0,75 s (cf. tableau suivant pour t_{min2}) ; $t_{\mu 1}$ ($t_{\mu 2}$) est le créneau moyen en circulation libre (gênée).

La valeur de t_{min2} dépend du débit :

Q (véh.h^{-1})	≤ 350	350 ≤ Q ≤ 750	≥ 750
t_{min2} (s)	0,75	0,9145 – 0,00047 Q	0,55

$t_{\mu 2} = 2.2$ s

Les proportions respectives de chaque type de circulation libre a_1 et gênée a_2 sont déterminées par :

$a_1 = 1,7111 - 0,2109 \cdot \ln(Q)$

$a_2 = 1 - a_1$

Alors $t_{\mu 1} = \frac{\frac{3600}{Q} - a_2 t_{\mu 2}}{a_1}$ (s)

Enfin, k=2

Un nombre aléatoire doit être généré (entre 0 et 1) ; si celui-ci est inférieur à a_1, le véhicule est en circulation libre sinon en circulation gênée. Un deuxième nombre aléatoire permet ensuite de déterminer le créneau à partir des distributions de probabilité décrites ci-dessus.

- Le premier véhicule est généré selon la proportion respective des deux types de véhicules ;

- Les véhicules suivants sont générés à partir de la connaissance du type du véhicule précédent et du raisonnement de SIMLA ++;

  Soient P_a la proportion de poids lourds et $P_b = 1 - P_a$ celle des véhicules particuliers. La proportion de poids lourds suivant un poids lourd devrait être P_a^2. En réalité, cette proportion vaut $P_a.(P_a + B)$. B est estimé par une étude sur le terrain (dans SIMLA ++, B = 0,05). Dans ce cas, si le véhicule précédent est un poids lourds a (respectivement véhicule particulier b), les probabilités P_{aa} et P_{ba} (respectivement P_{ab} et P_{bb}) qu'un poids lourd (respectivement véhicule particulier) suive valent :

$$P_{aa} = B + P_a$$
$$P_{ba} = P_b - B$$
$$P_{ab} = (P_b - B)\frac{P_a}{P_b}$$
$$P_{bb} = \frac{1 - P_a(1 - B + P_b)}{P_b}$$

  Soit x le type du véhicule précédemment généré. Un nombre aléatoire est généré à partir d'une distribution uniforme sur [0,1]. S'il est inférieur à P_{xa}, le véhicule généré est un véhicule particulier, sinon il s'agit d'un poids lourd.

- Une zone tampon permet l'autorégulation du trafic ; sa longueur est calibrée à partir des données de trafic recueillies, de telle sorte qu'elle produise des tailles et compositions de pelotons coïncidant avec les relevés.

4.2.2. Variations journalières du débit

Le débit à l'entrée du système est l'unique variable d'entrée permettant la génération de temps d'arrivées des véhicules. Le débit est une agrégation temporelle d'une grandeur qui varie à chaque pas de temps. Par conséquent, les variations du débit sont fortement

corrélées avec la plage temporelle d'agrégation des données. Selon les remarques formulées dans SIMLA ++, si une fenêtre trop courte est choisie, de fortes oscillations se produisent, liées aux différenciations de comportements, qui occultent les variations journalières. A contrario, si la fenêtre est trop large, certaines oscillations journalières n'apparaîtront pas. Un débit constant sera utilisé. Pour l'utilisation du modèle avec des variations de débit, il est recommandé de mesurer le débit sur des plages temporelles de 1 heure, et de réévaluer ce débit toutes les 5 minutes, selon un principe d'horizon de calcul glissant.

4.2.3. Génération des nombres aléatoires

Aucun programme informatique ne peut réaliser l'effort conceptuel de production de nombres réellement aléatoires. Des suites sont utilisées, dont les propriétés garantissent une distribution uniforme des nombres produits. De tels nombres sont dits pseudo aléatoires. Gerlough (1959) décrit la technique la plus couramment employée pour obtenir de tels nombres, ainsi que des algorithmes recomposant d'autres distributions à partir de la donnée de nombres pseudo aléatoires.

À la lumière des propositions de Hammersley et Hanscomb (1967), la suite R_m de nombres pseudo aléatoires utilisée est : $R_m = (\rho \cdot R_{m-1} + c) Mod\, b^n$. Selon Gerlough (1959), b est la base de numération de l'ordinateur, b^n est le plus grand entier et ρ un facteur multiplicatif, qui doit être distinct à chaque nouvelle instance de simulation désirant fonctionner avec des nombres aléatoires distincts. D'après Hammersley et Hanscomb (1967) et Gerlough (1959), il a été déterminé que cette suite a une période égale à b^n si :

- c et b sont premiers entre eux;
- $\rho = a^m$ avec a et b premiers entre eux;
- si 4 est un multiple de b^n, alors c est premier avec m.

Dans ces conditions, il ne peut être prouvé que la suite $\frac{R_m}{b^n}$ n'est pas distribuée uniformément sur [0,1]. L'obtention d'une période de taille importante ne garantit pas cependant que la suite possède des propriétés réellement aléatoires. Ainsi, la corrélation entre les éléments de la suite est plus complexe à établir. Pour ces raisons, une suite de nombres pseudo aléatoires est proposée par Park et Miller (1988) comme générateur universel, nommé « standard minimal », pour lequel il n'a pu être démontré que ses caractéristiques étaient non aléatoire. Cette suite est définie par $b^n = 2^{31}-1$, a=16 807 et c = 0. Nous choisirons cette suite pour générer des entiers pseudo-aléatoires. Il suffit alors de choisir une valeur de R_0 distincte à chaque simulation pour obtenir une combinaison de nombres aléatoires – et donc de situations et de *comportements* - distincte.

Le principe de la simulation de Monte Carlo est de produire suffisamment de réplications de la simulation d'une même situation avec un germe R_0 pour la génération de nombres aléatoires distinct pour pouvoir développer une analyse statistique des résultats produits.

4.2.4. Génération de nombres aléatoires selon des lois de distribution complexes

SSIUEL fournit des méthodes pour générer des nombres aléatoires selon une distribution négative exponentielle décalée et une distribution Erlang.

- Dans le premier cas, la détermination est directe : $t_m = t_{\min 1} - \left(t_{\mu 1} - t_{\min 1}\right) \cdot \ln\left(R_m\right)$ est distribué selon une fonction négative exponentielle décalée de t_{min1} et de moyenne $t_{\mu 1}$.

- La deuxième distribution est calculée par une méthode indirecte. Un nombre pseudo aléatoire R_m est généré ; R_m est considéré comme la probabilité d'avoir un créneau temporel au minimum égal à t_m. La suite d'éléments t_m sera distribuée selon une loi Erlang, il s'agit donc de la déterminer à partir de l'obtention de R_m. Si R_m est inférieur à 0.015, t_m = 10 s. La valeur maximum du créneau est en

effet prise égale à 10 s, la probabilité d'un créneau supérieur étant de 0.015% selon SSIUEL. Sinon, t_m est cherché entre 0 et 10 s, par un processus de division par deux de l'intervalle. À chaque étape, on sait que t_m se situe dans un intervalle $[t_i,t_j]$. La probabilité P cumulée de la distribution Erlang est déterminée pour $t = \frac{t_i + t_j}{2}$;

si $R_m < P$, alors $t_m \in \left[t,t_j\right]$, sinon $t_m \in \left[t_i,t\right]$. En itérant ce procédé jusqu'à une certaine précision (dixième de seconde), la valeur de t_m est déduite de R_m.

- Langmeier (1998) décrit le mode d'obtention d'une suite de nombres pseudo aléatoires U_n issus d'une distribution normale centrée réduite. Il suffit de générer deux nombres pseudo aléatoires tirés d'une répartition uniforme sur [0,1], R_{2n} et R_{2n+1}. Alors, il ne peut être démontré que la suite $U_n = \sqrt{-1\ln\left(R_{2n}\right)} \cdot \cos\left(2\pi R_{2n+1}\right)$ n'est pas distribuée selon une loi normale centrée réduite. Cette fonction de distribution nous sera utile pour la génération des caractéristiques des éléments véhicule/conducteur.

4.2.5. Introduction des véhicules dans la simulation

Le pas de temps choisi pour la simulation est relativement grand (2/3 s). Il est imposé par le choix du modèle de Gipps pour l'équation de voiture suiveuse, dont l'efficacité n'est démontrée que lorsque le pas de temps de réévaluation du système est égal au temps de réaction des conducteurs. Par conséquent, la date d'arrivée T du véhicule généré (qui est un nombre réel) correspond rarement à un temps t_i exact de l'horloge de la simulation (qui est discrétisé selon un pas de 2/3 s). Le véhicule est généré au temps t_i tel que $t_{i-1} < T \leq t_i$ en aval du commencement de la zone tampon. Sa date de génération est conservée comme base pour le calcul de la génération du prochain véhicule. La vitesse initiale ainsi que la position du véhicule sont générés selon deux cas :

- Les véhicules sont générés dans un premier temps avec leur vitesse désirée V_d à l'abscisse $x = (t_i - T)V_d$. De cette manière, le véhicule est effectivement passé à l'entrée du réseau avec un créneau temporel égal à T.
- Si le modèle de Gipps de voiture suiveuse indique que les véhicules sont en réalité trop proches et en situation de voiture suiveuse, la vitesse de génération est dans un premier temps examinée. Soit d_c (m) la distance minimum[9] avec laquelle ils peuvent suivre le véhicule précédent.

$$d_c = \frac{V_{n-1}^2}{2}\left[\frac{1}{\hat{b}_n} - \frac{1}{b_n}\right] + \frac{3 \cdot V_{n-1}\tau}{2} + S_{n-1}$$

avec :

V_{n-1} : vitesse du véhicule précédent (m/s)

b_n : décélération maximum que le conducteur n peut accepter (m/s^2);

S_{n-1} : somme de la taille effective du véhicule n-1 et de l'espace intervéhiculaire à l'arrêt (m);

τ : temps de réaction (valeur constante de 2/3 s);

$\hat{b}_n$: décélération maximale supposée du véhicule précédent (m/s^2).

[9] L'obtention de la formule se fait à partir des équations de voiture suiveuse – la démonstration est proposée à l'annexe B

- Si $x_{n-1} - x_n > d_c$, alors V_n, vitesse du véhicule lors de sa génération, est calculée de telle sorte que l'espace intervéhiculaire du véhicule précédent corresponde à la distance à partir de laquelle l'influence de ce véhicule se fait sentir (cf. annexe B), selon la formule :

$$x_{n-1} - x_n = \frac{1}{2}\left[\frac{V_{n-1}^2}{\hat{b}_n} - \frac{V_n^2}{b_n}\right] + 3\frac{V_n \tau}{2} + S_{n-1}$$

- Sinon, le véhicule est généré avec pour vitesse V_{n-1} et pour interdistance d_c.

Chapitre 5. Manœuvre de dépassement

Le Chapitre 3 Développement d'un outil de simulation microscopique des routes rurales décrit le comportement du conducteur en situation de conduite « normale », lorsqu'il circule sur sa propre voie de circulation. La manœuvre de dépassement va être décrite ici, en tenant compte des hypothèses et simplifications établies au Chapitre 3. Les raisonnements qui suivent forment la base de réflexion.

Des raisonnements physiques permettent d'établir le créneau minimum pour effectuer un dépassement en sécurité. L'acceptation d'un tel créneau par tous les conducteurs serait irréaliste étant donné que :

- Chaque conducteur cherche à disposer d'une marge de sécurité d'autant plus importante que le conducteur est prudent ;
- Les perceptions des informations et leur traitement par les conducteurs sont imprécises et individuelles ;
- Le créneau accepté est d'autant plus restreint que le désir de dépasser est important.

Un créneau critique est donc établi sur la base de considérations physiologiques.

Lors de la manœuvre, un processus décisionnel d'achèvement ou d'abandon du dépassement doit être modélisé. Cette situation peut intervenir si un véhicule surgit dans le champ de vision ou si le véhicule dépassant a surestimé le créneau disponible.

Enfin, à la fin de la manoeuvre se pose la question de la prolongation éventuelle du dépassement au prochain véhicule ou du moment où le changement de voie est effectué.

La manœuvre de dépassement est donc caractérisée par de nombreux processus décisionnels, auxquels ils convient d'ajouter les dynamiques associées. Une analyse

empirique, comportementale et physique des phénomènes permet de décrire un modèle de dépassement.

5.1. Résultats des études sur le dépassement

Différents types d'étude se sont intéressées à mesurer sur le terrain les caractéristiques décisionnelles du dépassement ; elles concernent des relevés pour lesquels :

- l'observateur n'intervient pas dans le processus (boucles magnétiques, caméra filmant une section de route) ;
- l'observateur provoque les dépassements (introduction d'une voiture lente) ;
- les dépassements sont effectués en conditions artificielles (sur piste, sur route réelle avec des conducteurs « cobayes »).

Parallèlement, de nombreux efforts de caractérisation physique de la manœuvre ont conduit au développement de recommandations pour la localisation des zones de non dépassement.

La variété des méthodes disponibles pour l'analyse permet donc de s'assurer de l'obtention d'une compréhension complète des phénomènes en jeu. Ce paragraphe constitue donc une revue de la littérature traitant de la manœuvre de dépassement.

5.1.1. Classification des dépassements

Matson et Forbes (1938) (respectivement Prisk, 1941) [cf. (Farber et Silver, 1967)] identifient clairement 4 types de dépassements :

- Dépassement retardé – après avoir suivi le véhicule précédent à une vitesse inférieure à sa vitesse désirée :
  - retour volontaire (selon Prisk : départ différé, retour libre) : aucune restriction (véhicule opposé, perte de visibilité) ne force le retour sur la voie de droite.

- retour forcé (départ différé, retour précipité)

- Dépassement lancé - sans ralentissement, décision instantanée en arrivant sur le véhicule à dépasser :
  - Retour volontaire (déplacement libre)
  - Retour forcé (départ libre, retour précipité)

Cette classification est reprise par Farber et Silver (1967), puis Troutbeck (1982).

Farber[10] (1969) étudie également la réaction aux restrictions sur la visibilité : si le comportement entre la nuit et le jour ne semble pas essentiellement différent, une distinction essentielle s'établit entre le cas où le dépassement est effectué alors qu'un véhicule arrive en face dans le champ de visibilité du conducteur et celui où il dépend uniquement des restrictions géométriques sur la distance de visibilité.

A priori, 8 classes de dépassements sont donc envisagées correspondant aux questions :

- Quel est le facteur influençant la décision d'engager une manœuvre de dépassement (visibilité « géométrique » ou véhicule opposé) ?
  - Le dépassement est-il retardé ? ou lancé ?
    - Le retour est-il forcé ? ou libre ?

5.1.2. Description de la manœuvre

5.1.2.1 Décision de dépasser

Dans un premier temps, le conducteur doit déterminer s'il entame une manœuvre de dépassement. Il est considéré qu'un conducteur dont la vitesse désirée est supérieure à la vitesse pratiquée par le véhicule précédent va être enclin à effectuer un dépassement

---

[10]Seul le dépassement arrêté est étudié dans cette expérience.

(notamment si cette vitesse relative dépasse une marge, fixée par exemple dans Baass (1999) à 15 km/h). Farber (1969), Bryant (1978) et Gordon et Mast (1968) exposent le problème du choix de dépasser ou non de manière similaire, qui postule que le conducteur compare deux créneaux (espace ou temps) :

- Créneau espace disponible (par rapport au véhicule opposé ou limité par la distance de visibilité) C ; le créneau temps T est donné par T = C/V où V est la vitesse à laquelle le véhicule précédent et le véhicule opposé se rapprochent (égal à la somme des vitesses des véhicules précédent et opposé – cette dernière valeur étant nulle dans le cas où aucun véhicule ne se trouverait dans le champ visuel)
- Créneau nécessaire : temps T_c et distance D_c minimums nécessaires pour que le conducteur accepte d'initier un dépassement.

Si $T > T_c$ ou $D > D_c$, le conducteur entame une manœuvre de dépassement. Dans la pratique (Farber, 1969), il est observé que le temps de dépassement (entre le moment où le véhicule franchit la ligne de marquage au centre lors de l'initiation du dépassement et l'instant où il la traverse à nouveau à la fin) est une constante par rapport aux vitesses pratiquées de l'ordre de 9s. Par conséquent, s'appuyant dans cette approche sur une suggestion de Farber (1969), nous proposons dans cette étude de se baser uniquement sur le créneau temps.

5.1.2.2 Abandon ou achèvement du dépassement

Lors d'une tentative de dépassement, le conducteur ne peut pas, lors de sa prise de décision, prendre en compte tous les paramètres permettant d'effectuer sa manœuvre de manière sécuritaire. En effet, il est avéré que les capacités de perception des positions des véhicules et de leurs caractéristiques dynamiques sont très variables et peu fiables (en fonction de la distance et de l'expérience du conducteur). De fait, le conducteur doit réévaluer continuellement au cours de la manœuvre si le dépassement est possible ou non. Ainsi, des situations potentiellement dangereuses telles que l'apparition inopinée d'un véhicule opposé à la sortie d'une courbe peuvent conduire à des réactions

adaptées : accélération pour finir le dépassement plus rapidement ou décélération pour abandonner la manœuvre. Il se peut cependant qu'une zone de dilemme apparaisse, empêchant le conducteur d'effectuer un choix rationnel ; dans ce cas, une coopération entre les différents participants est nécessaire. Cette situation complexe est étudiée en détail dans Herman (1963) et Baass (1999).

5.1.2.3 Écarts pré dépassement

Les relevés terrain indiquent des écarts beaucoup plus courts que l'écart sécuritaire fixé à 2 s. L'étude de Farber et Silver (1967) reporte ainsi des valeurs de 12 m pour un dépassement retardé et 26 m pour un dépassement libre.

Parallèlement, SSIUEL développe un modèle indiquant que le moment du changement de voie – donc le créneau pré dépassement – dépend de deux paramètres :

- le temps mis pour changer de voie. Durant ce temps, le conducteur dépassant risque d'accrocher le véhicule précédent. Il change de voie en fonction de ce paramètre, en respectant une marge de sécurité minimum;
- la décision d'abandonner le dépassement avant le changement de voie. Si le dépassement est abandonné, le conducteur doit pouvoir freiner sans percuter le véhicule précédent.

5.1.2.4 Écarts post dépassement

En ce qui concerne la décision de retourner sur la voie de circulation, SSIUEL distingue l'influence des trois véhicules de l'environnement : hiérarchiquement le véhicule opposé, le prochain véhicule précédent et le véhicule dépassé.

1. lorsque l'écart avec le véhicule opposé devient trop court, le changement de voie est impératif;
2. lorsque le véhicule dépassant est trop proche du prochain véhicule précédent, il doit freiner avant d'effectuer le changement de voie;

3. Lorsque l'écart avec le véhicule dépassé est trop faible, il doit accélérer pour disposer d'un écart suffisant pour ne pas le gêner lors du rabattement.

5.1.2.5 Trajectoire de changement de voie

Baass (1999) remarque que la manœuvre de changement de voie devrait être prise en compte dans le processus de décision. En effet, le déplacement latéral n'est pas instantané, mais suit une trajectoire approximée par diverses fonctions géométriques parfaites (cf. Sledge et Marshek, 1997) pour une revue exhaustive). Baass (1999) propose une combinaison de deux arcs de cercles tandis que SSIUEL représente la trajectoire par une ligne cosinusoïdale. D'après Baass (1999), la vitesse du changement de voie dépend de la trajectoire suivie – une plus grande vitesse impose de plus grands rayons, afin que le véhicule ne se renverse pas. Il est donc à prévoir que la distance de changement de voie, donc le temps, varie avec la vitesse.

La trajectoire ne sera pas détaillée finement, car il est considéré que ce phénomène joue un rôle faible sur la caractérisation de l'offre et de la demande de dépassement. Cependant, ses implications en terme de moment du changement de voie seront intégrées dans le modèle.

5.1.3. Réalisation du dépassement

La revue de littérature de Farber et Silver (1967), ainsi que les analyses de Troutbeck (1982) et Polus (1987), quantifient en détails la pratique du dépassement.

À noter que par temps et distance de dépassement s'entendent les temps et distances pendant et sur lesquels le conducteur dépassant se trouve sur la voie en sens opposé (à partir du moment où le coin avant droit du véhicule traverse la ligne de marquage axiale jusqu'au moment où le coin arrière gauche traverse la même ligne). Les caractéristiques ressortant de ces trois documents sont :

- les temps et distances de dépassement augmentent avec la vitesse et la longueur du véhicule dépassé. Ils sont en moyenne compris dans une fourchette de 8 à 12s ;
- la loi log-normale représente mieux les distributions ayant trait au dépassement (créneau accepté par exemple) que la loi normale ;
- le conducteur choisit un niveau de confort (accélération, interdistances, temps de perception-décision-réaction) qui est fonction du danger ressenti (présence ou non d'un véhicule, vitesse du véhicule à dépasser, type du véhicule à dépasser) ;
- aux distances où s'effectue la décision, les conducteurs sont incapables de juger les propriétés du véhicule opposé;
- les dépassements sont effectués avec une marge de sécurité importante ; les comportements dangereux proviennent de la combinaison d'une légère erreur d'estimation effectuée par un conducteur ayant un créneau critique faible.

5.2. Décision de dépasser

Les modèles de microsimulation (TWOPAS, SIMLA ++, SSIUEL) décrivent la décision de dépasser selon deux composantes :

1. Désir de dépasser : cette étape détermine dans quelles conditions de circulation le véhicule considéré cherche à dépasser le véhicule précédent. Le désir prend une valeur binaire en fonction des conditions suivantes :
    a. le véhicule précédent exerce une influence sur le véhicule considéré ;
    b. la différence entre la vitesse désirée du véhicule considéré et la vitesse du véhicule précédent dépasse un seuil ;
    c. le véhicule considéré se trouve dans une zone de dépassement ;
    d. aucune manœuvre de dépassement n'est entamée à proximité ;

2. Décision de dépasser : il s'agit de déterminer une valeur critique des créneaux se présentant en sens opposé en deçà de laquelle tout dépassement est impossible (temporel ou spatial). Ces créneaux sont individuels et fortement reliés à l'agressivité du conducteur. Selon SIMLA ++, trois pistes d'approche existent : considérations physiologiques, considérations physiques et calcul à partir des distributions de créneaux acceptés et de créneaux refusés. Un compromis entre ces techniques est généralement adopté ;

Dans le cas d'une autoroute, présenté par Gipps (1986), la décision de changer de voie se base sur les trois questions suivantes :

- Est-il possible de changer de voie ?
- Est-il nécessaire de changer de voie ?
- Est-il désirable de changer de voie ?

La deuxième question sort du cadre de cette étude : elle correspond à la présence d'un obstacle ou à la nécessité de se repositionner sur une voie pour effectuer un mouvement tournant.

Les remarques de la revue de littérature sur le dépassement (paragraphe précédent) nous ont conduit à formuler l'hypothèse, selon laquelle chaque conducteur possède un créneau temporel nécessaire tc, fonction des caractéristiques de l'environnement, qu'il compare avec le créneau disponible td. Cette formulation permet de fournir une réponse à la troisième question : « est-il désirable de dépasser ? ». Notre compréhension du dépassement nous a cependant conduit à supposer que la première question « est-il possible de dépasser ?» est fortement liée à la troisième. Un terme i, compris entre 0 et 1, dénommé l'impatience de dépasser, va donc être construit. La décision de dépasser sera prise si :

$$t_c < i \cdot t_d$$

À noter qu'une distinction particulière doit être faite dans le cas où aucun véhicule n'arrive en face. Il est supposé que la catégorie de dépassement (lancé, arrêté) a une influence sur la décision à travers les caractéristiques dynamiques distinctes au moment de la prise de décision.

5.2.1. Créneau disponible

Il est considéré par Farber (1969) qu'un conducteur ne peut estimer directement un temps qui ne s'est pas encore écoulé. En réalité, il va évaluer la distance disponible et la vitesse pratiquée. Les travaux de Michaels (1963) sur la vitesse de changement de l'angle avec lequel un véhicule est perçu, réexplorés dans une perspective de dépassement par Farber et Silver (1967) montrent que, si la distance est correctement perçue, de même que la vitesse du véhicule précédent, la vitesse du véhicule opposé est non détectable aux distances auxquelles s'effectue la décision. Les études n'aboutissent pas à un jugement définitif ; il semble d'après Bryant (1978) que les conducteurs estimeraient, selon leur expérience, la vitesse du véhicule opposé égale à celle du véhicule précédent, ou égale à la vitesse limite de la route.

Lay (1998) estime de son côté le créneau temps perçu comme :

$$T = \frac{T_{réel}}{1 + \frac{V_{dépassant}}{V_{dépassé}}}$$

$T_{réel}$: créneau temporel effectivement existant (s)

$V_{dépassant}$: vitesse du véhicule dépassant, au moment de la prise de décision (km/h)

$V_{dépassé}$: vitesse du véhicule dépassé, au moment de la prise de décision (km/h)

Cette analyse n'est cependant ni fondée théoriquement ni expérimentalement. Il s'agit d'une estimation de l'effet de la vitesse du conducteur sur sa perception du temps.

Pour notre modèle, il sera retenu que le conducteur évalue correctement la distance et détermine la vitesse V du véhicule opposé à partir d'une estimation personnelle de la vitesse moyenne désirée sur la route (influencée par sa propre vitesse désirée). Ainsi, il

sera tenu compte de l'agressivité du conducteur. Un conducteur « timide » conduit relativement lentement, pense que la vitesse sur la route est plus grande que sa propre vitesse et croira donc que le créneau temps est trop petit pour qu'il puisse dépasser. À contrario le conducteur agressif croira que le créneau est suffisamment important pour passer.

L'agressivité est caractérisée par un terme θ normalement distribué, de moyenne 1 et d'écart type 1/6, tel que le conducteur estime la vitesse du véhicule opposé par V / θ. Lorsque aucun véhicule en sens opposé n'est visible, le conducteur ressent moins le danger d'entamer une manœuvre et prend donc plus de risques. V est, dans ce cas, prise nulle.

Le créneau disponible T (s) vaut donc :

$$\begin{cases} avec\ véhicule\ opposé : \dfrac{x_{opp}(t) - x_n(t)}{V_{sujet} + \dfrac{V_{opp}}{\theta}} \\ sans\ véhicule\ opposé : \dfrac{visib_n(t)}{V_{sujet}} \end{cases}$$

avec

$visib_n$ (t) : visibilité disponible à t (m)

x_n (t) : chaînage du véhicule considérant le dépassement au temps t (m)

x_{opp} (t) : chaînage du véhicule en sens opposé au temps t (m)

V_{sujet} : vitesse du véhicule considéré (km/h)

V_{opp} : vitesse du véhicule opposé (km/h)

5.2.2. Créneau nécessaire

5.2.2.1 Considérations psychologiques

La distribution des créneaux de dépassement nécessaires est très peu étudiée dans la littérature, du fait de l'impossibilité d'obtenir sa valeur par des mesures directes. En effet, d'une part les études effectuées sur des pistes de test en demandant aux

conducteurs de conduire en conditions limites sont sujettes à caution du fait du caractère « idéal » des conditions (trafic opposé limité à un véhicule) – effectuées par Bryant (1978) et Gordon et Mast (1968) qui établit que les créneaux critiques sont non sécuritaires (très inférieurs aux créneaux réellement requis pour dépasser), d'autre part les mesures en conditions de trafic réelles ne renseignent pas sur le choix qui est fait, car :

- Une grande variabilité de créneaux nécessaires existe au sein de la population : cette variable doit donc être représentée par une distribution ; l'obtention de la valeur moyenne n'est pas suffisante.
- Du fait de la variabilité des conditions de trafic rencontrées (les cas pour lesquels le créneau est très important masquent les résultats), seul le créneau minimum pourrait donner une idée du créneau nécessaire. Cependant, celui-ci correspond uniquement au créneau critique *minimum*, et ne donne pas d'idée quant à la distribution des créneaux nécessaires.

Diverses méthodes sont cependant possibles pour reconstituer le créneau nécessaire. Brilon, Koenig et Troutbeck (1999) détaillent ces techniques de calcul dans le cas du créneau nécessaire pour traverser une intersection aménagée en carrefour à stop. Ils notent que l'analyse combinée des créneaux acceptés et refusés est nécessaire lorsque les mesures sont effectuées en cas non saturé. Dans le cas de relevé sur le terrain d'un dépassement, il est cependant impossible de déterminer si un créneau a été réellement refusé ou si l'absence de dépassement s'explique par un désir nul.

Troutbeck (1981) applique de telles méthodes uniquement à partir de la donnée des créneaux acceptés et détermine la distribution du créneau nécessaire comme une loi log normale :

de moyenne $e^{\left(0.0181 \cdot V + 1.84 + \frac{(0.0132 \cdot V - 0.43)^2}{2}\right)}$

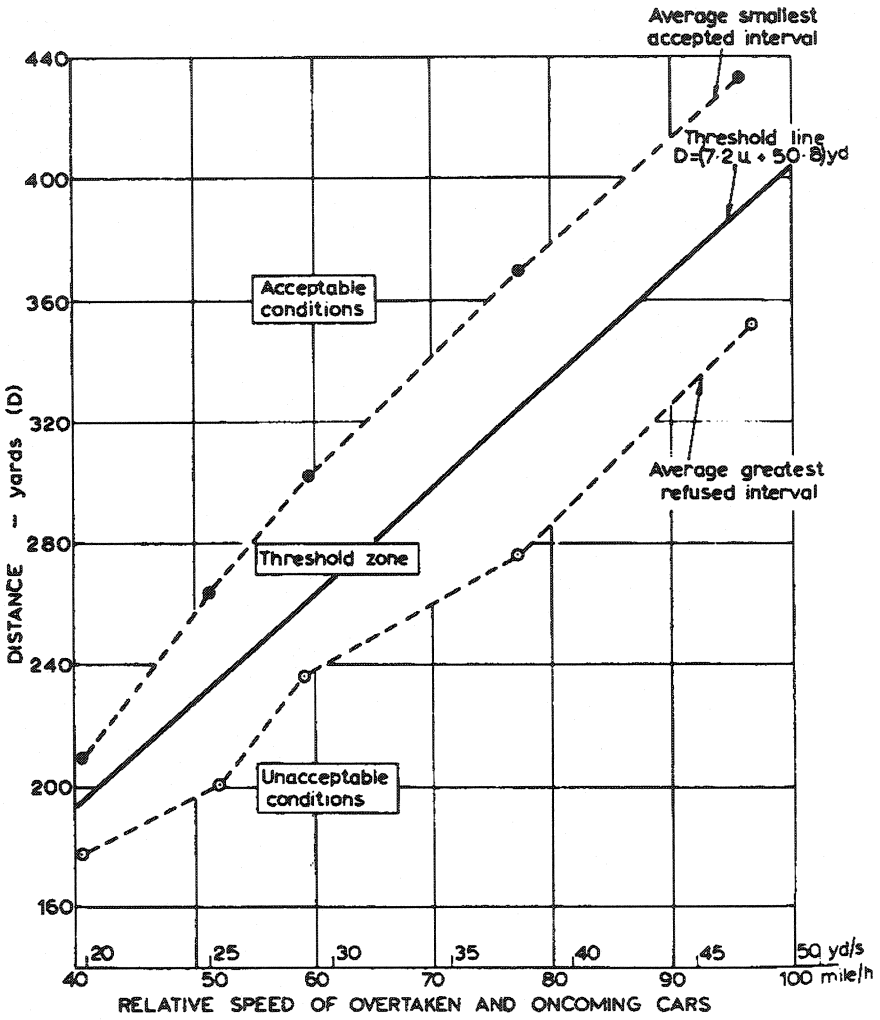


Figure 3. Controlled experiment : estimation of threshold distance.

Figure 5-1 : créneau nécessaire - modèle de Crawford, extrait de Crawford (1963)

et de variance $e^{2\cdot\left(0.0181\cdot V+1.84+\frac{(0.0132\cdot V-0.43)^2}{2}\right)}\cdot\left(e^{(0.0132\cdot V-0.43)^2}-1\right)$

en fonction de la vitesse V (km/h) du véhicule dépassé et valable pour un dépassement sur un camion de 16 m.

Crawford (1963) effectue des mesures en conditions contrôlées, ce qui lui donne accès à la distribution des créneaux refusés et acceptés. La Figure 5-1 illustre l'analyse

effectuée : une moyenne des créneaux acceptés et refusés est déterminée, ce qui lui permet d'obtenir un encadrement du créneau nécessaire.

Crawford estime alors que l'équation tc = 6.58 + 46.45 / v (s) représente correctement la valeur moyenne du créneau nécessaire.

avec v vitesse relative entre le véhicule opposé et dépassé en m/s

SIMLA ++ propose de manière similaire une valeur moyenne $tc = \frac{\left(310 + 12.2 \cdot v_{dépassé}\right)}{v_{dépassé} + v_{opposé}}$,

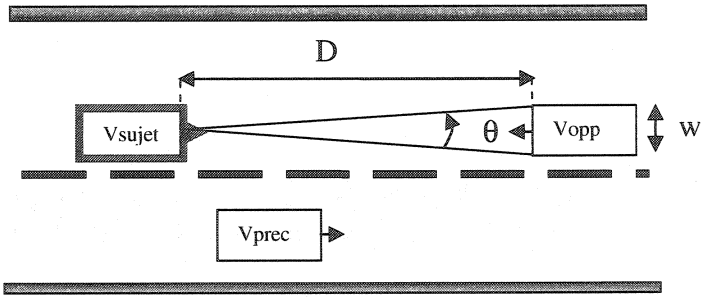
avec

$v_{dépassé}$: vitesse du véhicule dépassé (m/s)

$v_{opposé}$: vitesse du véhicule opposé (m/s)

Les trois résultats divergent avec une ampleur très importante – ce qu'illustre la Figure 5-3, ce qui nous pousse à considérer les résultats sous une optique « physiologique ». L'analyse de Farber et Silver (1967) montre en effet que peu de dépassements sont entamés lorsque le véhicule opposé se situe à une distance où il est possible de juger de sa vitesse, car le risque apparaît trop important.

Soit θ (rad) l'angle avec lequel est perçu un véhicule (dépassé, opposé) par un observateur (véhicule dépassant dans notre cas). Notons D (m) la distance séparant le pare chocs avant des deux véhicules et w (m) la largeur du véhicule observé.



On a : $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{w}{D}\right)$

Donc $\frac{d\theta}{dt} = \frac{w}{D^2 + w^2}\frac{dD}{dt}$

Figure 5-2: schéma de référence pour le calcul du créneau nécessaire

Cette valeur correspond à la vitesse avec laquelle l'angle perçu change, qu'on va nommer vitesse angulaire. Or il a été établi, tel que cité dans Michaels (1963), que la

valeur moyenne de la limite de détection de la vitesse angulaire pour l'œil humain est de s = 6.10^{-4} rad/s. Ce seuil nous donne donc la distance limite au-delà de laquelle les vitesses ne sont pas perceptibles :

$$D = \sqrt{\frac{w}{s}V - w^2}$$

Avec V vitesse relative entre les deux véhicules (m/s).

Dans le cas du dépassement, on obtient un créneau temporel critique qui vaut :

$$T = \frac{\sqrt{\frac{w}{s}(V_{dépassant} + V_{opposé}) - w^2}}{V_{dépassant} + V_{opposé}}$$

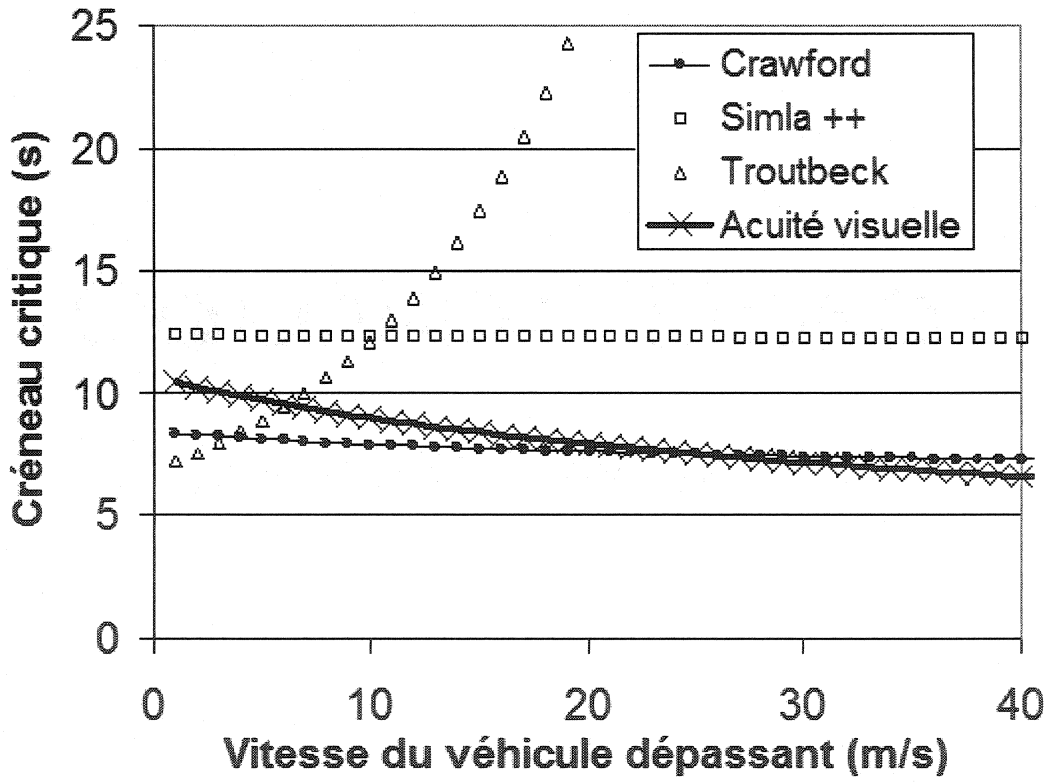


Figure 5-3 : comparaison des valeurs de créneau critique

La figure précédente est une comparaison des valeurs de la moyenne du créneau critique en fonction de la vitesse du véhicule dépassant. La vitesse du véhicule opposé

vaut 25 m/s et des voitures de largeur 1.7 m ont été considérées – hormis pour le modèle de Troutbeck, concernant exclusivement les poids lourds.

Le modèle de Crawford correspond aux valeurs minimales du créneau nécessaire, lorsque l'attention portée au dépassement est maximum – désir de dépasser de 1. A contrario, les modèles de Troutbeck et de SIMLA ++ ont été effectués à partir de mesures sur le terrain, par conséquent avec divers désirs de dépasser. Or, nous cherchons ici le créneau nécessaire lorsque le désir de dépasser est maximum. Dans ce sens, seuls les modèles de Crawford et d'acuité visuelle fournissent un résultat pertinent. Les deux modèles étant équivalents, l'acuité visuelle sera choisie comme référence puisque elle permet de prendre en compte l'effet de la largeur du véhicule arrivant en face. Plus le véhicule est large, plus la vitesse du véhicule opposé est perçue tôt et plus le conducteur hésite à dépasser. En outre, la variation du créneau critique en fonction de la vitesse du véhicule dépassant est plus marquée dans le modèle d'acuité visuelle que selon le modèle de Crawford.

Une première comparaison rapide des créneaux disponibles et nécessaires choisis semble présenter un paradoxe : plus la vitesse du véhicule opposé est importante, plus le créneau nécessaire est petit – tandis que le créneau apparemment disponible ne varie pas – donc plus la probabilité d'accepter le créneau augmente. La littérature relevée notait justement la présence de ce paradoxe. En fait le conducteur a tendance à se représenter l'environnement en fonction de son expérience de conduite ; par conséquent, il surévalue l'occurrence de situations « moyennes » – comme le note Bryant (1978). De fait, la vitesse d'un véhicule en sens opposé circulant plus rapidement que la vitesse moyenne de la route (*telle que se la représente le conducteur*) sera sous-estimée et le conducteur prendra une décision plus risquée.

Le cas d'un dépassement sans véhicule dans le champ de visibilité est traité en considérant une vitesse du véhicule opposé nulle et la largeur de la route comme objet à détecter.

5.2.2.2 Considérations physiques

Les raisonnements précédents ont permis de formuler un seuil psychologique permettant d'entamer un dépassement, que la décision soit rationnelle ou non. Cependant, au fur et à mesure que les deux véhicules se rapprochent, le conducteur se rend compte plus précisément de la nature du danger et de l'action à prendre (freiner pour abandonner le dépassement ou accélérer pour l'achever de manière forcée). On considère ici que cette deuxième limite correspond à des considérations physiques sur les capacités du moteur. La formulation de cette limite reprend la compréhension du phénomène développée par Herman et Lam (1972).

À des fins de simplification des manipulations d'équation, un référentiel mobile est lié au capot avant de la voiture dépassée. Ainsi, si (x_0, v_0) est l'état initial du véhicule dépassé dans le repère fixe, en considérant sa vitesse constante, alors un véhicule d'état (x,v) au temps t dans le repère mobile a pour état $(x+x_0+v_0t, v+v_0)$ dans le repère fixe. Le raisonnement est donc effectué dans le repère mobile et les états des véhicules dans le repère fixe sont calculés grâce à la conversion ci-dessus.

(a) Positions d'abandon et d'achèvement du dépassement

Soit la configuration de la figure 5.4.

La position B est celle derrière le véhicule conducteur dépassé en cas d'abandon du dépassement et A celle après aboutissement du dépassement. Les écarts sont notés S_{av} et S_{ar}. Le véhicule opposé s'approche à une vitesse C égale à la somme de sa vitesse et de la vitesse du véhicule dépassé dans le référentiel fixe ; il est éloigné du point A d'une distance S. Il atteint les points B et A respectivement aux temps $\delta_a = (S - s_{av} - s_{ar}) / C$ et $\delta_b = S / C$. S_{av} et S_{ar} sont les créneaux intervéhiculaires en situation de voiture suiveuse (cf. annexe B).

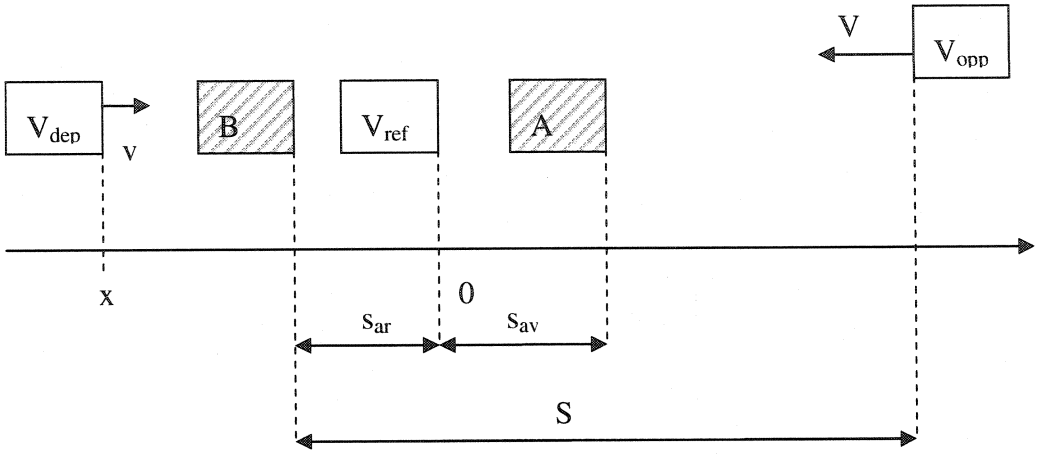


Figure 5-4 : paramètres du modèle de Herman

Les calculs suivants, reprenant ceux développés dans Herman et Lam (1972), indiquent quelles sont les positions critiques liées au conducteur dépassant pour pouvoir compléter son dépassement (respectivement l'abandonner), en considérant une accélération (respectivement une décélération) linéaire – à des fins de simplification.

Soit (x,v) l'état initial du véhicule dépassant dans le repère mobile.

Pour compléter le dépassement sans collision, le conducteur doit avoir dépassé la position B au temps δ_a. Soit a son accélération et τ son temps de réaction, la condition s'écrit :

$x(\delta_a) > s_{av}$, soit :

$$x > s_{av} - \left(v\tau + v(\delta_a - \tau) + \frac{a(\delta_a - \tau)^2}{2} \right) = x_{accomplissement}$$

Le terme : $\left(v\tau + v(\delta_a - \tau) + \frac{a(\delta_a - \tau)^2}{2} \right)$ correspond à la distance parcourue pendant δ_a.

Pour abandonner le dépassement sans collision, le conducteur doit être en amont de la position A au temps δ_b. Soit b sa décélération et τ son temps de réaction, la condition s'écrit :

$x(\delta_b) < -s_{ar}$, soit :

$$x < -s_{ar} - \left(v\tau + v(\delta_b - \tau) - \frac{b(\delta_b - \tau)^2}{2} \right) = x_{abandon}$$

Ces données permettent d'analyser la problématique du choix de continuer ou d'abandonner le dépassement. Dans les positions pour lesquelles $x_{accomplissement} < x_{abandon}$, il y a toujours la possibilité d'effectuer un choix rationnel. Au contraire si $x_{abandon} < x_{accomplissement}$, la zone $[x_{abandon} ; x_{accomplssement}]$ est dangereuse car il y est impossible d'éviter une collision. Dans ce cas, une coopération entre les conducteurs prenant part au dépassement est nécessaire.

(b) Analyse de la distance de visibilité minimale

Il s'agit de déterminer la distance S pour laquelle $x_{abandon} > x_{accomplissement}$ – c'est-à-dire la distance qui permet toujours d'effectuer un choix sans risque de collision. Herman et Lam (1972) proposent une formule complexe, laissant supposer que S est la racine d'un polynôme du second degré. Nous avons choisi de reprendre les calculs, avec pour objectif de recomposer cette équation polynomiale.

D'après les équations :

$$s_{av} - \left(v\tau + v(\delta_a - \tau) + \frac{a(\delta_a - \tau)^2}{2} \right) > -s_{ar} - \left(v\tau + v(\delta_b - \tau) - \frac{b(\delta_b - \tau)^2}{2} \right)$$

Les valeurs de δ_a et de δ_b sont intégrées dans l'équation, ce qui donne :

$$S_{av} - \left(v \cdot \tau + v \cdot \left(\frac{S - S_{av} - S_{ar}}{C} - \tau \right) + \frac{a \cdot \left(\frac{S - S_{av} - S_{ar}}{C} - \tau \right)^2}{2} \right)$$

$$>$$

$$S_{ar} - \left(v \cdot \tau + v \cdot \left(\frac{S}{C} - \tau \right) - \frac{b \cdot \left(\frac{S}{C} - \tau \right)^2}{2} \right)$$

Soient les variablesμ, ν et σ définies comme suit :

$$\mu = \left(\frac{a}{C^2} - \frac{b}{C^2} \right)$$

$$\upsilon = -\frac{\left(a \left[\frac{S_{av} + S_{ar}}{C} + \tau \right] + b\tau \right)}{C}$$

$$\sigma = -2 \cdot \left(S_{av} + S_{ar} \right) \cdot \left(1 - \frac{V}{C} \right) + a \left(\frac{S_{av} + S_{ar}}{C} + \tau \right)^2 + b\tau^2$$

En factorisant l'inéquation par rapport aux puissances de S, la condition suivante peut être exprimée sur un polynôme du second degré en S :

$$\mu \cdot S^2 + 2\nu \cdot S + \sigma < 0$$

Examinons les valeurs de $\Delta = \nu^2 - \sigma\,\mu$

Le maximum du polynôme est obtenu lorsque S = $-\frac{\upsilon}{\mu}$ et vaut : $\frac{-\upsilon^2}{\mu} + \sigma$. Par conséquent :

- Si $\Delta<0$, alors le polynôme en S est constamment négatif, car $(-\mu) \cdot \left(\frac{-\upsilon^2}{\mu} + \sigma \right) < 0$

Donc, quelque soit la visibilité disponible, un dépassement sûr est réalisable.

- Si $\Delta \geq 0$, alors le polynôme en S a deux racines $s_1 > s_2$. Pour $S \in [s_1, 0]$, le polynôme est toujours négatif ; aucun véhicule ne peut alors se retrouver dans une zone d'indécision. S_{min} est notée d_{Herman} dans le reste du document.

(c) Prises de décisions lors du dépassement

Le conducteur ne se rend compte d'un danger potentiel lié à son dépassement que lorsqu'un véhicule entre dans la zone $[0, d_{Herman}]$. Dans cette situation, une prise de décision est nécessaire. Les considérations suivantes sont des propositions de ce projet de recherche, élaborées à partir des réflexions de Herman et Lam (1972), qui ont été adaptées aux besoins de la microsimulation.

Si $x > x_{achèvement}$ le dépassement se poursuit, mais avec un retour forcé. Dans le cas contraire, si $x < x_{abandon}$, le dépassement est abandonné. Enfin, si le conducteur se trouve dans la zone d'indécision, il doit accélérer pour compléter le dépassement, en profitant de la coopération du véhicule opposé. Un modèle décrivant la dynamique du véhicule pour ces trois cas est décrit au paragraphe Comportement lors du dépassement.

La supposition d'accélération linéaire simplifie la résolution du problème et permet la détermination de cette distance minimale. Elle n'est cependant pas réaliste, ainsi que nous l'avons exposé au Chapitre 3 Développement d'un outil de simulation microscopique des routes rurales lors de l'étude sur la vitesse libre. La procédure suivante va permettre la détermination d'une accélération moyenne permettant d'approximer le comportement du conducteur par une accélération constante.

Une première distance de sécurité est déterminée avec l'accélération maximum a_n du conducteur. Le modèle est alors appliqué pour déterminer les temps δ_a et δ_b à partir de la valeur de S obtenue. Grâce au modèle d'achèvement du dépassement (cf. Abandon ou achèvement forcé du dépassement), la vitesse $v_{accomplissement}$ du véhicule dépassant au moment où le dépassement est achevé est connue. L'accélération « moyenne » entre t

et $t+\delta_{accomplissement}$ est donc $a = \frac{v_{accomplissement} - v(t)}{\delta_a - \tau}$, si v(t) est la vitesse d véhicule dépassant au temps t. Cette valeur d'accélération moyenne est réintroduite dans la formule de détermination de S, ce qui permet de réaliser une nouvelle itération du calcul de a. En répétant cette procédure jusqu'à stabiliser la valeur de a à $\varepsilon = 10^{-3}$ m/s près, on obtient une valeur de S réaliste.

L'application d'une décélération linéaire pose également problème : elle peut conduire à l'adoption irréaliste de vitesses négatives. Cependant, cette formulation idéalisée est uniquement une tentative de caractérisation d'une limite psychologique/physique S liée à l'élément véhicule/conducteur. Dans ce sens, il ne paraît pas irréaliste que le conducteur surestime la décélération effectivement disponible. Nous choisissons donc de conserver cet élément des considérations de Herman et Lam (1972) dans notre proposition de modèle.

5.2.3. Impatience de dépasser

Dès que le déplacement d'un véhicule est gêné par le véhicule précédent – selon le schéma du Chapitre 3 paragraphe Diagramme décisionnel – se crée un désir de dépasser. Ce désir est ici caractérisé par une valeur floue variant sur [0,1], l'impatience de dépasser. Chaque conducteur possède une valeur *maximale* de base i_{base}, calculée à partir de l'agressivité θ selon la formule $i_{base} = \theta - 0.5$. Cette valeur caractérise la concentration que porte un conducteur sur la manœuvre de dépassement. Plus i_{base} est élevé, plus le conducteur choisira des créneaux courts.

L'impatience varie également à chaque pas de temps, selon un terme appelé l'impatience instantanée i_t déterminée par le produite de deux facteurs :

1. les conditions de dépassement i_c ;
2. l'utilité du dépassement i_u ;

Dans les modèles classiques (SSIUEL, TWOPAS, SIMLA ++), ces facteurs sont pris en compte par un ensemble de règles booléennes. Ceci signifie que leur influence est nulle ou totale. Or, considérons les cas du dépassement d'un véhicule très lent, par exemple un véhicule agricole. Si un véhicule particulier, avec une vitesse désirée très élevée se trouve derrière, il est prêt à prendre le premier créneau disponible pour effectuer un dépassement. Si le véhicule suiveur est maintenant un poids lourd très chargé, il a une vitesse désirée légèrement plus élevée que le véhicule très lent, désire donc dépasser, mais dans des conditions lui garantissant une grande marge de sécurité. En effet, le gain du dépassement – ou l'*utilité* – sera modéré et il n'a donc pas une impatience de dépasser importante. Dans la théorie du trafic, cette conception non optimale du comportement des conducteurs est modélisée par la logique floue (cf. Stang, 1993). Cette théorie transforme la notion d'appartenance à un ensemble : classiquement, un élément d'un univers appartient à un ensemble ou non, son degré d'appartenance vaut donc 0 ou 1 ; dans la théorie de la logique floue, l'appartenance d'un élément à un ensemble peut prendre une valeur quelconque entre 0 ou 1. Dans notre cas, la situation de circulation est observée et conduit à la formulation d'une valeur i_u d'appartenance à un ensemble caractérisant une utilité du dépassement importante ainsi que d'une valeur i_c d'appartenance à un ensemble caractérisant des conditions de dépassement favorables. Lorsque une des valeurs i_k vaut 0, le dépassement est impossible, car le facteur appartient alors à un ensemble interdisant le dépassement ; lorsqu'elle vaut a contrario 1, toute l'attention du conducteur est concentrée sur le dépassement.

L'impatience s'obtient à partir de l'impatience de base i_{base} :

$$i = \sqrt[3]{i_{base} \cdot i_u \cdot i_c}$$

La Figure 5-5 montre les variations de l'impatience en fonction de l'impatience de base pour diverses valeurs de l'impatience instantanée. Elle permet de constater la propriété

essentielle du modèle : dès qu'un des trois facteurs conditionnant l'impatience est nulle, aucun dépassement n'est envisagé.

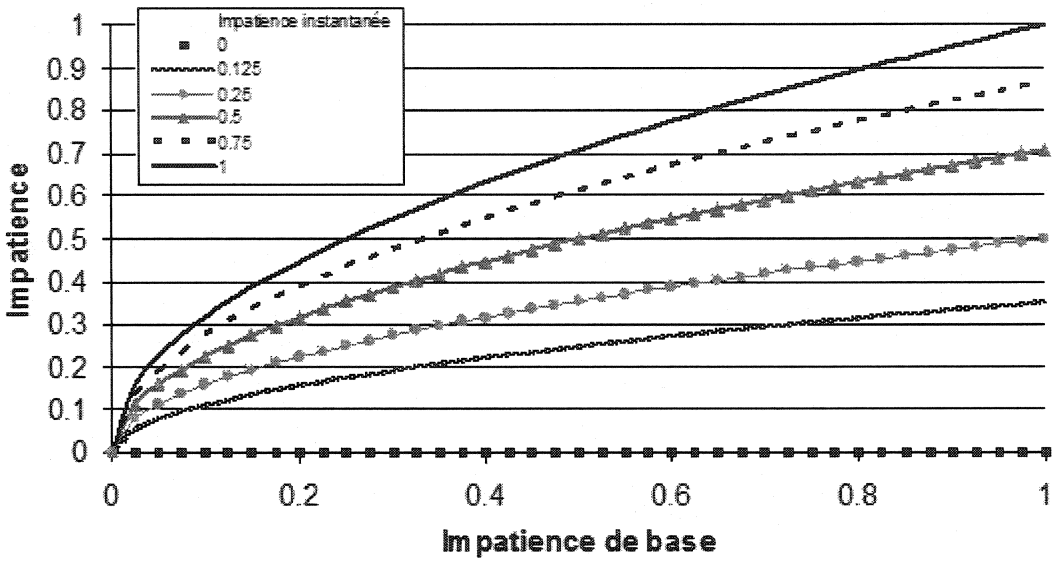


Figure 5-5 : courbe représentative de l'impatience en fonction de l'impatience de base

Chacun des facteurs est lui-même décomposé en une série de sous facteurs, caractérisés eux-mêmes par des degrés d'appartenance à des sous ensembles « situation de dépassement favorable ». Comme Troutbeck (1982) note que le créneau critique psychologique est environ le double du créneau critique physique nécessaire pour dépasser, les degrés d'appartenance en situation « normale » seront égaux à 0.5 ; ils seront nuls en situations défavorables et vaudront 1 dans des circonstances exceptionnelles. La recomposition des valeurs i_k à partir des sous facteurs utilise une moyenne géométrique. Pour mettre en place les fonctions d'appartenance (caractérisant le degré d'appartenance de chaque élément d'un univers à un ensemble), aucune théorie objective n'est disponible : il s'agit de les chercher par des méthodes heuristiques combinant l'expérience du concepteur, une analyse de sensibilité du modèle aux facteurs, une calibration par rapport à des données terrain. L'effort fourni ici constitue donc uniquement une première ébauche de construction de l'impatience, qui a été constamment réexaminée et modifiée lors de la phase de validation du

programme développé dans ce travail de recherche (cf. Chapitre 6 Implémentation d'un outil d'évaluation des dépassements).

5.2.3.1 Conditions du dépassement

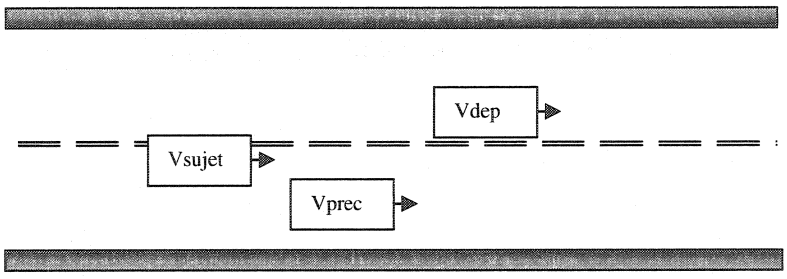
Il s'agit du confort disponible pour le dépassement *autre que le créneau disponible.* On identifie comme critères les espaces disponibles pour se rabattre après avoir complété le dépassement ainsi que la présence d'autres véhicules effectuant des dépassements dans le champ de vision (en amont, en aval).

• **Dépassement en cours** : trois cas sont à observer selon que le dépassement soit en aval, en amont ou en sens opposé.

Dépassement en aval :

La présence d'un dépassement en aval indique qu'un dépassement est possible. Si le conducteur précédent est suffisamment éloigné (distance $d_{Hermann}$), l'appartenance est maximum ; s'il est éloigné d'une valeur inférieur au créneau sécuritaire $d_{sécuritaire}$, l'impatience est nulle – le conducteur vient certainement d'achever le dépassement sur ce véhicule et entame un dépassement multiple. Le créneau sécuritaire est donné par la formule[11] :

$$d_c = \frac{V_{n-1}^2}{2}\left[\frac{1}{\hat{b}_n} - \frac{1}{b_n}\right] + \frac{3 \cdot V_{n-1}\tau}{2}$$



[11] Cf. annexe B

Figure 5-6 : dépassement en aval

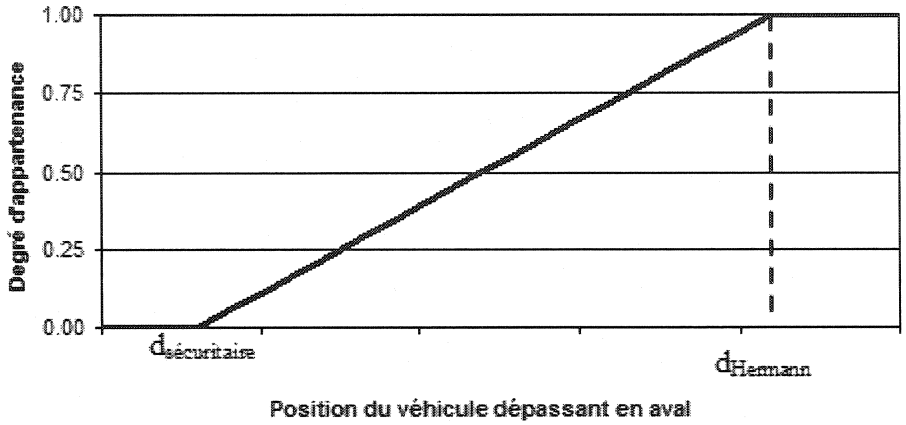


Figure 5-7 : degré d'appartenance des conditions du dépassement, présence d'un dépassement en aval

Dépassement en amont :

Cette caractéristique a un effet si un des véhicules du peloton a entamé un dépassement. Si le véhicule considéré est lui-même dépassé, l'appartenance est nulle. Elle vaut 0.5 si le dépassement ne s'effectue pas sur le véhicule considéré et vaut 1 s'il n'y a pas de dépassement en amont en vue.

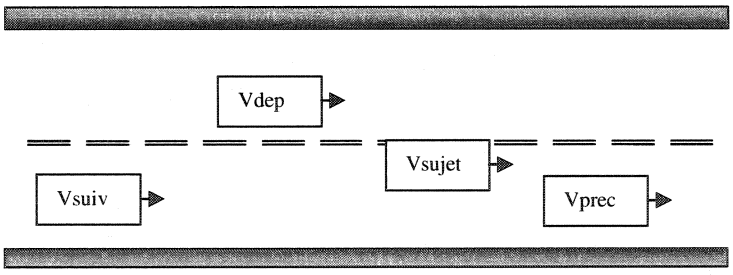


Figure 5-8 : dépassement en amont

• **Espaces disponibles pour se rabattre une fois le dépassement terminé** : si un peloton de véhicules roule avec des écarts trop restreints, il sera impossible pour le véhicule de se réinsérer dans sa voie de circulation une fois le dépassement terminé, ce qui conduit à des situations dangereuses, notamment si un dépassement doit être achevé avec un retour forcé. Cependant, le conducteur peut également envisager de dépasser tous les véhicules afin de disposer d'un créneau de rabattement confortable

correspondant à l'espace libre devant le véhicule de tête. Le dépassement durera cependant plus longtemps ; le créneau doit donc être plus important pour pouvoir réaliser cette manœuvre.

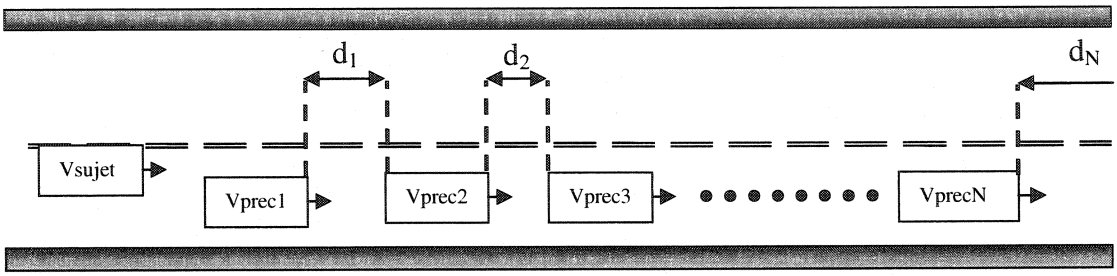


Figure 5-9 : créneau de rabattement après le dépassement

Ce comportement est modélisé selon l'optique suivante (la description se réfère à la Figure 5-9) :

1. Le conducteur examine le dépassement de chaque véhicule v_{preci} du peloton : il détermine pour chaque un degré d'appartenance i_r correspondant à la combinaison de l'espace disponible d_i pour se rabattre devant ce véhicule et du nombre total de véhicules à dépasser. Cette combinaison s'effectue sous la forme d'un produit des degrés d'appartenance correspondant à chacun des deux facteurs.

2. La fonction d'appartenance du créneau de rabattement est parabolique. Elle vaut 0 si l'écart est inférieur ou égal à d_c (créneau sécuritaire), a une pente initiale nulle, et vaut 1 dès que l'écart correspond à l'espace nécessaire d_n pour que le véhicule se positionne entre les deux sans gêner le véhicule dépassé et avec un écart sécuritaire par rapport au futur véhicule précédent.

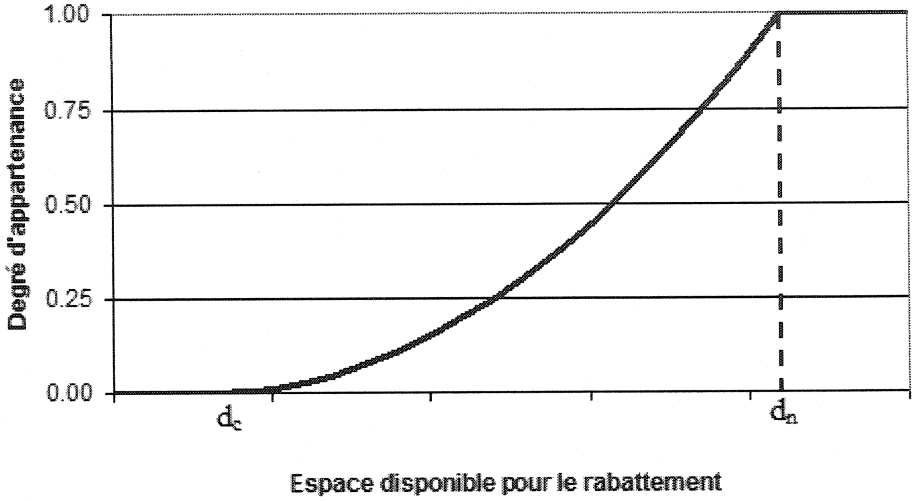


Figure 5-10 : degré d'appartenance du rabattement après le dépassement

3. La fonction d'appartenance i_N du nombre N de véhicule à dépasser prend des valeurs discrètes selon la formule $i_N = 0.25^{N-1}$. Plus le véhicule est avancé dans le peloton, meilleures sont les conditions de dépassement.
4. La situation donnant la valeur maximale d'impatience i_r est choisie.

L'espace disponible pour se rabattre en cas d'abandon du dépassement n'est pas observé, étant donné que les conducteurs ne pensent initialement pas à l'abandon.

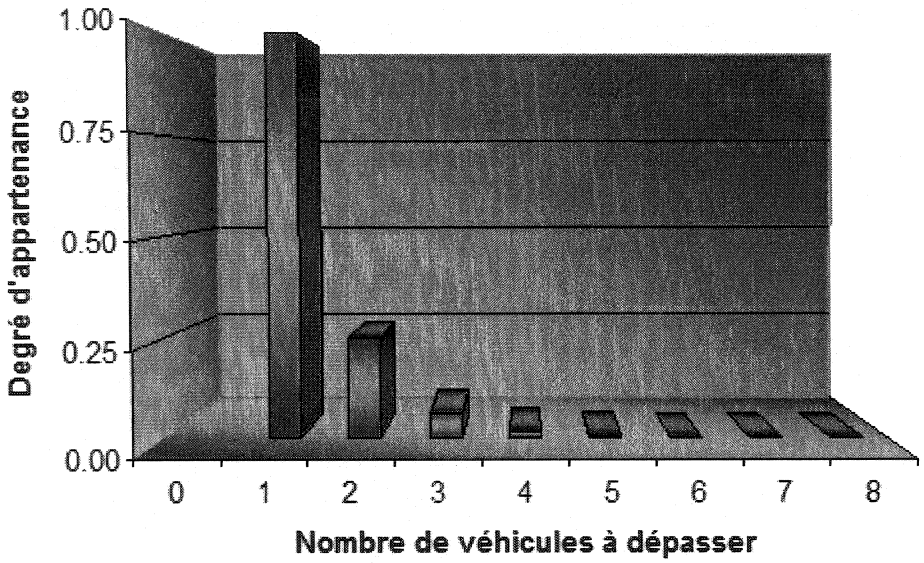


Figure 5-11 : degré d'appartenance du nombre de véhicules à dépasser

5.2.3.2 Utilité du dépassement

Lorsqu'un véhicule se retrouve piégé derrière un véhicule lent, l'utilité du dépassement augmente croît avec le temps passé à suivre et la différence entre la vitesse du véhicule lent et la vitesse désirée du véhicule suiveur. Il a été également supposé que la position dans le peloton jouait également un rôle dans ce facteur, mais les tests lors des simulations ont abouti à renoncer à ce paramètre.

- **Attente derrière un peloton de véhicules** :

Ce paramètre n'a pour l'instant pas été observé. Le comportement suivant est supposé :

- L'appartenance est initialement normale ;
- À partir d'un certain seuil t_1, elle augmente linéairement jusqu'à 1. t_1 correspond au moment à partir duquel le véhicule suit le véhicule précédent à la même vitesse.

- t_2 est atteint à la fin de la zone de dépassement. Lorsque la prochaine zone de dépassement sera atteinte, le désir sera maximal. t_2 n'est initialement pas connu. Il est estimé à partir de la vitesse du véhicule précédent, supposée constante jusqu'à la fin de la zone de dépassement.

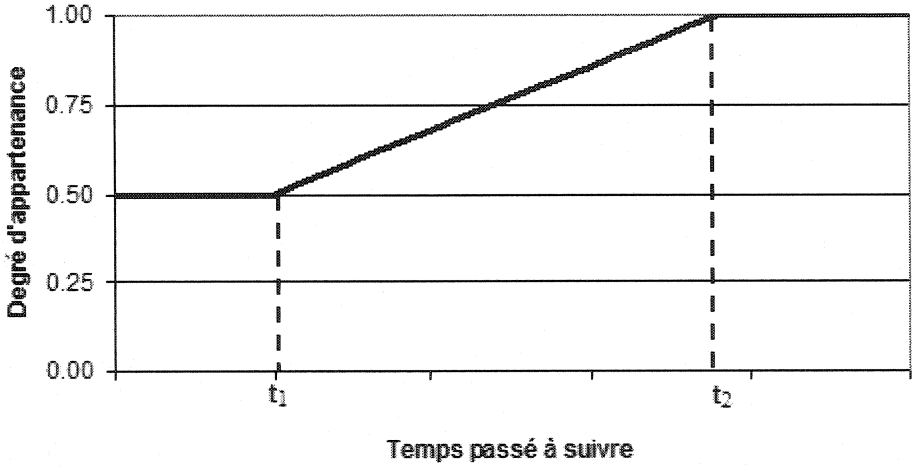


Figure 5-12 : degré d'appartenance du temps passé à suivre un véhicule lent

- **Différence entre la vitesse désirée et la vitesse du véhicule précédent** :

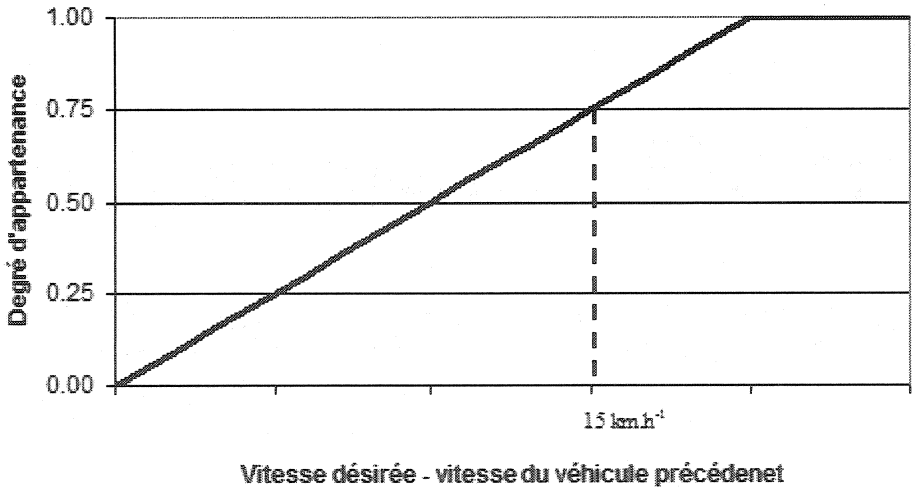


Figure 5-13 : degré d'appartenance de la différence entre la vitesse désirée et la vitesse du véhicule précédent

Le degré d'appartenance varie linéairement à partir d'une valeur nulle lorsque la différence de vitesse est nulle. La norme indique qu'il y a volonté de dépassement lorsque la vitesse désirée du conducteur est supérieure de 15 km/h à la vitesse pratiquée par le véhicule dépassé. Cette limite est considérée comme ayant une appartenance de 0.75.

5.2.3.3 Effet du trafic

Le trafic visible a un effet important sur les objectifs de conduite. Du fait des informations perçues, celui-ci est estimé comme le nombre de véhicules visibles devant et derrière sur la distance totale.

- **Trafic en sens opposé** : lorsque le débit dans le sens opposé est important, peu d'opportunités de dépassement se présentent. Le conducteur a donc tendance à accepter des créneaux plus courts.

- **Trafic dans le sens de circulation :** lorsque le débit dans le sens de circulation est important, il est peu intéressant de dépasser, car la probabilité d'être à nouveau ralenti après le dépassement est forte.

Ce facteur dépend de la densité perçue et estimée par l'usager et de seuils personnels à partir desquels il estime le trafic important. La complexité du problème nous incite pour l'instant à ne pas tenir compte de ce facteur.

5.2.4. Cas pour lesquels la manœuvre de dépassement est impossible

- Lorsque le véhicule se trouve sur une zone de non dépassement, le changement de voie est interdit. Les conducteurs peuvent néanmoins se préparer avant l'arrivée sur la zone de dépassement à dépasser. De fait, observons un véhicule approchant une zone de dépassement. Dès que celui-ci l'aperçoit, il commence à observer la possibilité d'un dépassement et à adapter sa vitesse pour pouvoir l'entamer dans les meilleures conditions possibles. La réaction dépend de la situation par rapport au véhicule précédent. Le véhicule devrait accélérer pour se

trouver à l'écart intervéhiculaire pré dépassement à l'entrée sur la zone de dépassement. Pour l'instant, nous considérons que le conducteur opte pour cette stratégie un pas de temps avant de commencer son dépassement.

- Si le véhicule précédent (situé dans la voie de circulation) a entamé un dépassement mais n'a pas encore changé de voie, le véhicule détecte cette manœuvre grâce à l'accélération du véhicule et éventuellement aux indicateurs de changement de voie. Dans ce cas, il n'entame pas de processus de dépassement, mais attend que le véhicule précédent ait entamé sa manoeuvre.

5.3. Comportement lors du dépassement

La manœuvre de dépassement peut être décrite en trois étapes :

1. Réalisation du dépassement lorsque le dépassement n'est pas dangereux. Cette étape est effectuée lorsque le créneau de dépassement encore disponible est supérieur à d_{Herman}.
2. Abandon ou achèvement du dépassement : lorsque le créneau disponible devient inférieur à d_{Herman}, le conducteur prend conscience du danger du dépassement. Si $x > x_{achèvement}$ le dépassement se poursuit, mais le retour est forcé. Dans le cas contraire, si $x < x_{abandon}$ le dépassement est abandonné.
3. Si $x_{abandon} < x < x_{achèvement}$ le véhicule se trouve dans une zone d'indécision. Le véhicule poursuit le dépassement avec un retour forcé, mais le véhicule opposé est contraint de coopérer.

5.3.1. Dépassement « libre »

Le modèle de voiture libre (cf. Chapitre 3 Modèle de voiture libre) est utilisé, soit :

$$\begin{cases} v_n(t+\tau) = v_n(t) + \tau \cdot \min\left[2.5 \cdot a_n \cdot \left(1 - \frac{u_n(t)}{u_d}\right) \sqrt{0.025 + \frac{u_n(t)}{u_d}} \;;\; \frac{F_i(t) - R_i(t)}{M} \right] \\ u_n(t) = v_n(t) - v_0 \end{cases}$$

avec

v_0 : vitesse initiale de la manœuvre de dépassement (m/s)

a_n: accélération maximum qu'un conducteur peut accepter en situation de dépassement (m/s^2)

$U_d = V_d - V_0$

V_d: vitesse à laquelle le conducteur n désire dépasser (m/s)

τ : temps de réaction (valeur constante de 2/3 s);

$F_i(t)$: force de traction au temps t (N);

$R_i(t)$: force de résistance au temps t (N);

M : masse du véhicule (kg);

La vitesse désirée de dépassement correspond au maximum de la vitesse désirée du conducteur V_d en situation de conduite normale et d'une vitesse relative de dépassement minimum ΔV_{dep} ; donc $U_d = \max\left[(V_d - V_0), v_{n-1}(t) + \Delta V_{dep}\right]$

Si un véhicule précédent effectue un dépassement, le modèle de voiture suiveuse (cf. Chapitre 3 Modèle de voiture suiveuse) est appliqué sur ce véhicule, afin de vérifier quelle vitesse maximum peut être employée.

$$v_n(t+\tau) = b_n\tau + \sqrt{(b_n\tau)^2 - b_n \cdot \left[2 \cdot \left(x_{n-1}(t) - S_{n-1} - x_n(t) \right) - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}_n} \right]}$$

b_n : décélération maximum que le conducteur n peut accepter (m/s^2);

S_{n-1} : somme de la taille effective du véhicule n-1 et de l'espace intervéhiculaire à l'arrêt (m);

τ : temps de réaction (valeur constante de 2/3 s);

$\hat{b}_n$: décélération maximale supposée du véhicule précédent (m/s^2).

5.3.2. Abandon ou achèvement forcé du dépassement

- L'achèvement du dépassement est modélisé par une utilisation du moteur au maximum de ses performances : $v_n(t+\tau) = v_n(t) + \frac{F_i(t) - R_i(t)}{M}$

- L'abandon du dépassement dépend de la situation.
  - Si le conducteur est encore dans sa voie de circulation, le modèle sécuritaire de Gipps est appliqué au véhicule qu'il désirait dépasser.

$$\begin{cases} v_n(t+\tau) = \min \left[\begin{array}{l} v_n(t) + 2.5 \cdot a_n \cdot \tau \cdot \left(1 - \frac{u_n(t)}{u_d}\right) \sqrt{0.025 + \frac{u_n(t)}{u_d}} \\ v_n(t) + \tau \cdot \frac{F_i(t) - R_i(t)}{M} \\ b_n \tau + \sqrt{(b_n \tau)^2 - b_n \cdot \left[2 \cdot \left(x_{n-1}(t) - S_{n-1} - x_n(t) \right) - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}_n} \right]} \end{array} \right] \\ u_n(t) = v_n(t) - v_0 \end{cases}$$

v_0 : vitesse initiale lors de la décision d'abandonner le dépassement (m/s)

a_n: accélération maximum qu'un conducteur peut accepter (m/s^2)

$U_d = V_d - V_0$

V_d: vitesse à laquelle le conducteur n désire rouler (m/s)

$F_i(t)$: force de traction au temps t (N);

$R_i(t)$: force de résistance au temps t (N);

M : masse du véhicule (kg);

b_n : décélération maximum que le conducteur n peut accepter (m/s^2);

S_{n-1} : somme de la taille effective du véhicule n-1 et de l'espace intervéhiculaire à l'arrêt (m);

τ : temps de réaction (valeur constante de 2/3 s);

$\hat{b}_n$: décélération maximale supposée du véhicule précédent (m/s^2).

- Si le conducteur n'est plus dans sa voie de circulation, il utilise une décélération constante (appui supposé immédiat sur la pédale de frein) correspondant à la valeur maximum individuelle b_n.

5.3.3. Coopération du véhicule opposé

S'il se présente une zone d'indécision, un accident de circulation semble inévitable. En situation de conduite réelle, plusieurs manœuvres sont envisageables :

1. Les véhicules opposé et dépassé se déportent sur le bord de la route – éventuellement sur les accotements – pour que les trois véhicules puissent rouler côte à côte sans collision.
2. Le véhicule dépassant accélère pour compléter son dépassement, tandis que les véhicules dépassé et opposé freinent pour l'aider à compléter sa manœuvre.

Seul le deuxième cas est représenté dans la simulation, pour lequel on considère que seul le véhicule opposé réagit. Celui-ci n'étant pas capable de déterminer toute la complexité de la situation, il s'adapte donc à l'urgence en freinant brutalement. Le déplacement s'effectue de telle sorte qu'il n'y ait pas collision lorsque le conducteur dépassant atteint la position d'aboutissement du dépassement.

Ceci est traduit mathématiquement comme suit, pour un véhicule dépassant de vitesse v_{dep} et de position x_{dep}, un véhicule dépassé de vitesse v et de position x et un véhicule opposé de vitesse v_{opp} et de position x_{opp} :

- Calcul de l'instant T auquel le véhicule dépassant atteint la position x_{dep} d'aboutissement du dépassement : résolution de l'équation

$$x_{dep}(T) = x(T) + S_{av}$$

$$avec\ \forall t \in [0,T]$$

$$\begin{cases} v_{dep}(t+\tau) = v_{dep}(t) + \tau \dfrac{F_i(t) - R_i(t)}{M} \\ v(t) = v(0) \end{cases}$$

Où S_{av} est l'espace intervéhiculaire séparant le véhicule dépassant et le véhicule dépassé à la fin du dépassement. Cette résolution est effectuée en calculant la position à t jusqu'à l'obtention d'une valeur supérieure à $x(T)+S_{av}$. Une interpolation linéaire entre t et $t-\tau$ permet de déterminer T.

- À T la condition suivante dicte la décélération du véhicule opposé :

$$x_{opp}(T) - x_{dep}(T) > x_n(T) - x_{dep}(T)$$
$$\Leftrightarrow$$
$$x_{opp}(T) > S_{av}$$

On considère que le véhicule opposé freine uniformément, avec une valeur maximale b_n, ce qui donne une décélération $b(t+\tau)$ en valeur absolue :

$$b(t+\tau) \geq 2 \cdot \frac{S_{av} + d_{ms} - x_{opp}(t) + \left(v_{opp}(t) + v_{dep}(t)\right)\tau}{(T-\tau)^2}$$

$$b(t+\tau) \leq b_n$$

Le véhicule freine jusqu'à ce que le dépassement soit achevé ou que sa vitesse soit nulle. d_{ms} est la marge de sécurité choisie. D'après SSIUEL, cette valeur vaut entre 30 et 150 mètres. Comme il s'agit d'une situation de danger extrême, et non d'un cas représentatif d'un dépassement moyen, une marge de sécurité nulle décrit correctement la situation.

En outre, un mécanisme d'aide à la réinsertion du conducteur dépassant par une réaction appropriée du véhicule dépassé a été introduit au Chapitre 3 Développement d'un outil de simulation microscopique des routes rurales. Par conséquent, la marge de sécurité sera atteinte à travers la réaction du conducteur dépassé, non prise en compte par le véhicule opposé dans sa réaction.

5.4. Décision de changer de voie

Trois situations se présentent pour lesquelles une manœuvre de changement de voie est nécessaire :

1. Initiation du dépassement ;
2. Abandon du dépassement ;
3. Achèvement du dépassement.

Cette tâche présente quelques analogies à celle du changement de voie sur autoroute ou voies urbaines. La décision de changer de voie correspond effectivement à une amélioration de la situation de conduite pour éviter un danger (rabattement après l'abandon ou l'achèvement d'un dépassement) ou augmenter sa vitesse (initiation d'un dépassement). Gipps (1986) propose un cadre méthodologique basé sur trois questions, posées en ordre hiérarchique :

- **Est-il nécessaire de changer de voie ?**
- **Est-il désirable de changer de voie ?**
- **Est-il possible de changer de voie ?**

Considérons que le véhicule précédent roule à vitesse constante. Par rapport à ce véhicule, deux distances prennent une importance cruciale :

1. La distance d_c à laquelle roulerait le véhicule suivant en tenant compte de ses capacités de décélération. La formule[12] de voiture suiveuse de Gipps permet d'obtenir :

$$d_c = \frac{V_{n-1}^2}{2}\left[\frac{1}{\hat{b}_n} - \frac{1}{b_n}\right] + \frac{3 \cdot V_{n-1}\tau}{2}$$

2. La distance d_f[13] à partir de laquelle le véhicule précédent exerce une influence sur le véhicule suivant, si celui-ci roule à une vitesse V :

---

[12] Cf. annexe B

$$d_f = \frac{1}{2}\left[\frac{V_{n-1}^2}{\hat{b}_n} - \frac{V_n^2}{b_n}\right] + \frac{3 \cdot V_n \tau}{2}$$

Les valeurs de d_f et de d_c conditionnent au même titre que d_{herman} les domaines de nécessité, désirabilité et possibilité de changement de voie.

5.4.1. Initiation du dépassement

Lorsqu'un véhicule entre dans le domaine d_f derrière le véhicule précédent, il observe si un dépassement est possible. Dans le cas positif, le conducteur procède dans un premier temps à une accélération dans sa propre voie ; il juge en effet que cette manœuvre est moins dangereuse que de se positionner immédiatement dans la voie opposée. Il devient nécessaire de changer de voie au moment où une collision avec le véhicule précédent – dans le cas d'un abandon du dépassement ou lors de la manœuvre de changement de voie – ne peut être évitée.

Le moment du changement de voie est conditionné par :

1. le temps de réalisation de la manœuvre :

Si le véhicule est situé devant le véhicule dépassé à la fin de la manœuvre de changement de voie, une collision s'est produite entre les deux véhicules. L'approche de SSIUEL est adoptée. La manœuvre est effectuée sur une courbe sinusoïdale ; le temps requis pour effectuer le changement de voie est $T_{ch} = \pi\left(\frac{L}{a_n}\right)^{0.5}$, où L représente la moitié de la largeur de la route et a_n l'accélération du véhicule.

Soit d_{ch} l'écart entre les deux véhicules à la fin de la manœuvre et d_0 l'écart initial, on a : $d_{ch} = d_0 + x_{n-1}(T_{ch}) - x_n(T_{ch})$

---

[13] Cf. annexe B

On considère une marge de manœuvre d_m égale à trois fois l'écart à l'arrêt (SSIUEL). Le changement de voie est effectué dès que $d_{ch} > d_m$. Le déplacement du véhicule dépassé est déterminé en considérant une vitesse constante ; le déplacement du véhicule dépassant est déterminé par un modèle d'accélération libre, par une approximation numérique similaire à celle développée pour le calcul de d_{Herman}. Une première valeur de T_{ch} est calculée pour l'accélération maximum. La position du véhicule au temps t + T_{ch} permet de reconstituer l'accélération moyenne, à partir de laquelle une nouvelle valeur de T_{ch} est obtenue. Ce procédé itératif converge finalement vers la valeur de T_{ch} effective.

2. la distance de sécurité :

Le véhicule change de voie avant d'être situé trop proche du véhicule précédent pour éviter une collision. SSIUEL modélise en détail cette situation, distinguant les cas où le véhicule précédent freine ou maintient une vitesse constante. Cette représentation est très complexe, car elle nécessite de connaître le mouvement des deux véhicules sur une durée de temps importante. Or, les mouvements des deux véhicules sont par nature imprévisibles. On considère par conséquent la distance d_c comme limite psychologique critique correspondant à la perte de la sensation de sécurité. Si le conducteur estime qu'en considérant sa manœuvre d'accélération au pas de temps $t+\tau$, il se rapproche à une distance inférieure à d_c, il change de voie.

5.4.2. Abandon du dépassement

L'abandon du dépassement est une manœuvre effectuée lorsqu'un danger de collision avec le véhicule opposé se présente. Elle présente un caractère d'urgence, et le conducteur se réinsère donc dès que possible :

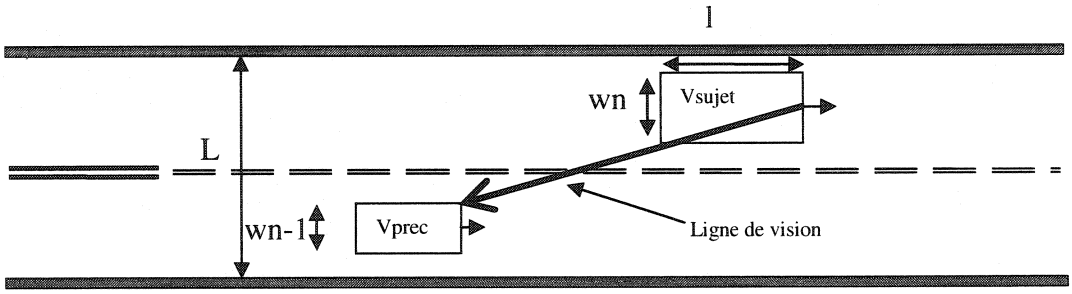
- Le véhicule abandonnant le dépassement doit être situé derrière le véhicule dépassé, afin de pouvoir constater que le changement de voie est possible ;

- Le véhicule doit être suffisamment éloigné pour ne pas percuter le véhicule précédent après le changement de voie. Une distance minimale de d_c doit donc être disponible.

5.4.3. Achèvement du dépassement

Le conducteur constate que le dépassement est terminé lorsqu'il aperçoit le conducteur opposé dans le rétroviseur à une distance d_{retro} (m). Soit l (m) la longueur du véhicule dépassant, w_n (m) sa largeur, w_{n-1} (m) la largeur du véhicule dépassé et L (m) la largeur de la route. On suppose que les véhicules circulent au milieu de la voie de circulation. Le schéma suivant illustre la situation.

Tableau 5-1 : détection du véhicule suivant dans le rétroviseur



Des considérations géométriques permettent d'obtenir la relation

$$d_{retro} = 2 \cdot \frac{\left(L - \frac{w_{n-1}}{2}\right)}{w_n} \cdot l$$

Si le dépassement est terminé, plusieurs situations se présentent :

- Le dépassement est en cours d'achèvement avec retour forcé par l'apparition d'un véhicule en sens opposé dans la distance d_{Herman}. Dans ce cas, le retour est immédiat ;
- Sinon, un dépassement multiple est envisagé. L'impatience de dépasser que le conducteur aurait s'il se trouvait dans sa voie de circulation est

déterminée. Si celle-ci est non nulle, alors un dépassement multiple est entamé, dans le cas où la distance d_{Herman} est encore disponible.

- Si un dépassement multiple est sélectionné, une nouvelle manœuvre de dépassement est entamée;
- Sinon, le véhicule vérifie tout d'abord s'il est à une distance d_f du conducteur précédent.
  - Dans le cas négatif, il se réinsère
  - Dans le cas positif, il vérifie qu'il est possible de se réinsérer sans gêner le conducteur dépassé (c'est-à-dire si celui-ci se trouve à une distance d_f)
    - Dans le cas positif, il se réinsère
    - Dans le cas négatif, il continue le dépassement

5.5. Synthèse du modèle

Le modèle décrit ci-dessus a été conçu dans le but de créer un cadre général de compréhension du phénomène de dépassement. Les deux phases, dynamique et décision, ont été étudiées dans une perspective sécuritaire. Cependant, si le modèle construit ainsi n'est pas adapté du point de vue décisionnel, il est possible de greffer des comportements particuliers en jouant sur la fonction d'impatience, qui n'est ici comprise que très partiellement. En ce qui concerne la dynamique, le processus de changement de voie pourrait être inséré. Il s'agit d'une piste de recherche qui mérite l'attention, car la perte de distance occasionnée par le fait que le changement n'est pas instantané peut créer dans le cas de créneaux trop courts des situations de conflits. En outre, une attention devrait être portée sur les interdistances qui sont sélectionnées entre les divers véhicules lors du processus.

Il faut également noter que ce modèle ne prétend pas décrire le déplacement en milieu rural dans toutes ses facettes. Notamment, la problématique des carrefours n'est pas abordée.

Chapitre 6. Implémentation d'un outil d'évaluation des dépassements

Dans les précédents paragraphes, un modèle permettant la simulation d'un trafic sur une route rurale a été conçu. Le précédent chapitre expose comment cette simulation a été implémentée en un programme orienté objet (en langage C++). La modélisation microscopique décrivant en détail les comportements des éléments véhicule/conducteurs (EVC), l'effort de programmation a été principalement consacré à la mise en place d'une structure décrivant la génération, les prises de décision et les actions de ces EVC. Pour les besoins de validation et de premières exploitations de la modélisation, un module unique, permettant de gérer une file de véhicules, et donc de simuler une route rurale, a également été réalisé.

Le programme est conçu comme un outil de recherche et n'a donc pas fait l'objet de développement d'interfaces utilisateur. Il n'est donc pas possible de développer à ce stade un manuel d'utilisateur. Par contre, conçu comme un premier développement d'outil d'analyse, la documentation du programme permet à un programmeur de rapidement identifier comment il peut utiliser le travail de programmation effectué, où et comment il doit intervenir pour apporter des modifications, effectuer des ajouts ou concevoir une utilisation distincte du modèle de conducteur. En outre, ses choix doivent être éclairés par une compréhension des problèmes de circulation sur route rurale.

Suite à ces réflexions, le présent chapitre décrit le programme selon trois axes :

- Variables d'entrée : types, valeurs de base, principes de calibration ;
- Structure du programme : schéma de principe, définition des relations entre les objets principaux ;
- Variables de sortie : format, exploitation.

6.1. Variables d'entrée

Ce paragraphe décrit quelles données sont nécessaires pour faire fonctionner le programme de manière *réaliste* – i.e. avec des paramètres de comportement correspondant à des valeurs spécifiques à une situation et non à des valeurs données par défaut. Les problématiques d'obtention de données reliées à chaque élément de la simulation routière (route, véhicule, conducteur) sont décrites selon trois angles :

1. paramètres à calibrer et influence sur la modélisation ;
2. mode d'obtention des paramètres ;
3. données utilisées pour la validation.

6.1.1. Section de route

Le modèle ne traite pas les routes rurales possédant des voies de dépassement ; de même, les points d'intersection entre deux routes rurales à débits importants ne peuvent être représentés – le modèle suppose en fait qu'aucun accès n'est situé sur la section de route.

La géométrie routière est généralement caractérisée par le profil en long, le tracé en plan et le profil en travers. Les données de marquage et l'état de la chaussée complètent la description. Les paramètres que requiert le modèle sont :

1. La longueur de la section de route étudiée, qui peut par exemple être mesurée à l'aide de relevés d'odomètres de précision ou déterminée à partir de données de conception routière ;
2. Profil en long : la connaissance du profil en long est nécessaire pour le calcul des vitesses en situation de conduite libre et le calcul de la distance de visibilité, via un vecteur de coordonnées ($chaînage_i$, z_i, $pente_i$) discrétisant la suite d'éléments géométriques (droite, parabole). Ce vecteur peut être obtenu :
   - par relevés GPS (X_i, Y_i, Z_i) :

a. $\text{chaînage}_0 = 0.0$; $\text{chaînage}_i = \text{chaînage}_{i-1} + \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2}$;

b. $z_i = Z_i$;

c. $\text{pente}_i = \dfrac{Z_{i+1} - Z_i}{chainage_{i+1} - chainage_i}$

- par une procédure de discrétisation à partir des données de conception de la route (pente des droites, longueurs et pente de début et de fin des paraboles, chaînage de début et de fin des éléments) – cf. annexe E.

Plus le pas de discrétisation Δchaînage est fin, plus la précision est importante.

3. Tracé en plan : le modèle n'intègre pour l'instant pas l'effet des courbes sur les vitesses désirées. Si cet effet devait être intégré, les données nécessaires porteraient principalement sur les localisations des clothoïdes et des courbes. Pour le calcul de la distance de visibilité, un relevé GPS de points situés sur l'axe central, *pris aux mêmes chaînages que le profil en long* est suffisant, tel que décrit dans l'annexe D.

4. Profil en travers : l'algorithme de calcul de la distance de visibilité suppose actuellement un accotement de largeur 3 mètres et un dévers nul. Même si l'approximation semble satisfaisante, une évolution du modèle prendra en compte ces facteurs. Les dévers peuvent être calculés à partir des normes de conception routière. La largeur de l'accotement peut être obtenue par un relevé à l'odomètre des positions où sa valeur change. La largeur est obtenue à la chaîne. Enfin, la largeur de la route influence la manœuvre de changement de voie. Elle peut être obtenue de manière similaire à la largeur de l'accotement. Le modèle suppose une route de largeur 7 mètres.

5. Les données de marquage sont nécessaires pour l'étude de la situation existante. Elles peuvent être relevées grâce à un odomètre. Il s'agit de connaître le début et la fin des zones de dépassement dans les deux sens de circulation. Nous

avons utilisé un tel procédé. Les zones peuvent également être déterminées à partir de modèles de conception des routes et de la distance de visibilité calculée.

Pour l'application du programme, la section 101-04-33 de la route 101 en Abitibi-Témiscamingue a été sélectionnée. Les données du profil en long et du tracé en plan sont décrites au Chapitre 4 Créneaux de dépassement offerts. Les zones de dépassement dans chaque sens sont recensées dans le Tableau 6-1 en fonction du chaînage dans le sens croissant.

Tableau 6-1 : zones de dépassement sur le RTSC 101-04-33

	Chaînage de début de zone de dépassement	Chaînage de fin de zone de dépassement
sens Sud-Nord	493	697
	1026	1191
	1990	2255
	3630	3831
	4049	4322
	4622	4923
sens Nord-Sud	1292	1515
	2255	2520
	3708	4219
	4322	4622
	4923	5250

Le coefficient de roulement C_r et le coefficient de friction entre la chaussée et les pneus μ sont obtenus à partir du tableau suivant, extrait de (Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde, 2001), cette référence étant la base de compréhension des capacités d'accélération en pente développée au Chapitre 3.

Tableau 6-2 : caractéristiques de la surface de la route, extrait de (Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde, 2001)

TABLE 3. Road Surface Coefficients [Derived from Fitch (1994)]

	Rolling Coefficients		Friction
Pavement type	Pavement condition	C_r	coefficients
Concrete	Excellent	1.00	0.80
Concrete	Good	1.50	0.70
Concrete	Poor	2.00	0.60
Asphalt	Good	1.25	0.60
Asphalt	Fair	1.75	0.50
Asphalt	Poor	2.25	0.40
Macadam	Good	1.50	0.55
Macadam	Fair	2.25	0.45
Macadam	Poor	3.75	0.35
Cobbles	Ordinary	5.50	0.50
Cobbles	Poor	8.50	0.40
Snow	5.08 cm (2 in.)	2.50	0.20
Snow	10.16 cm (4 in.)	3.75	0.15
Dirt	Smooth	2.50	0.30
Dirt	Sandy	3.75	0.20
Mud		3.75–15.0	0.15
Sand	Level soft	6.0–15.0	0.15
Sand	Dune	16.0–30.0	0.10

Nous choisissons une route en béton, avec un pavement en conditions excellentes.

6.1.2. Véhicules

La classification des types de véhicules est la première étape. Chaque classe devrait être composée de véhicules ayant certaines caractéristiques homogènes – qui pourraient être définies selon les normes techniques sur les véhicules (cf. Ministère des transports du Québec, 2003). Il s'agit alors de procéder à un relevé terrain permettant de détecter la proportion de chaque type de véhicule. Ceci est « théoriquement » possible à partir des progrès des capteurs de détection des véhicules, qui sont capables de déceler la signature d'une certaine classe de véhicule. En l'absence de données détaillées de ce

type, 2 classes « génériques » de véhicules sont utilisées dans le modèle : véhicules particuliers et poids lourds.

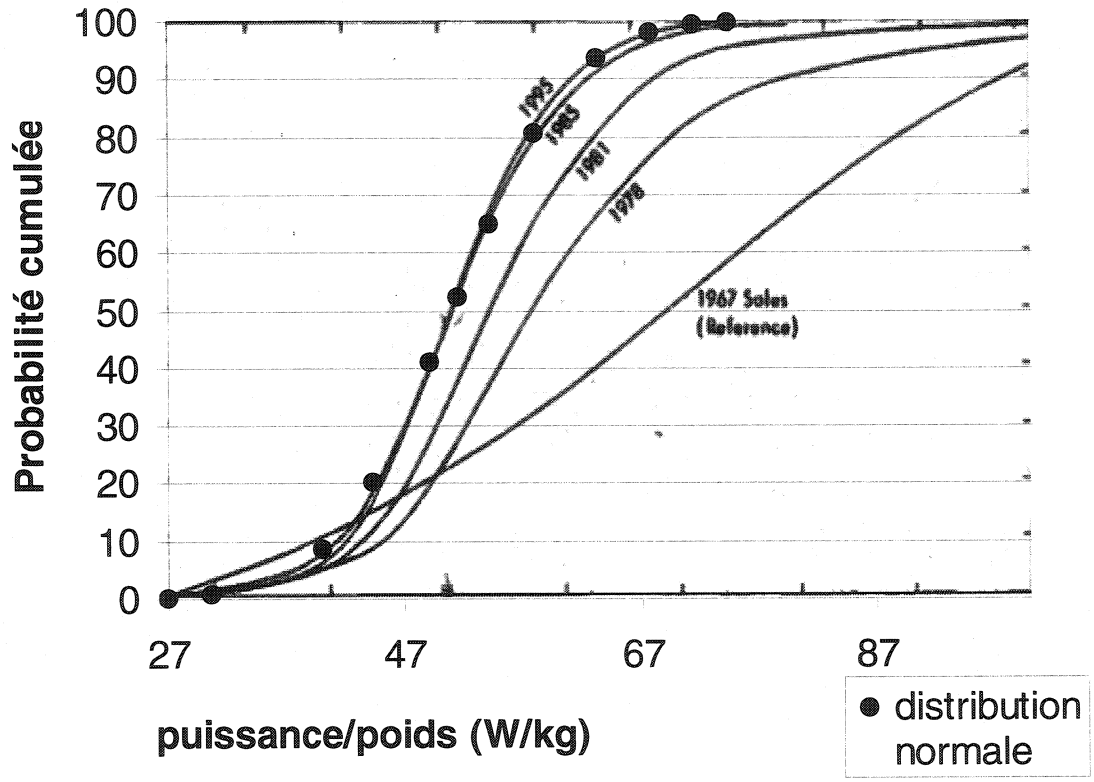


Figure 6-1 : distribution du rapport puissance/poids pour les véhicules particuliers, extrait de Traffic Engineering Handbook, 1999

Une classification ultérieure a été effectuée : elle correspond aux capacités dynamiques du véhicule. Nous considérons que parmi les poids lourds se trouvent deux « sous-classes » correspondant à des rapports poids puissance de 120 kg/kW et de 180 kg/kW. On estime qu'il n'y a pas de variabilité de puissance au sein de cette classe et que la proportion de chaque classe est de 50 %. Si le modèle est cependant détaillé tel que précédemment (c'est-à-dire que tous les types de véhicules de la norme sont insérés dans le modèle), cette distinction n'est pas nécessaire. Il s'agit cependant de déterminer une distribution du rapport poids puissance pour certains types de véhicules pour lesquels la variabilité de cette propriété est importante (véhicules particuliers). La

distribution à l'échelle régionale de cette donnée est satisfaisante, sauf dans des cas particuliers, pour lesquels la composition du trafic sort de l'ordinaire (sortie d'usine, trafic international), ce qui impose d'effectuer des sondages « terrain ».

Tableau 6-3 : coefficients dynamiques et géométrie** des véhicules*

Type[14] / Variable	Véhicule particulier (type CAR)	Poids lourd, 120 kg/kW (type SU)	Poids lourd, 180 kg/kW (type TST)
C_d[15]	0.4	0.5	0.5
η[16]	Loi normale de moyenne 0.915 et d'écart type 0.07		
C_{tv}[16]	0.0438.V+6.1		
M (kg)[15]et[16]	1500	Loi normale entre 5000 (à vide) et 35000	Loi normale entre 10000 (à vide) et 50000
M_{ta}[16](10^3 kg)	45 % M	25 % M	15 % M
L (m)[14]	5.8	9.1	20.6
W (m)[14]	2.1	2.6	2.6
H (m)[14]	1.3	4.1	4.1
A (m^2)≈ HW	2.73	10.66	10.66

(*) : C_d, coefficient de dragage aérodynamique ; η efficacité du moteur ; C_{tv}, coefficient de résistance au roulement ;

(**) : M, masse du véhicule ; M_{ta}, Masse sur l'axe avant ; L, longueur du véhicule ; W, largeur du véhicule ; H, hauteur du véhicule ; A, aire frontale du véhicule

La distribution des rapports poids puissance des véhicules particuliers est déterminée à partir du Traffic Engineering Handbook (1999). Il s'agit d'une population normale de

---

[14] MTQ (1994)

[15] Basé sur Traffic Engineering Handbook (1999)

[16] Basé sur (Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde, 2001)

moyenne 51.04 W/kg et d'écart type 8.05 W/kg à un niveau de confiance de 95%, tel que présenté sur la Figure 6-1.

Les autres caractéristiques dynamiques sont le coefficient de dragage aérodynamique C_d, l'efficacité de transmission de la puissance η et le coefficient de résistance au roulement due à l'interface pneus/chaussée C_{tv}. Les coefficients de (Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde, 2001) et de Traffic Engineering Handbook (1999) sont utilisés ; le Tableau 6-3 reprend les caractéristiques choisies, pour chaque classe de véhicule.

La géométrie des différentes classes de véhicules (et la variabilité de cette géométrie a sein de la classe) est très complexe à obtenir par des relevés sur le terrain. Les capteurs à boucle permettent par exemple uniquement d'obtenir des données sur la distance entre les essieux et les capteurs magnétiques sont très peu précis. Il est suggéré de procéder soit à partir d'un véhicule type, lorsque la variabilité des caractéristiques est faible au sein de la population de la classe (poids lourds), soit à partir de données « nationales » (véhicules particuliers) ou encore à partir d'un sondage sur le terrain. Les données de géométrie à collecter sont : masse du véhicule M, masse sur l'axe avant M_{ta}, longueur L, largeur W et aire frontale A. Ces données servent aux modèles de dynamique et de prise de décision. En outre, la hauteur du véhicule H doit être connue pour le calcul de la visibilité. Pour la validation, nous avons opté pour des caractéristiques fixes issues de la norme de conception routière – MTQ (1994). Lorsque les données n'étaient pas suffisantes (masse du véhicule, masse sur l'axe avant), nous nous sommes appuyés sur (Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde, 2001) et sur Traffic Engineering Handbook (1999). Les données sont reprises dans le Tableau 6-3.

6.1.3. Conducteurs

Dans notre modèle simplifié, le comportement des conducteurs est régi par le programme de conduite, caractérisé par un coefficient d'agressivité appelé l'impatience

de base, et des capacités physiologiques, correspondant au seuil de détection des changements de l'angle sous lequel est perçu un objet.

Impatience de base (i) :

L'impatience de base traduit la propension du conducteur à accepter des manœuvres risquées. Elle entre notamment dans le calcul de l'impatience de dépasser, de la détection du créneau disponible et des paramètres des éléments véhicule/conducteur. L'impatience de base i est générée à partir d'une normale de moyenne 0 et d'écart type 1. Pour l'impatience de dépasser i_{dep}, on suppose qu'elle suit une loi normale de moyenne μ et d'écart type σ. μ et σ peuvent être obtenus en mesurant le nombre de dépassements effectués sur une portion de route, pour des débits variables. Une procédure heuristique sur μ et σ permet d'obtenir les valeurs pour lesquelles la situation de dépassement est la mieux représentée. La comparaison effectuée au Chapitre 7 Premiers résultats de simulation par rapport aux mesures de Normann (1942) nous conduit à opter pour μ=0.5 et σ=1/3.

Seuil de perception des vitesses (t) :

Michaels (1963) détermine expérimentalement le seuil de détection de la vitesse de changement de l'angle sous lequel est perçu un objet ou signal empiétant sur la route, circonstanciant un déplacement latéral. Une étude statistique lui permet de conclure que ce seuil n'est pas dépendant de la vitesse du véhicule et de la distance par rapport à l'objet à détecter, mais est une *constante* distincte pour chaque conducteur. Il note des valeurs entre 3.10^{-4} et 10.10^{-4} rad/s. Dans notre modèle, les spécificités de chaque conducteur sont cependant reliées à l'impatience de base. Celle-ci peut être reliée à des capacités physiologiques importantes, car elle traduit une plus grande importance donnée à la tâche de conduire, par conséquent une attention plus élevée. Dans SSIUEL, le seuil de perception des vitesses est pris égal à 6.10^{-4} et pondéré par le paramètre de comportement de conduite (loi normale de moyenne 1 et d'écart type 0.2, minimum de 0.5 et maximum de 1.5), décroissant avec l'agressivité du conducteur, et par le

paramètre de détection des différences de vitesse (loi normale de moyenne 1 et d'écart type 0.05, minimum de 0.9 et maximum de 1.1).

Le seuil de perception des vitesses t est le produit entre un nombre pseudo aléatoire issu d'une loi normale de moyenne 6.5 10^{-4} rad/s et d'écart type 1.2 10^{-4} rad/s, caractérisant les capacités physiologiques propres au conducteur, et la quantité (1-0.2 i), i correspondant à l'impatience de base et représentant donc l'attention que le conducteur apporte à l'observation de l'environnement.

6.1.4. Éléments véhicule/conducteur

Les caractéristiques des éléments véhicules/conducteur traduisent les interactions entre les motivations de conduite (temps de parcours désiré, sécurité de la conduite) et le confort du trajet (niveaux d'accélération et de décélération, variation de la vitesse) ; dans notre modèle, elles sont de quatre types : vitesse désirée, accélération maximale, décélération maximale et espace intervéhiculaire à l'arrêt. Dans la théorie microscopique des routes rurales (SIMLA ++, SSIUEL), ces variables sont principalement corrélées avec l'agressivité du conducteur. Or, s'il est légitime qu'un conducteur plus agressif utilisera pour la même voiture une accélération maximale plus importante qu'un conducteur timide (car il acceptera un niveau de risque plus élevé et ne cherchera donc pas impérativement une sécurité élevée), le niveau d'accélération choisi dépend finalement des capacités du moteur.

Les caractéristiques correspondent donc à un programme de conduite du conducteur, que celui-ci adapte cependant au véhicule qu'il utilise. Nous considérons que le conducteur choisit des valeurs dépendant du type de véhicule (véhicule particulier, poids lourd) et inférieures aux capacités maximales du véhicule, en ce qui concerne l'accélération maximale et la vitesse désirée. L'accélération maximum est déterminée par la valeur maximum de traction, en considérant une pente et une vitesse nulle. La vitesse maximum est la vitesse d'équilibre pour une pente nulle, elle ne peut être déterminée algébriquement (résolution d'une équation du troisième degré) et est donc

obtenue en appliquant le modèle de Rakha, Lucic, Demarchi, Setti et Van Aerde (2001) avec un pas de temps de $\tau = 0.5$ s jusqu'à ce que la vitesse soit stabilisée à $\varepsilon = 10^{-4}$ m/s près. Des valeurs pseudo aléatoires successives de l'accélération maximum et de la vitesse désirée sont générées jusqu'à obtention d'une valeur inférieure à la vitesse maximum et à l'accélération maximum. Ce processus peut cependant être très consommateur en nombres aléatoires et en temps, pour des véhicules ayant des caractéristiques très faibles. Par conséquent, au-delà de dix nombres aléatoires générés, les valeurs maximales sont adoptées.

Vitesse désirée V_d :

Il s'agit de la vitesse à laquelle le conducteur désire rouler lorsque aucun risque de collision avec un véhicule précédent n'est possible. La méthode développée dans SIMLA ++ pour sa détermination est ici décrite.

Les passages des véhicules sont détectés par des boucles à induction en un point de la section de route, idéalement en ligne droite et en terrain plat. Les données de temps de passage, de vitesse instantanée et de type de véhicule (poids lourd, véhicule particulier) sont enregistrées. Les vitesses désirées sont pratiquées par les véhicules en situation de circulation libre. Le HCM 2000 détermine qu'un véhicule est libre lorsque son écart avec le véhicule précédent est d'au moins 3s. SIMLA ++ considère cependant qu'une telle méthode pourrait donner une proportion trop importante de véhicules lents ; il est proposé de ne considérer que les véhicules circulant seuls, caractérisés par un écart minimum avec le véhicule précédent t_p et avec les véhicules suiveurs t_s. Pour la mise en place de SIMLA ++, des valeurs de t_p entre 8 et 15 s et de t_s entre 4 et 5s ont été étudiées. Il n'a pu être établi que les distributions étaient distinctes. Par conséquent, afin d'obtenir une base de données de taille maximum, SIMLA ++ a opté pour $t_p = 8$ s et $t_s = 4$ s.

Cette méthodologie indique clairement que la distribution des vitesses désirées est en réalité située entre la distribution des vitesses des véhicules circulant librement (i.e.

t_p=8s et t_s = 0 s), qui est décalée en direction des vitesses faibles, et celle des véhicules circulant seuls (i.e. t_p=15s et t_s = 5 s), qui est décalée vers les vitesses élevées.

Lors d'un projet antérieur du ministère des transports (Cormier, 2003), des données du type requis par la méthode de SIMLA ++ ont été collectées par capteurs à induction sur

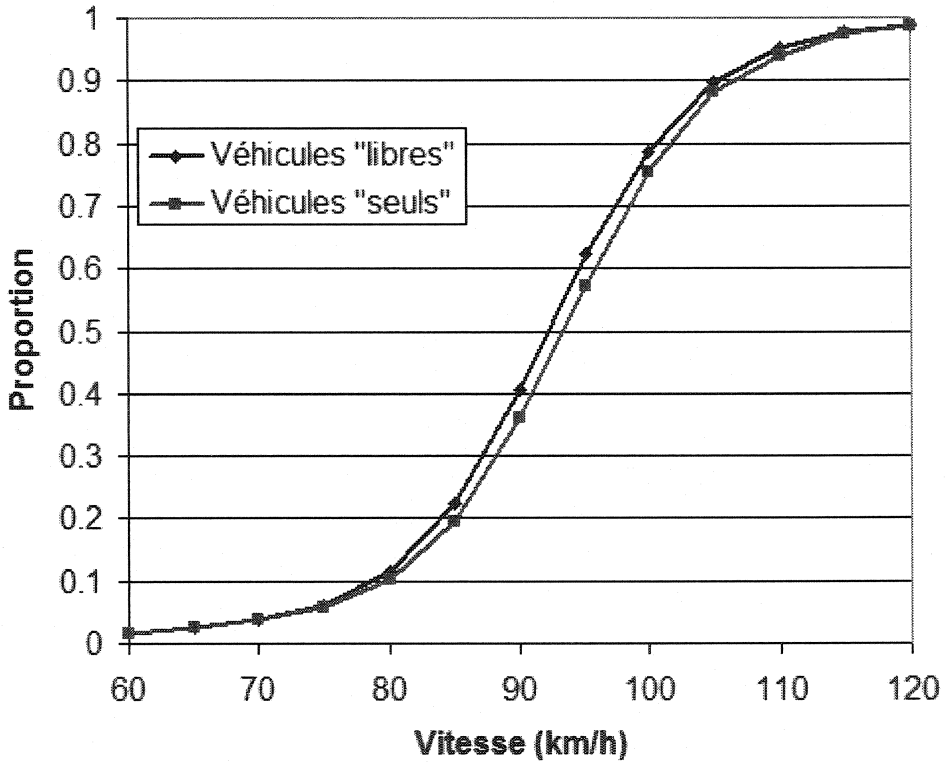


Figure 6-2 : distribution des vitesses (St Raymond, période du 19/07/2001 au 23/07/2001)

deux sites (Ormstown et St Raymond). Les répartitions de vitesse correspondant à la population des véhicules circulant librement et seuls sont représentées sur la Figure 6-2. Pour chaque centile p, la différence entre les vitesses correspondant à p dans chacune des deux populations de véhicules ne dépassent pas 1 km/h, ce qui nous incite à conclure que l'estimation de la vitesse désirée à partir de la population des véhicules circulant seuls est satisfaisante.

Les données sont cependant difficilement exploitables, car des intersections sont présentes sur la section de route où les capteurs ont été installés, ce qui crée des accès

par des véhicules ayant une vitesse faible, et qui choisissent un créneau de circulation, donc circulent majoritairement seuls et/ou libres. À Ormstown, un pic de vitesses faibles est détecté ; les données ne sont donc pas utilisées. Il a été choisi d'utiliser les données de l'été 2001 à Saint Raymond, qui ont cependant également une proportion non nulle de vitesses faibles. En outre, la précision des capteurs pour la mesure des longueurs ne nous permet pas de séparer les différents types de véhicules. Enfin, les vitesses désirées moyennes collectées sur des plages glissantes de 3 heures obtenues varient selon des proportions importantes, tel que présenté sur la Figure 6-3.

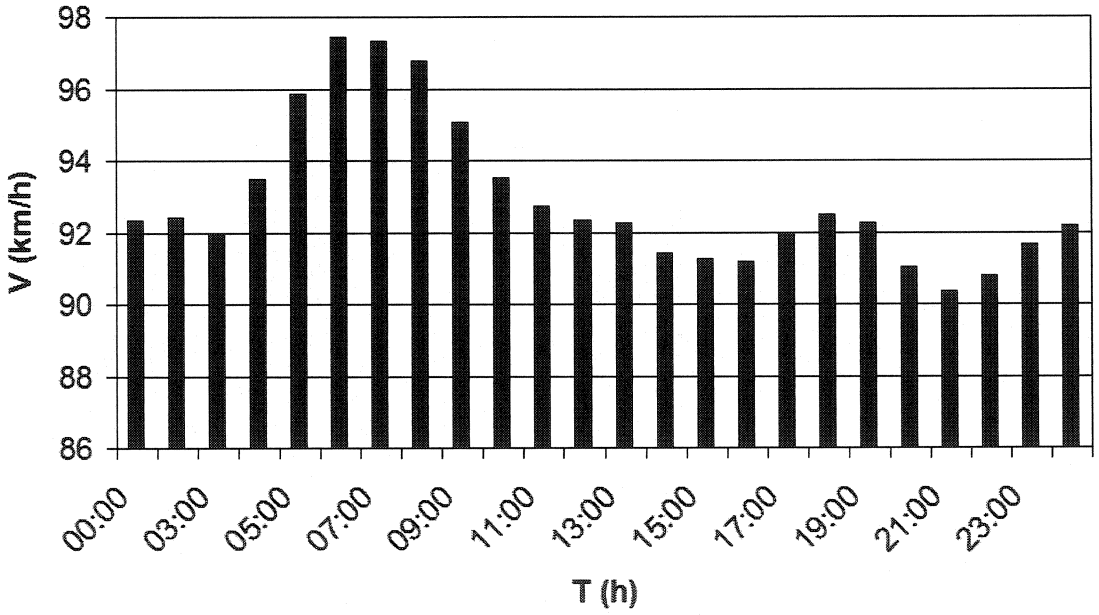


Figure 6-3 : moyenne des vitesses désirées en fonction de la période de la journée

Pour cette étude, nous désirons développer un principe d'analyse ; par conséquent l'obtention de données précises n'est pas requise. Comme la qualité des données est faible, nous optons donc pour une analyse approximative, portant sur une série de données de 4 jours, pour les vitesses variant entre 9 h 00 et 00 h 00 – sur cette plage la proportion de véhicules très lents est faible. Une loi normale de moyenne 93 km/h et d'écart type 9 km/h a été obtenue à partir de cet échantillon de 2902 vitesses, avec un coefficient R^2 de corrélation entre la loi de distribution théorique et la loi de

distribution observée pour des vitesses supérieures à 60 km/h de 0.939. Les deux lois de distribution sont présentées sur la Figure 6-4.

La vitesse désirée dépend de l'agressivité du conducteur. SSIUEL propose de déterminer des paramètres a, b et c tels que si XG est l'agressivité du conducteur et Vzul la vitesse maximum sur le réseau, la vitesse désirée du conducteur d'un véhicule particulier soit : $\left(aXG^{-c}+b\right)V_{zul}$ et celle d'un conducteur de poids lourd $F\cdot\left(aXG^{-c}+b\right)V_{zul}$, F étant une constante traduisant l'adoption de vitesses inférieures par les poids lourds. L'adoption d'une méthode complexe correspond à l'inadéquation d'une loi normale sur les données terrain de vitesses désirées. Il est intéressant de noter que la variabilité des données correspond uniquement à l'agressivité des conducteurs. Se basant sur cette réflexion, nous proposons comme vitesse désirée : $V_d = 9\cdot i + 93\ (km/h)$ pour les véhicules particuliers et pour les poids lourds, i étant l'impatience de base du conducteur, dont la valeur est choisie aléatoirement parmi une distribution normale centrée réduite.

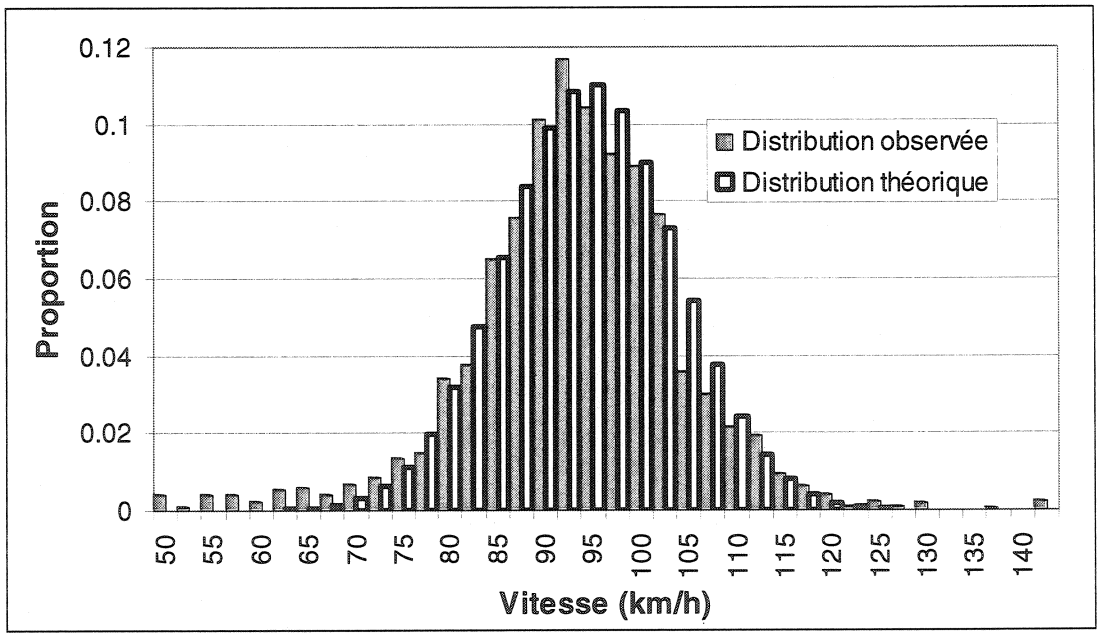


Figure 6-4 : distribution des vitesses désirées observée et théorique

Accélération maximum a_n :

Cette valeur représente la limite acceptée par un conducteur lorsqu'il cherche à atteindre sa vitesse désirée. Selon le modèle de Gipps (1981), l'accélération maximum est distribuée normalement, de moyenne 1.7 m/s^2 et d'écart type 0.3 m/s^2. Peu de méthodes sont proposées dans la littérature pour l'obtention de cette donnée ; l'utilisation de boucles magnétiques situées à faible distance (< 100 mètres) permet certes d'obtenir des valeurs d'accélération, cependant, il est impossible de savoir lesquelles sont maximales. Une calibration pourrait être réalisée en testant des moyennes et écarts type jusqu'à obtention de la distribution d'accélération adéquate parmi la population de véhicules circulant librement. Sinon, la distribution peut être obtenue pour un échantillon de population conduisant dans un simulateur ou dans une voiture instrumentée. Nous conserverons les paramètres de Gipps pour la procédure de validation, obtenue en fonction de l'impatience comme : $a_n = 0.3 \cdot i + 1.7$, i étant l'impatience de base du conducteur, dont la valeur est choisie aléatoirement parmi une distribution normale centrée réduite.

Décélération maximum b_n :

Il s'agit du freinage maximum adopté par le conducteur lors de l'arrêt du véhicule précédent. Gipps (1981) propose une décélération maximum valant le double de l'accélération maximum. Cette variable peut également être déterminée par l'utilisation de voitures instrumentées ou de simulateurs. La méthode avec deux boucles magnétiques peut également fonctionner, en considérant cette fois la population des véhicules gênés. Nous conservons la valeur de Gipps, soit $b_n = 2a_n$. Or, il semble que les poids lourd devraient avoir une valeur plus faible de décélération maximum. Ceci est réalisée à travers la contrainte précédemment citée selon laquelle l'accélération maximale obtenue dans la conduite est inférieure à l'accélération maximale effective du véhicule (en pente nulle et à vitesse nulle). De fait, les propriétés restreintes du poids lourd créeront des accélérations maximales moins élevées et donc des décélérations plus faibles.

Espace intervéhiculaire à l'arrêt ($d_{arrêt}$) :

$d_{arrêt}$ intervient dans la variable S_n de l'équation de voiture suiveuse de Gipps (1981), que nous utilisons pour décrire le mode de conduite gênée, qui est la somme de $d_{arrêt}$ et de la longueur du véhicule. Gipps (1981) propose pour S_n une loi normale de moyenne 6.5 m et d'écart type 0.3 m. Cette valeur devrait être déterminée à un stop ou à un feu de signalisation sur les voies d'accès sur la route étudiée, par photo aérienne ou relevé satellite. Nous proposons pour $d_{arrêt}$ une valeur moyenne de 0.7 m et d'écart type 0.3 m, avec une valeur minimum de 0.1 m. Il est supposé que cette valeur ne dépend pas de l'impatience.

Données de dépassement :

Dans les modèles SSIUEL et SIMLA ++, le conducteur utilise le maximum des capacités du moteur lorsqu'il effectue un dépassement. Or, lorsque le conducteur effectue un dépassement sans danger, c'est-à-dire tant qu'une décision de retour forcé sur sa voie de circulation n'est pas prise, il n'y a pas de raison pour que celui-ci décide de renoncer à une trop grande portion de son confort de conduite. Il fixe une accélération maximum et une vitesse de dépassement confortables de telle sorte que le dépassement soit effectué dans un temps raisonnable (traduction libre de Polus, 1987). La revue de littérature sur le dépassement (dont notamment Baass, 1999) indique que le conducteur dépasse à une vitesse correspondant au minimum entre sa vitesse désirée et une vitesse relative de 15 km/h. Nous allons fixer cette valeur de vitesse relative à $\frac{10}{3} \cdot i + 15\left(km.h^{-1}\right)$, i étant l'impatience de base du conducteur, dont la valeur est choisie aléatoirement parmi une distribution normale centrée réduite. L'accélération maximum est également plus élevée qu'en situation de conduite libre, nous utilisons : $1.5 \cdot a_n$.

Le dernier point correspond à la décélération maximale lors de l'abandon du dépassement. Nous utiliserons une valeur de $1.5 \cdot b_n$, décélération maximale utilisée pour l'arrêt brutal lorsqu'un conducteur se situe sur sa voie de circulation.

Les méthodes proposées pour déterminer les valeurs de ces caractéristiques dynamiques en conduite normale s'appliquent également au cas du dépassement.

6.2. Logique de programmation

6.2.1. Décélération estimée

Comme indiqué en annexe B du présent document, l'écart d_c (m) entre les pares chocs avant de deux véhicules lorsque le véhicule suiveur évolue en mode « circulation contrainte » vaut, pour le modèle de voiture suiveuse de Gipps (1981) :

$$d_c = \frac{V_{n-1}^2}{2}\left[\frac{1}{\hat{b}_n} - \frac{1}{b_n}\right] + \frac{3 \cdot V_{n-1}\tau}{2}$$

avec :

V_{n-1} : vitesse du véhicule précédent (m/s)

b_n : décélération maximum que le conducteur n peut accepter (m/s^2);

S_{n-1} : somme de la taille effective du véhicule n-1 et de l'espace intervéhiculaire à l'arrêt (m);

τ : temps de réaction (valeur constante de 2/3 s);

$\hat{b}_n$: décélération maximale supposée du véhicule précédent (m/s^2)

Chacune de ces variables, hormis l'estimation de la décélération maximale du véhicule précédent $\hat{b}$, a été paramétrée au paragraphe Variables d'entrée. Il reste donc à définir une procédure pour la détermination de $\hat{b}$. Or, cette variable n'a qu'un sens psychologique et ne peut donc être obtenue par mesure directe. En outre, elle devrait être variable et dépendre du type de véhicule précédent.

Gipps (1981) détermine la décélération estimée selon la formule $\hat{b} = \min\left(\frac{b_n + b_p}{2}; b_p\right)$ et fixe -3 m/s^2 comme valeur par défaut de b_p, valeur minimum de la décélération estimée (les valeurs des décélérations étant algébriques). Le problème s'est donc reporté sur l'obtention de b_p. Selon l'approche de Gipps (1981), il s'agit d'une valeur constante au sein de la population d'éléments

véhicule/conducteur. Connaissant la valeur des autres paramètres de conduite – si la vitesse du véhicule précédent est considérée être sa vitesse désirée – et les types de population impliquées (ici poids lourds et véhicules particuliers), il est possible par simulation Monte Carlo d'obtenir une valeur moyenne de d_c en fonction de b_p, correspondant à un cas virtuel de circulation où tous les véhicules peuvent circuler à leur vitesse désirée. Cette valeur peut être reformulée comme une approximation du débit maximal Q par : $Q = \frac{3600 \cdot V_{n-1}}{d_c}$. Une telle simulation a été effectuée, dont les résultats (débit maximum possible en fonction du pourcentage de poids lourds et de la valeur de b_p) sont décrits dans le Tableau 6-4.

En pratique (HCM, 2000), on observe sur les routes rurales, une valeur maximale du débit sur une voie de circulation de 1700 uvp/h. Selon le Tableau 6-4, une valeur de b_p inférieure ou égale à -3.8 m/s^2 permet d'avoir un débit maximal supérieur à ce seuil quelque soit la proportion de poids lourds.

Tableau 6-4: débit maximum en fonction de l'estimation de la décélération maximum et du pourcentage de poids lourds

Q (uvp/h)		Proportion de poids lourds										
		0.0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
b_p (m/s^2)	-4	1840	1823	1803	1787	1770	1754	1740	1723	1708	1692	1678
	-3.8	2015	1995	1972	1950	1929	1908	1888	1868	1853	1833	1815
	-3.6	2254	2224	2195	2166	2140	2117	2090	2064	2040	2018	1996
	-3.4	2599	2557	2516	2478	2442	2406	2372	2339	2309	2278	2247
	-3.2	3137	3072	3011	2953	2899	2847	2802	2751	2703	2660	2615
	-3	4093	3982	3878	3776	3675	3594	3509	3432	3355	3282	3218

Q, débit maximum estimé ; b_p, valeur minimum de l'estimation de la décélération du véhicule précédent

Cependant, lorsque la valeur absolue de b_p est trop faible, les conducteurs ont tendance à sous estimer le freinage maximum accepté par le véhicule précédent. Par conséquent,

ils circulent à une distance ne permettant pas un arrêt sans risque de collision avec le véhicule précédent P. Si P freine brutalement, ils devront freiner plus fortement que ce dernier. Les perturbations dues au freinage d'un véhicule en tête d'un peloton s'amplifient donc et le trafic est instable, phénomène pouvant effectivement se produire, mais avec une ampleur et une fréquence inconnues à ce stade de réflexion. Étant donné que ce type d'effet de b_p sur le trafic n'a pas été analysé par la présente étude, la valeur $b_p = -3.0$ m/s^2 déterminée dans Gipps (1981) est conservée ; elle permet d'obtenir un débit virtuel supérieur au débit maximum observé.

6.2.2. Zones et temps tampons

La zone tampon correspond à l'espace en début et en fin de la section de route simulée, qui est prévu pour la stabilisation du trafic et n'est donc pas pris en compte comme résultat de la simulation. Le dépassement est interdit sur cette zone. Pour fins de simplification des traitements, cet espace est considéré identique aux deux extrémités de la section de route.

La zone tampon d'entrée doit permettre l'entrée d'un trafic réaliste, c'est-à-dire que la distribution des créneaux doit correspondre soit à la distribution théorique injectée, soit aux données empiriques collectées (Archilla et Morrall, 1995). En outre, les conditions d'équilibre de circulation doivent également être atteintes. En effet, si un véhicule est généré avec un créneau intervéhiculaire trop court, le modèle de Gipps (1981) prédit qu'il va tout d'abord freiner avec une intensité très forte, puis aura une marge de manœuvre suffisante pour ne plus subir les effets du véhicule précédent et enfin adoptera une vitesse de voiture suiveuse stable et équilibrée. Ces comportements ne sont évidemment pas réalistes et ne doivent pas être pris en compte dans les calculs. L'établissement de la zone tampon correspond donc à deux critères contradictoires : elle doit donc être suffisamment éloignée du point d'introduction pour que les vitesses soient stabilisées, mais suffisamment proche pour que les créneaux d'introduction soient réalistes.

Pour tester l'influence de la taille L de la zone tampon, une simulation d'un débit de 700 veh/h dans les deux sens sur une route théorique géométriquement parfaite a été construite, avec L variant entre 50 m et 400 m. La route virtuelle avait une longueur de 2 km, aucune zone de non dépassement et une visibilité infinie ; dix germes pour la génération de nombres aléatoires distincts ont été utilisés ; les données ont été enregistrées sur une durée d'une demi heure.

Le Tableau 6-5 montre les valeurs moyennes des données de sortie de la simulation – débit Q à la sortie de la zone tampon, nombre de dépassements N, vitesse moyenne de

*Tableau 6-5 : données de sortie de la simulation en fonction de la taille de la zone tampon**

L (m)	Q (veh/h)	N	V_{xt} (km/h)	Q_{xt} (veh/h)	K_{xt} (veh/km)	PTSF
50.00	701.70	55.90	84.744	637.03	7.52	0.26
100.00	700.55	57.90	84.636	619.94	7.33	0.27
150.00	700.46	61.10	84.6	603.04	7.13	0.27
200.00	701.07	62.00	84.456	585.36	6.93	0.27
250.00	701.06	62.80	84.384	569.80	6.75	0.27
300.00	700.84	65.60	84.312	553.40	6.57	0.27
350.00	701.03	66.60	84.204	537.60	6.39	0.27
400.00	700.54	67.20	84.096	521.78	6.21	0.27

(*) L, longueur de la zone tampon ; Q, débit à la sortie de la zone tampon ; V_{xt}, Q_{xt} et K_{xt} vitesse moyenne de parcours, débit et densité sur la fenêtre spatio-temporelle [0, 2 km]×[15, 45 min] ; PTSF, pourcentage du temps passé à suivre

parcours V_{xt}, débit Q_{xt} et densité K_{xt} sur la fenêtre spatio-temporelle [0, 2 km]×[15, 45 min] et pourcentage du temps passé à suivre PTSF sur la route virtuelle - en fonction de la taille de la zone tampon. Il apparaît clairement que le choix de la longueur de la zone a un impact significatif en termes de nombre de dépassements, de débit et de densité de circulation. Une méthode de détermination de L a donc été développée, basée sur la comparaison entre des créneaux intervéhiculaires à la sortie de la zone tampon avec la

distribution théorique utilisée pour la génération des véhicules et sur la stabilité du trafic entrant dans la route virtuelle simulée.

Pour estimer la stabilité du trafic, l'accélération (prise en valeur absolue) des véhicules à l'entrée sur la zone est estimée, une valeur importante étant typique de conditions hors équilibre. Deux valeurs moyennes d'accélération sont déterminées :

1. La moyenne sur l'ensemble des véhicules, traduisant la quantité de véhicules n'ayant pas atteint l'état d'équilibre ;
2. La moyenne sur l'ensemble des véhicules ayant une accélération non nulle, traduisant le degré auquel ces véhicules sont hors de l'état d'équilibre.

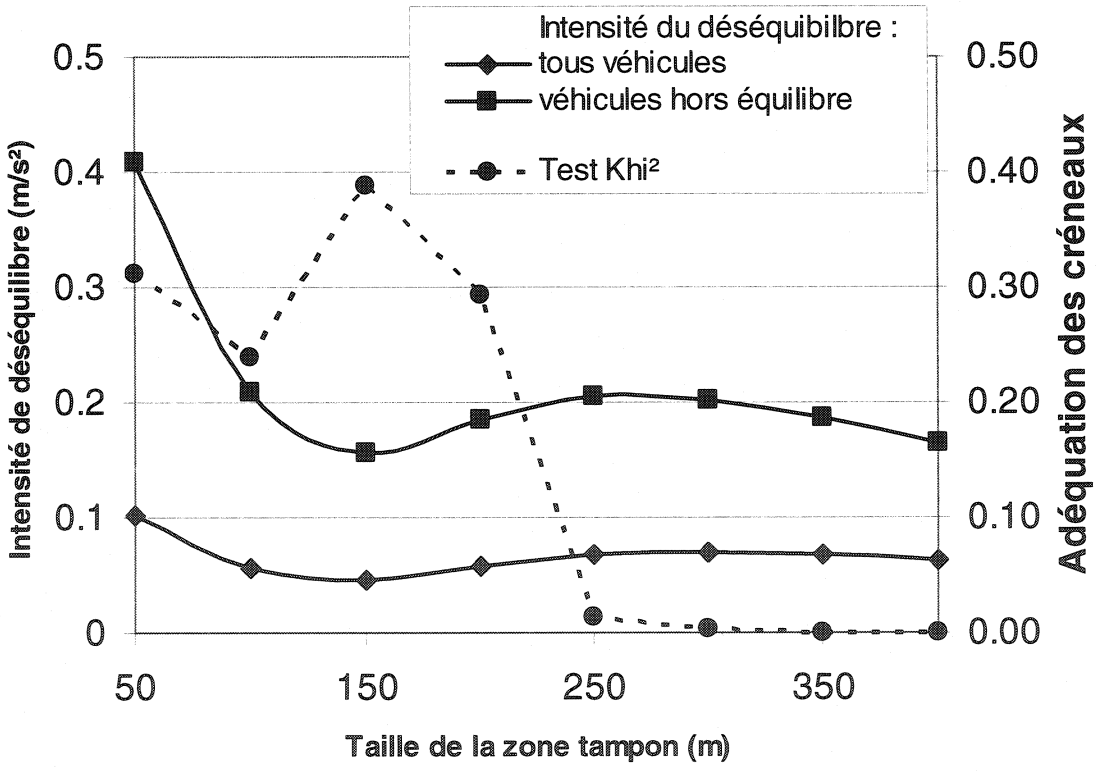


Figure 6-5: détermination de la taille de zone tampon optimale

Ces indicateurs de déséquilibre sont représentés pour la simulation sur la Figure 6-5 en fonction de la longueur de la zone tampon, de même que le niveau de confiance associé à la loi χ^2 pour l'hypothèse selon laquelle la distribution des créneaux obtenues dans la

simulation suit la distribution théorique à l'entrée. Les conditions optimales recherchées correspondent à un déséquilibre faible et un niveau de confiance maximal. Chaque indicateur atteint sa valeur optimale pour L = 150 m. Au-delà de cette valeur, le niveau de confiance chute fortement tandis que le déséquilibre reste à une valeur relativement constante. Il peut être estimé qu'une longueur de 150 m représente le meilleur choix de longueur de zone tampon pour un débit de 700 veh/h, malgré le faible nombre de réplications utilisé (10). Une étude complémentaire devrait être menée pour évaluer la longueur de la zone tampon en fonction de chaque débit.

*Tableau 6-6 : données de sortie de la simulation en fonction de l'étendue de la durée tampon**

Nv	N	V_{xt} (km/h)	Qxt (veh/h)	PTSF
1	165.45	84.78	717.70	25.02%
11	166.61	84.744	718.40	25.10%
21	167.07	84.708	717.19	25.16%
31	166.97	84.744	717.70	25.11%
41	166.01	84.744	718.68	25.15%
51	166.65	84.744	719.13	25.17%
61	167.56	84.78	721.64	25.14%
71	167.97	84.78	719.98	25.08%
81	168.06	84.78	718.52	25.06%
91	167.54	84.744	720.03	25.13%
Variation maximale	1.58%	0.13%	0.62%	0.63%

(*) : N_v, nombre de véhicules sortis de la route pour la détermination du temps tampon ; N, nombre de dépassements ; V_{xt}, vitesse moyenne de parcours, Q_{xt} débit sur la plage spatio-temporelle de mesure ; PTSF, pourcentage du temps passé à suivre

Le temps tampon correspond à la durée qui permet au trafic de remplir la section de route étudiée dans les deux sens, afin de ne pas entamer la détermination des variables de sortie sur une route vide. Cette condition est remplie lorsqu'un certain nombre Nv de véhicules est sorti de la route. Afin d'estimer si ce nombre avait un impact sur les données de sortie de la simulation, la simulation précédente a été reprise en fixant la taille de la zone tampon à 150 m et en faisant varier Nv entre 1 et 91 ; les variables

déterminées étaient la vitesse moyenne de parcours V, le nombre de dépassements effectués N, le débit sur le domaine mesuré Qxt et le pourcentage du temps passé à suivre un véhicule lent PTSF. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6-6.

L'étude de la sensibilité des résultats à ce paramètre permet de conclure que l'influence de ce paramètre peut être négligée.

Pour l'utilisation du programme pour des cas particulier, il est conseillé d'étudier pour chaque cas l'effet des zones et temps tampon selon la procédure développée dans ce paragraphe.

6.2.3. Structure de programmation

La simulation a été rédigée en langage C++, qui permet de programmer selon deux méthodes : descendante (programme séquentiel) ou ascendante (programme orienté objet). Dans une programmation « classique » de type descendant, un traitement est conçu pour exécuter un but principal (par exemple simuler une route rurale). Ce traitement est décomposé en sous traitements indépendants (par exemple générer des véhicules ou déplacer des véhicules) sur plusieurs niveaux, jusqu'à l'obtention de programmes élémentaires. A contrario, dans la programmation ascendante de type orienté objet, le programmeur décrit les éléments intervenant dans le système réel (par exemple les véhicules ou la route) ainsi que leur comportement. L'avantage de ce deuxième type de programmation est qu'il est plus simple de comprendre la structure du programme en vue de modifier certains comportements, certaines caractéristiques ou de rajouter des éléments. De plus, le programme peut aisément être adapté à la réalisation de plusieurs objectifs distincts (le programme élaboré n'a par exemple pas été utilisé que pour simuler un flux de véhicules sur une route rurale mais aussi pour reproduire des conditions expérimentales nécessitant l'introduction périodique de véhicules dans un trafic).

Le choix de programmer selon une méthode orientée objet a donc été effectué : d'une part, les véhicules possèdent des attributs propres et des modèles génériques de

comportement, ce qui correspond aux critères de définition d'une unité de traitement de ce type de programmation ; d'autre part, la modélisation a été effectuée de manière ascendante et la traduction du modèle vers le langage informatique sera donc simplifiée.

Avant d'introduire les éléments constitutifs de notre programme, il s'agit de rappeler brièvement quelles sont les composantes de base d'un programme orienté objet. La notion de classe structure l'architecture des programmes. Une classe définit la manière, reproduite sur la Figure 6-6, dont sont structurés certains objets spécifiques qui composent le programme. Les objets peuvent être des reproductions d'entités réelles (par exemple un véhicule ou un capteur) ou des éléments virtuels (comme le modèle de choix de la manœuvre à effectuer). D'une part, un objet (par exemple un véhicule) est caractérisé par les attributs (vitesse, position) qui lui sont assignés lors de sa construction (nouveau véhicule Ford T) et qui peuvent être réévalués au cours du programme.

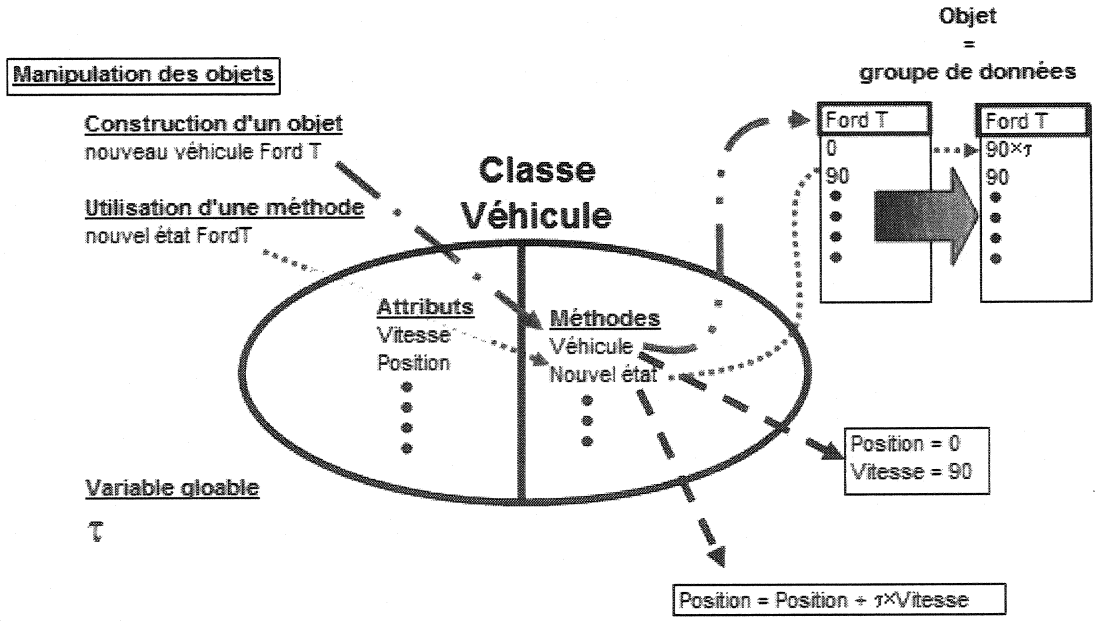


Figure 6-6 : schématisation de la notion de programmation orientée objet

L'objet constitue un groupe de données, défini selon un certain agencement dépendant de la classe d'appartenance de l'objet. D'autre part, l'objet a à sa disposition des méthodes (Véhicule, Nouvel état), délivrées par la classe à laquelle il appartient, qui permettent de définir ses interactions avec l'environnement (création de l'objet Ford T, modification de ses attributs, interaction avec d'autres objets). La structure de la simulation consiste donc en une définition des classes (attributs, méthodes) et des relations entre elles.

Les classes d'objets utilisées sont présentées ici :

Classe véhicule :

Il s'agit de la classe de base. L'apparition des objets de cette classe, leur déplacement et leur destruction conditionnent l'évolution du système. La classe véhicule possède trois types d'attributs :

- son état actuel et son état futur (vitesse, position, comportement), variables pendant la simulation ;
- des données d'environnement (position des véhicules visibles, distance de visibilité, pente de la route) ;
- ses propriétés (caractéristiques dynamiques et géométriques du véhicule, seuils psychologiques du conducteur, propriétés de l'élément véhicule conducteur) ;

Les méthodes de la classe véhicule ont pour but de réévaluer les données d'environnement (distinguer les véhicules, déterminer la pente à l'état actuel) et de calculer l'état futur en fonction de l'état actuel et d'un type de manœuvre qui est assigné au véhicule.

Classe action :

La classe action a pour but de déterminer, en fonction de l'état d'un véhicule au temps t, quelle manœuvre un véhicule effectuera au temps $t+\tau$. Elle est basée sur le schéma développé au paragraphe Diagramme décisionnel du Chapitre 3. Elle est donc

construite à chaque temps t à partir de la liste des véhicules dans le sens de circulation dont on désire réévaluer les propriétés et de la liste de véhicules en sens opposé.

Classe génération des temps d'arrivée :

Cette classe produit un créneau temporel entre le véhicule généré et le véhicule précédent. Elle nécessite un germe pour la génération de nombres aléatoires, qui reste constant sur une simulation, ainsi que le débit de véhicules à l'entrée de la section de route simulée.

Classe génération des véhicules :

La classe génération des véhicules fixe les propriétés intrinsèques du véhicule lors de sa création. Ses attributs sont donc :

- un germe pour la génération de nombres aléatoires correspondant à chaque propriété indépendante (rapport poids puissance, efficacité du moteur, masse du véhicule pour les poids lourds, distance intervéhiculaire à l'arrêt, seuil de perception des changements d'angle et impatience du conducteur) ;
- l'espérance et l'écart type de chacune de ces six distributions.

Les méthodes de la classe permettent de fixer toutes les propriétés à partir des six nombres aléatoires produits et de positionner le véhicule à un chaînage et avec une vitesse de manière réaliste.

Classe simulation :

Cette classe est le noyau de la simulation ; elle gère l'horloge et procède à la gestion d'une liste de véhicules dans un certain sens de circulation : elle ajoute des véhicules à la fin de la liste, ordonne de réévaluer les états des véhicules, réordonne la liste, détruit les véhicules qui sortent de la section de route étudiée. Elle doit donc disposer d'informations sur :

- la liste de véhicules dans le sens qu'elle considère ;
- la liste de véhicules en sens opposé ;

- les constantes de la simulation (durée, longueur de la zone étudiée).

Enfin, l'objet simulation stocke des informations temporaires pour le calcul des données de sortie.

Classes résultats et capteurs :

Ces classes stockent des données pour la détermination des variables de sortie. La classe capteur se distingue par la caractérisation de la position x à laquelle elle stocke les données alors que la classe résultats observe l'ensemble de la simulation.

6.2.4. Schéma de principe du programme

Il s'agit ici d'une utilisation proposée des classes créées, correspondant à la mise en place d'une reproduction de l'écoulement des véhicules sur une route rurale.

La simulation d'une route rurale est initiée par la création de deux objets de la classe simulation, correspondant à chaque sens de circulation et des objets des classes capteurs et résultats. La Figure 6-7 indique comment s'articulent les phases d'initialisation du système, d'introduction de véhicules dans le système et de réévaluation des états des véhicules dans le système pour chaque objet simulation. À noter que la méthode actualisation effectue la destruction des véhicules : si, lors de l'actualisation d'un véhicule au temps T, la position de ce même véhicule au temps $T-\tau$ est en dehors des limites de la simulation (à savoir la longueur de la route étudiée plus les deux zones tampons), celui-ci est retiré de la simulation.

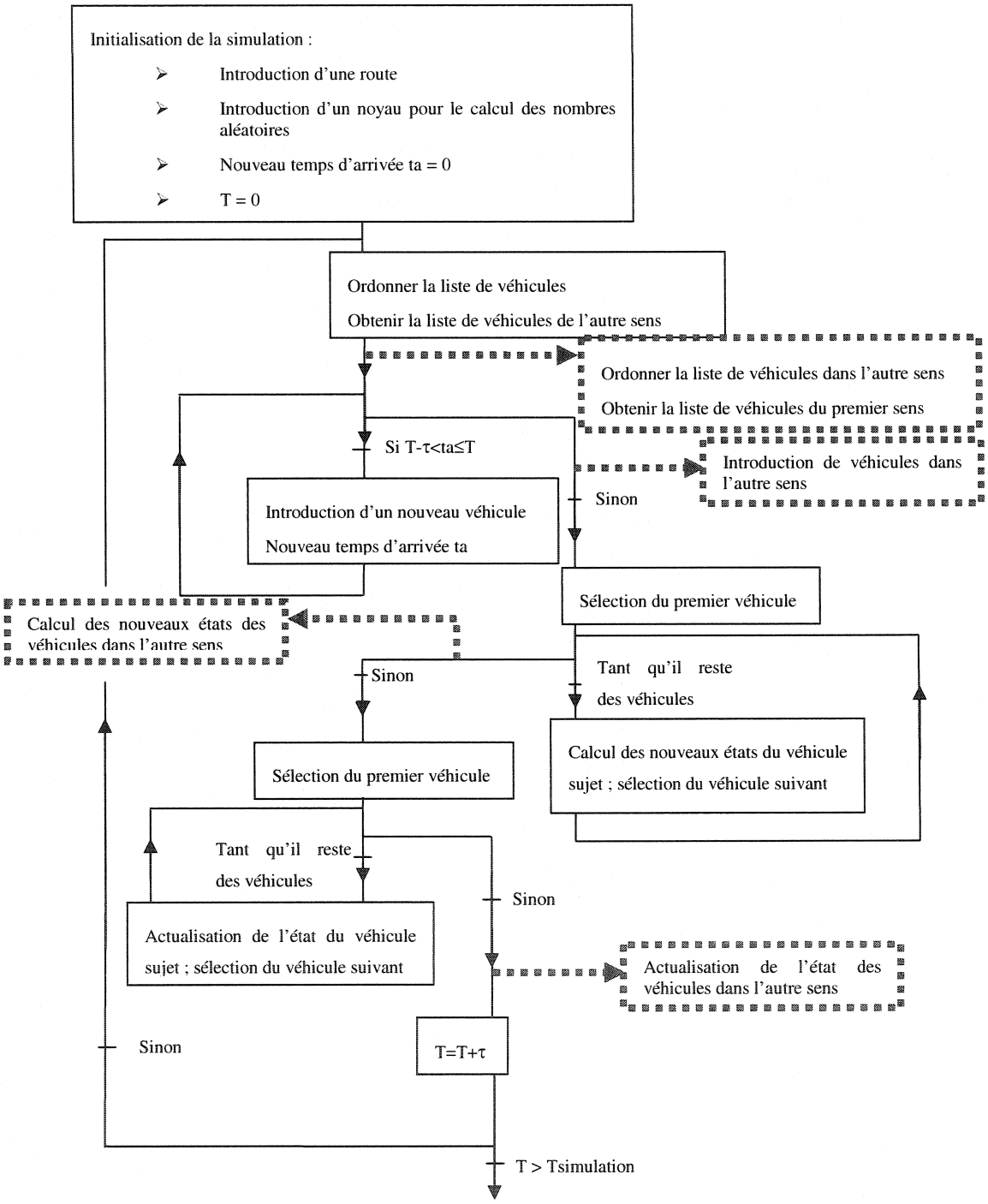


Figure 6-7 : schéma de principe du programme

6.3. Variables de sortie

La modélisation microscopique permet de déterminer toutes les variables d'intérêt pour l'analyse comme le nombre de dépassements désirés et effectués ou les caractéristiques du dépassement. Les classes résultats et capteurs, ainsi que l'écriture de la matrice d'état du véhicule dans un fichier ont été programmées pour les besoins spécifiques à la validation du modèle.

6.3.1. Données macroscopiques agrégées spatialement et temporellement

Dans la théorie macroscopique des routes rurales, les indicateurs de vitesse moyenne de parcours ATS (Average Travel Speed) et de pourcentage du temps passé à suivre PTSF (Percent Time Spent Following) développés pour le niveau de service LOS (HCM, 2000) font figure de référence. Pour chaque véhicule, l'objet résultats calcule le temps Ti et la distance Xi parcourues sur le domaine [Xtampon,L+Xtampon]×[Ttampon,Tsimul] (où Tsimul est le temps de simulation, L la longueur simulée, Ttampon et Xtampon les temps et distances tampon évoquées au paragraphe Cependant, lorsque la valeur absolue de bp est trop faible, les conducteurs ont tendance à sous estimer le freinage maximum accepté par le véhicule précédent. Par conséquent, ils circulent à une distance ne permettant pas un arrêt sans risque de collision avec le véhicule précédent P. Si P freine brutalement, ils devront freiner plus fortement que ce dernier. Les perturbations dues au freinage d'un véhicule en tête d'un peloton s'amplifient donc et le trafic est instable, phénomène pouvant effectivement se produire, mais avec une ampleur et une fréquence inconnues à ce stade de réflexion. Étant donné que ce type d'effet de bp sur le trafic n'a pas été analysé par la présente étude, la valeur bp = -3.0 m/s2 déterminée dans Gipps (1981) est conservée ; elle permet d'obtenir un débit virtuel supérieur au débit maximum observé.

Zones et temps tampons), ainsi que le temps Tfi pendant lequel le véhicule se trouve à une distance ou dans un type de comportement l'empêchant de rouler à sa vitesse désirée. Les indicateurs sont alors obtenus par :

$$ATS = \frac{\sum_i X_i}{\sum_i T_i}$$

$$PTSF = \frac{\sum_i T_{fi}}{\sum_i T_i}$$

De même, les différents logiciels de microsimulation ont produit des courbes de référence de nombre de dépassement en fonction du débit total. Celles-ci sont généralement comparées au nombre de dépassement désirés donné par la formule de Wardrop (1952) (cf. Chapitre 2 paragraphe Rappels théoriques sur le dépassement). Le nombre de dépassement effectué est déterminé comme la différence entre le nombre O de moments où un quelconque des véhicules (présent dans le domaine [Xtampon,L+Xtampon]×[Ttampon,Tsimul]) passe de l'état « dépassement normal » à un état différent et le nombre C de fois où un quelconque des véhicules passe de l'état « abandon du dépassement » à un autre état. Le nombre de dépassements désirés est par contre une notion floue, dont l'estimation est délicate. Nous considérerons qu'il y a désir de dépasser, lorsque l'impatience de dépasser est nulle au pas de temps précédent et qu'elle devient non nulle lors de la réévaluation des propriétés de conduite.

Enfin, les données de dépassement peuvent être comparées aux relevés terrain réalisés dans la littérature. À ce titre seront déterminés les créneaux de dépassement, temps passés sur la voie en sens opposé, marges de sécurité avec le véhicule opposé à la fin du dépassement et créneaux pré- et post- dépassement.

6.3.2. Données des capteurs virtuels

Les capteurs virtuels permettent de suivre l'évolution spatiale de données agrégées sur une certaine durée (typiquement la durée de la simulation) ; elles sont nécessaires pour l'analyse, dont la mise en place constitue l'objectif de cette étude. Ainsi qu'exposé au Chapitre 2 Définition de mesures d'efficacité pour le dépassement, les données d'intérêt sont principalement le nombre de dépassements effectués, le nombre de

dépassements désirés mais non effectués du fait de la présence d'un véhicule en sens opposé et le nombre de dépassements désirés mais non effectués du fait d'une distance de visibilité insuffisante. Toutes les propriétés des véhicules peuvent être détectées par ces capteurs virtuels, nous verrons au Chapitre 7 Premiers résultats de simulation que les indicateurs de taille des pelotons et de moyenne des vitesses instantanées semblent tout autant pertinents pour l'analyse.

D'autre part, les capteurs virtuels peuvent également être utilisés pour enregistrer les dates de passage des véhicules en un point et leurs vitesses instantanées ou tout autre propriété utile (Pour le paragraphe 6.2.2, les valeurs absolues des accélérations des véhicules à la sortie de la zone tampon ont par exemple été stockées).

6.3.3. Trajets des véhicules

Le trajet de chaque véhicule est conservé dans un fichier portant le nom numérovéhicule.txt. Toutes les valeurs des attributs du véhicule y sont inscrites. À noter que seuls 512 fichiers peuvent être ouverts simultanément pour l'écriture. Ces fichiers ont permis, via un traitement simple par les fonctionnalités VBA d'EXCEL, de regrouper les trajectoires des véhicules et de produire des diagrammes distance/temps et vitesse/temps qui ont été utilisés pendant la phase de validation/vérification.

Chapitre 7. Premiers résultats de simulation

Un travail théorique et informatique a été conduit pour créer un outil d'analyse des dépassements, qui pourrait être utilisé sur l'ensemble des routes québécoises (dans la mesure des capacités de calcul et de connaissance des géométries de ces routes). Afin de vérifier sa capacité à remplir cet objectif, le logiciel va être appliqué à une section de la route 101 en Abitibi, pour laquelle la géométrie a été recomposée par interpolations sur des données GPS. Cette étude de cas permet ainsi d'envisager comment les zones de dépassement pourraient être remaniées pour améliorer les conditions de circulation, en mettant en perspective les résultats de la simulation avec la visibilité effectivement disponible. Le gain du remaniement ne sera pas évalué, car l'application se veut indicative.

Avant de procéder à cette mise en application, les hypothèses de modélisation doivent être validées. Cependant, comme aucune donnée expérimentale n'était disponible pour l'étude, la calibration des variables d'entrée a été effectuée par rapport à la littérature ; la validation sera donc principalement qualitative (tendances de variation des données) et partiellement quantitative (ordres de grandeurs). Deux points sont principalement examinés :

- les distributions des caractéristiques des différents types de véhicules et des éléments véhicule/conducteur choisies doivent fournir des valeurs moyennes raisonnables de déplacements des véhicules, notamment en termes de temps moyen de dépassement ;
- les données agrégées (nombre de dépassements effectués, indicateurs du LOS) doivent être comparées aux références trouvées dans la norme américaine (HCM, 2000).

Le modèle peut également posséder des propriétés indésirables, qu'il convient de vérifier. Elles correspondent à des erreurs de programmation ou des défauts de modélisation.

7.1. Validation/vérification du programme

Une fois le modèle développé, celui-ci est codé dans un langage informatique, et est capable de produire certaines données de sortie spécifiées par l'utilisateur. La phase de validation/vérification du programme permet d'apporter un élément de réponse aux questions suivantes :

- Les hypothèses microscopiques trouvent-elles une justification macroscopique ?
- À quel degré peut-on faire confiance à quelles données de sortie ?
- À quel point le modèle est-il transposable pour différentes situations ?

Hellinga (1998) décrit comment effectuer une étude compréhensive de ces trois problématiques. Son approche comprend trois étapes :

1. Validation : cette procédure consiste à vérifier si le code informatique produit des comportements correspondant au modèle développé.
2. Vérification : il s'agit de vérifier en quelle mesure le modèle produit des comportements proches de la réalité.
3. Calibration : l'utilisateur du modèle détermine les données d'entrée, afin que la simulation fournisse un résultat approchant une réalité locale.

La tâche du développeur consiste donc à effectuer la validation et la vérification du modèle et à proposer une méthode de calibration. Cette dernière a fait l'objet au Chapitre 6 du paragraphe Variables d'entrée. Les deux premiers points sont analysés selon la grille de lecture suivante, telle qu'introduite par List et Troutbeck (2000) :

1. Définition du problème : les hypothèses simplificatrices dépendent du résultat à analyser. Elles ne doivent pas occulter un phénomène important pour cette analyse;
2. Continuité : le modèlisateur doit identifier les comportements qui pourraient s'avérer discontinus et proposer une méthode de vérification de la continuité lorsque le comportement est continu;
3. Répétitivité : il s'agit d'observer comment se comporte la simulation lors de plusieurs réplications du modèle avec les mêmes données d'entrée mais avec différents générateurs de nombres aléatoires.
4. Consistance avec la théorie : il s'agit d'étudier les variables de sortie de la simulation pour éventuellement ne pas rejeter le modèle.

7.1.1. Validation

À cette étape sont associés deux objectifs :

1. vérifier qu'aucune hypothèse de modélisation ne conduit à des comportements irréalistes ;
2. assurer qu'aucune erreur de transcription de l'algorithme « textuel » en langage informatique n'a été effectuée.

La méthode consiste dans un premier temps à vérifier les propriétés globales du flux de véhicules, i.e. formation de pelotons, cohérence des comportements des conducteurs, vitesse de génération des véhicules... Le réalisme de la conduite est observé à travers le filtre des diagrammes distance temps et vitesse-temps (cf. Figure 7-1 et Figure 7-2) qui sont obtenus à partir de fichiers ASCII contenant les trajectoires de chaque véhicule. Ce niveau de compréhension global permet notamment de vérifier la validité des équations de mouvement et des choix effectués par les conducteurs.

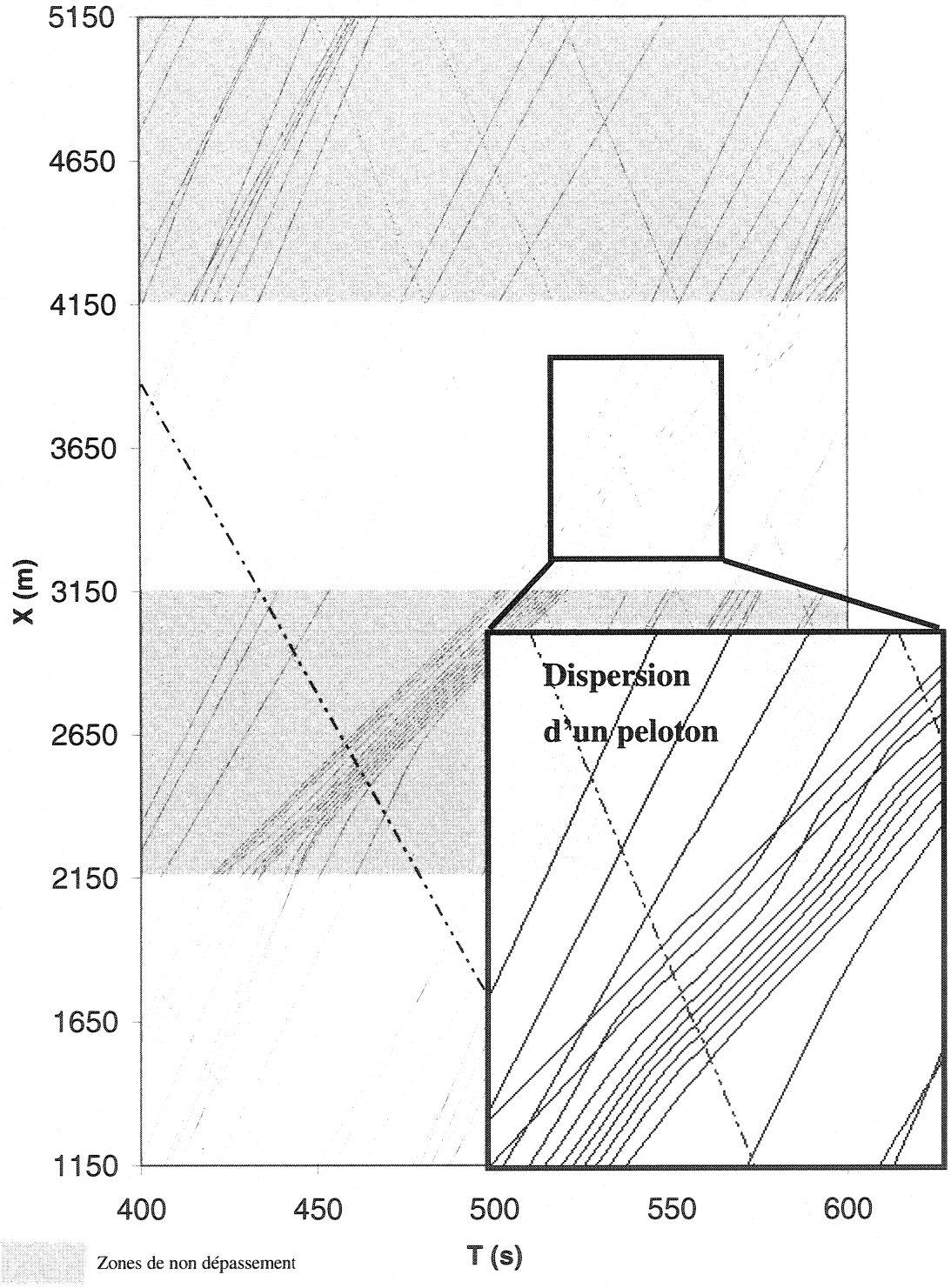


Figure 7-1 : diagramme X-T de base utilisé pour la procédure de validation

Par exemple, l'examen de l'introduction d'un modèle d'aide à l'achèvement du dépassement de la part du véhicule dépassé, a montré que celui-ci ne devait être appliqué qu'à partir du moment où le véhicule dépassant se situe devant le véhicule dépassé. Sans cette restriction, on assistait à l'arrêt complet de certains véhicules pour toute la durée de la simulation, ceux-ci se retrouvant constamment dépassés sans jamais pouvoir réaccélérer.

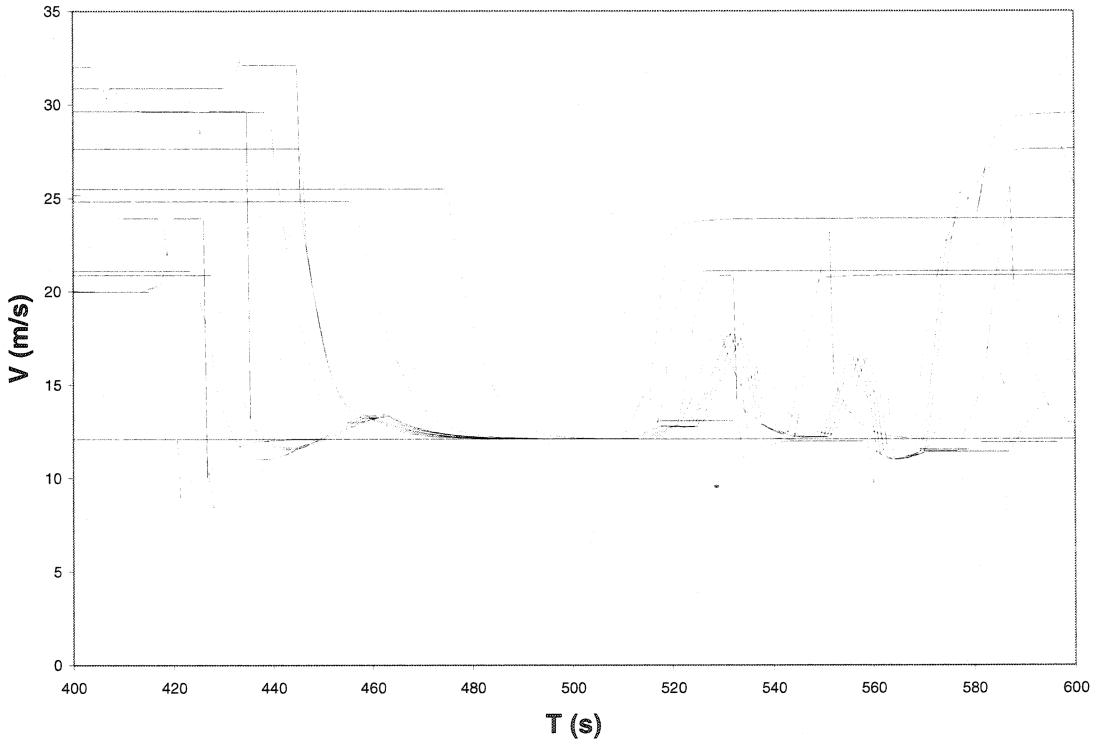


Figure 7-2 : diagramme V-T de base utilisé pour la procédure de validation

À partir de cette compréhension globale, il est possible de détecter des comportements locaux caractéristiques de certaines situations de conduite, d'importer les fichiers textes correspondant aux véhicules impliqués, puis d'examiner le comportement de cet échantillon plus faible de manière plus détaillée. La Figure 7-2 représente ainsi les vitesses des véhicules appartenant au peloton d'une dizaine de véhicules identifié sur la Figure 7-1.

Cette inspection a été effectuée sur une très grande variété de débits dans chaque sens (de 0 à 1700 veh/h), de longueurs de route simulée (entre 1 et 15 km), de proportions de camions (0 à 50 %) et de durée de simulation (entre 15 minutes et 2 heures). Outre le test des hypothèses du modèle, elle a également permis la détection et la correction d'erreurs de rédaction du programme.

Une deuxième étape avait pour but de vérifier la détermination de l'impatience, afin de détecter si des prises de décision irréalistes avaient lieu. Elle a consisté en une observation d'un peloton, à travers la trajectoire et les variations de vitesse et d'impatience de dépasser de chaque véhicule – production de schémas similaires à la Figure 7-2. Grâce à cette méthode, le modèle d'impatience a été progressivement modifié jusqu'à l'obtention des fonctions d'appartenance et des opérateurs logiques présentés au Chapitre 5 paragraphe Impatience de dépasser.

Finalement, des ordres de grandeur approximatifs des valeurs de certaines données de sortie (nombre de dépassements effectués, désirés, vitesse moyenne de parcours et pourcentage du temps passé à suivre) étaient connues à travers des relevés terrain (Farber et Silver, 1967), d'autres études microscopiques (SIMLA ++, SSIUEL) ou des normes (HCM, 2000). Le nombre de dépassements effectués par heure et par kilomètre permettait notamment d'avoir un aperçu rapide de la validité de la simulation. Parallèlement, certaines données de sortie comme le nombre d'accidents (i.e. le nombre de fois où un véhicule dépasse la position du pare-choc arrière du véhicule précédent ainsi que le nombre de fois où le véhicule dépasse la position du pare-choc avant du véhicule opposé dans le cas du dépassement) permettaient également rapidement de vérifier si les simplifications du modèle conduisaient à un trafic instable.

La validation nous permet donc de juger que le modèle est correctement défini et a un comportement continu dans le domaine hors congestion (débits directionnels inférieurs à 1700 uvp/h).

7.1.2. Vérification

La vérification doit nous permettre de tester deux autres propriétés que doit vérifier le modèle, à savoir son adéquation à la théorie, dans les conditions où celle-ci semble correctement établie et sa capacité à fournir des résultats exploitables avec un nombre de simulations restreint. Une série d'expériences a été conduite sur une route virtuelle de 1 km de longueur, sans zones de dépassement, sans poids lourds et avec une durée de simulation de 1 h 00. Vingt-cinq répétitions (chacune avec un germe pour la génération de nombres aléatoires distinct) ont été effectuées pour un débit Q_p dans le sens principal variant entre 25 et 1800 veh/h et un débit Q_s sur la voie opposée variant entre 25 veh/h et Q_p avec un pas de 25 veh/h ; un total de 65 700 simulations a donc été conduit.

Par ailleurs, il a été trouvé qu'en utilisant les distributions de vitesse désirée dérivées des données terrain de Saint Raymond (moyenne de 93 km/h et écart type de 9 km/h), les valeurs du HCM (2000) de pourcentage de temps passé à suivre (PTSF) étaient supérieures à celles obtenues par la simulation et celles de vitesse moyenne de parcours (ATS) étaient inférieures à celles obtenues dans la simulation, l'erreur croissant avec le débit. Il est supputé que la différence tient au fait que les formules du HCM (2000) ne tiennent pas compte de l'écart type des vitesses désirées. Considérons que l'écart type est élevé. Ceci a pour conséquence immédiate la génération d'une forte proportion de véhicules très lents. Dans des situations pour lesquelles aucun dépassement n'est possible (i.e. à haut débit), le nombre de véhicules qui vont rattraper des véhicules très lents et devoir les suivre est donc important. Ainsi ATS aura une valeur faible et PTSF élevée. Ce raisonnement simple conduit à l'affirmation selon laquelle ATS décroît avec l'écart type des vitesses désirées tandis que PTSF croît. L'influence de l'écart type est d'autant plus forte que le débit est élevé, car moins de dépassements sont possibles.

La valeur de l'écart type des vitesses désirées utilisé pour l'établissement du HCM 2000 n'est pas indiquée. Par conséquent, pour ces deux expériences, une vitesse

moyenne de 98 km/h[17] et un écart type de 17.5 km/h ont été choisis, qui ont permis d'obtenir des résultats comparables à ceux du HCM 2000.

7.1.2.1 Indicateurs du LOS (HCM, 2000)

Le logiciel de microsimulation TWOPAS a été utilisé pour obtenir les relations fondamentales entre les indicateurs ATS (km/h) et PTSF (%) et le débit d'entrée total V_p (veh/h) sur une route sans contrainte géométrique, ce qui signifie :

- Largeur de route supérieure ou égale à 3.6 m
- Accotements supérieurs ou égaux à 1.8 m
- Absence de zone de non dépassement
- Un seul type de véhicules : voitures particulières
- Pas de contrainte sur le trafic de la voie principale imposé par une intersection ou des véhicules effectuant un mouvement tournant.
- Terrain plat

Les équations de régressions obtenues pour l'établissement du HCM (2000) sont :

$$ATS = FFS - 0.0125\ V_p$$

$$PTSF = 100\ [1-e^{-0.000879vp}]$$

Les Figure 7-3 et Figure 7-4 indiquent les valeurs de PTSF et d'ATS dans le sens de circulation principal (c'est-à-dire celui ayant le débit le plus élevé) obtenues pour chacune des simulations ainsi que les courbes représentatives des formules ci-dessus. Les valeurs sont présentées en fonction du débit total (veh/h).

---

[17] Cette valeur supérieure à la moyenne déterminée pour les routes québécoises correspond à la valeur par défaut utilisée dans le logiciel de simulation TWOPAS, qui a été utilisé pour la rédaction du HCM (2000) ; la valeur de l'écart type correspond à l'emploi d'une méthode heuristique pour ajuster les résultats de nos simulations à ceux du HCM 2000

En termes d'ordre de grandeur et de tendance, les résultats des simulations sont très proches des formules du HCM (2000). L'analyse détaillée montre que :

Après ajustement de l'écart type et de la moyenne de la distribution des vitesses désirées, les simulations sous-estiment toujours les valeurs de PTSF. Une distinction fondamentale est liée au modèle de voiture suiveuse : dans notre modèle, une certaine proportion de véhicules entre en conduite gênée pour des écarts inférieurs à la valeur de 3s utilisée par le HCM, ce qui réduit d'autant la valeur du temps passé à suivre pour ces véhicules. En outre, la sous-estimation de PTSF tient à une différence dans le mode de calcul. Dans notre simulation, il est considéré qu'un véhicule suit lorsqu'il se retrouve dans un état autre que « conduite libre », ceci comprend donc les cas où le véhicule dépasse, est dépassé, ou suit un autre véhicule. Cependant, lorsqu'un véhicule change de voie pour effectuer son dépassement, le véhicule éventuel qui le suit se retrouve un instant en mode de conduite libre, jusqu'à ce qu'il ait rattrapé le nouveau véhicule précédent ; ce temps n'est donc pas considéré comme passé à suivre, au contraire du HCM. Lorsque le débit est faible, peu de dépassements ont lieu et en outre peu de pelotons de taille supérieure à deux se forment. L'écart entre notre mode de calcul et celui du HCM est donc faible. Lorsque le débit augmente, le nombre de dépassements effectués augmente tout d'abord, ainsi que la taille de pelotons. L'écart entre le HCM et notre indicateur atteint alors un maximum. Puis le nombre de dépassements effectués diminue et l'écart entre notre formule et celle du HCM diminue. Cette analyse descriptive s'applique effectivement à la Figure 7-3. Étant donné ces considérations, il est estimé que notre modèle permet une estimation satisfaisante de l'indicateur PTSF.

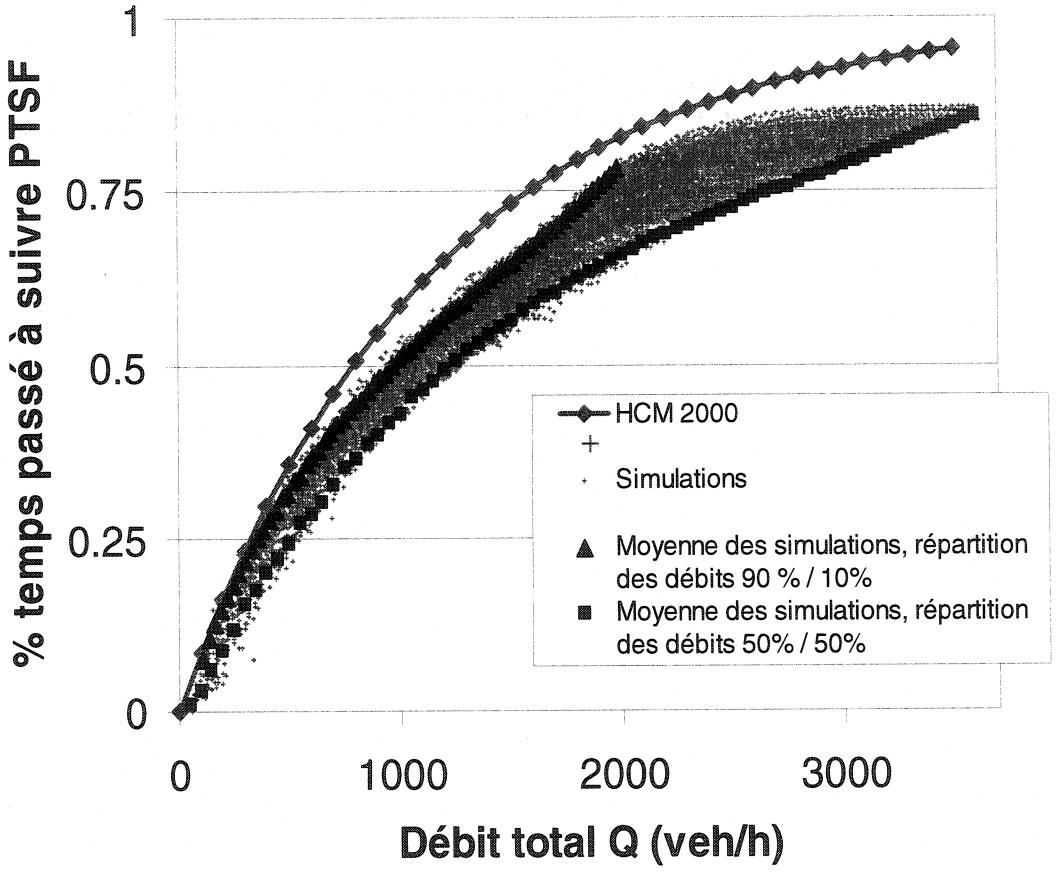


Figure 7-3: comparaison de la valeur moyenne du PTSF HCM 2000 / simulations

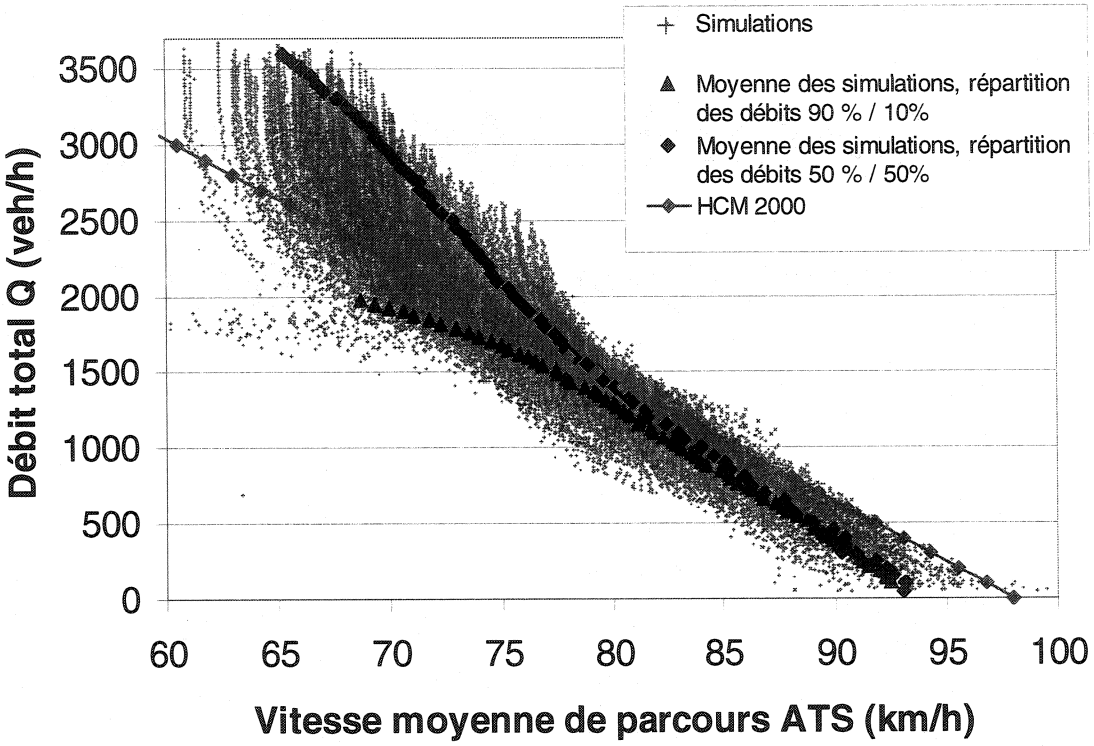


Figure 7-4 : comparaison des valeurs moyennes d'ATS HCM 2000 / simulations

➢ En ce qui concerne les valeurs d'ATS, les ordres de grandeur sont proches mais la forme diffère. Luttinen (2001b) explique la variation d'ATS selon la considération intuitive suivante :

> *"When platooning has decreased the ATS, the proportion of vehicles in a given flow increment having a desired speed lower than the ATS is smaller than at free-flow conditions. The impedance effect of the flow increment is also smaller."*

Selon Luttinen (2001b), la courbe ATS/Q est donc concave, et non pas linéaire comme proposé dans HCM (2000). Sur la Figure 7-4, le nuage de points ATS/Q présente effectivement une forme concave pour de faibles débits ; cependant, un point d'inflexion peut également être remarqué. En réalité, lorsque les débits totaux augmentent, le dépassement devient marginal et le trafic fonctionne comme sur une route à deux sens de circulation et deux voies séparées (situation urbaine, par exemple). Par conséquent, la courbe Q/ATS devient convexe. Cette convexité peut être expliquée par la probabilité plus importante de présence de véhicules très lents,

qui ont en outre un effet durable, car il devient impossible de dépasser. Notre étude ne considère pas les cas de congestion, très improbables sur routes rurales du fait d'une demande insuffisante.

- Pour chaque valeur de débit total, la variance des résultats est très importante. Deux sources de variabilité sont présentes : la répétition des simulations et la répartition des débits dans chaque sens de circulation. Afin de distinguer l'influence de chacune des sources, les valeurs moyennes de PTSF et d'ATS pour des répartitions de débit 50% / 50 % et 90% / 10% ont également été représentées sur les Figure 7-3 et Figure 7-4 ; ces deux cas représentent les deux situations extrêmes de répartition. En ce qui concerne PTSF, les courbes « moyennées », représentant les deux situations extrêmes de répartition du débit, sont situées aux frontières du nuage de points représentant chaque simulation, ce qui indique fortement que la variation est principalement liée à la répartition des débits. En ce qui concerne ATS, plus la répartition est déséquilibrée, plus les situations de rattrapage de véhicules lents par des véhicules rapides sont fréquentes sur la voie principale – car le débit y est plus important. Cependant, comme il y a moins de véhicules en sens opposé, le ratio dépassements effectués / dépassements désirés est plus important, par conséquent la répartition a peu d'effets sur ATS. Cette analyse est valable jusqu'à un certain seuil de débit total, pour lequel de moins en moins de créneaux de dépassements et de créneaux de retour après un dépassement sont disponibles. Dans ce cas, les éléments véhicule/conducteur dépassement moins et sont gênés pendant une plus forte proportion de temps, ce qui conduit à une valeur d'ATS inférieure. Cette analyse est corroborée par la Figure 7-3, pour laquelle les deux courbes moyennées en fonction des répartitions sont quasiment confondues pour des débits faibles, puis divergent rapidement. Les analyses des variances pour ATS et PTSF montrent donc que la variabilité peut dans une grande partie être expliquée par la répartition des débit, ce qui indique qu'une quantité réduite de réplications de la simulation peut produire de bons résultats.

Cette similitude des résultats de la simulation avec un élément théorique utilisé couramment pour le dimensionnement permet de justifier que la simulation produit pour les indicateurs de niveaux de service des résultats exploitables.

7.1.2.2 Nombre de dépassements effectués

Ainsi que rappelé au Chapitre 2 Rappels théoriques sur le dépassement, les modèles de Wardrop (1952) et de Normann (1942) sont les références quantitatives, le premier indiquant la quantité maximale de dépassements qui seraient effectués dans une route en conditions idéales et le deuxième constituant un relevé terrain du nombre de dépassement effectués, valable pour des répartitions de débits de deux tiers dans le sens principal et d'un tiers dans le sens opposé. Afin de positionner notre modèle par rapport à ces résultats, une deuxième série de simulations a été effectuée, avec une répartition du débit deux tiers un tiers, pour des débits dans le sens principal variant entre 25 et 1800 veh/h. Les autres paramètres restaient inchangés, 200 réplications ont été effectuées. Sur la Figure 7-5, le nombre de dépassement pour chaque simulation de la première et de la deuxième série, ainsi que les valeurs moyennes pour des répartitions 90% / 10% et 50% / 50% sont comparées avec les courbes représentatives des modèles de Normann (1942) et Wardrop (1952).

Tout d'abord, un accord satisfaisant avec les modèles de la littérature peut être constaté. Hormis pour les faibles débits, le nombre de dépassements se situe en dessous de la valeur indiquée par le modèle de Wardrop. En ce qui concerne les débits faibles, la moyenne des simulations pour la répartition 90%/10% est située au dessus de la courbe représentative du modèle de Wardrop. En fait, étant donné que peu de véhicules sont produits, plus de simulations sont normalement nécessaires pour obtenir une description représentative de la variété des cas. Il se peut donc qu'une trop forte proportion de vitesses désirées élevées soit produite, augmentant ainsi artificiellement le désir de dépassements.

Le nombre de dépassements effectués pour une répartition deux tiers un tiers coïncide avec le modèle de Normann jusqu'à la valeur de débit correspondant au nombre maximum de dépassements effectués. La décroissance selon le modèle de Normann est ensuite plus nette. Il est supposé que les capacités dynamiques des véhicules de l'époque sont en cause, qui permettaient des débits totaux maximum de 1900 veh/h (au lieu de 3400 veh/h actuellement, selon le HCM, 2000).

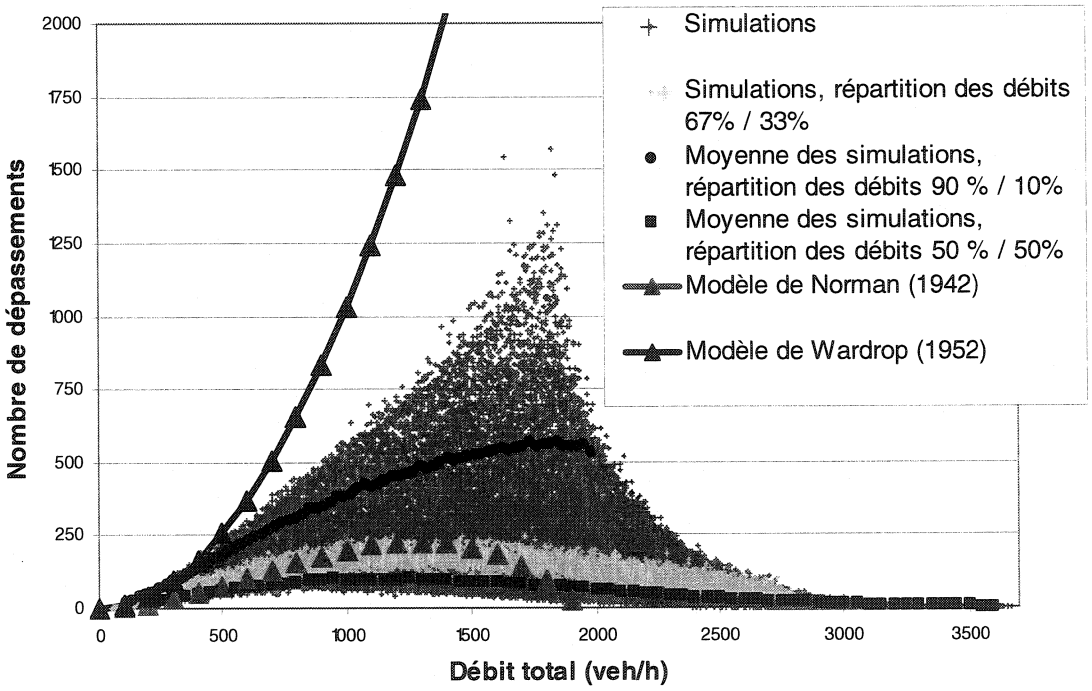


Figure 7-5 : évolution du nombre de dépassements en fonction du débit total

Finalement, il convient de noter que le nuage de points représentant le nombre de dépassements est situé entre trois frontières :

1. Nombre de dépassements maximal, lorsque le débit total est inférieur à la capacité, il est obtenu pour une répartition 100% / 0% ;
2. Nombre de dépassements minimal, lorsque le débit total est inférieur à la capacité, il est obtenu pour une répartition 50 % / 50 % ;
3. Nombre de dépassements lorsque le débit est inférieur à la capacité.

L'étude du dépassement lors des périodes de congestion n'est donc pas abordée par notre modèle. Hors congestion, il s'est par contre avéré que la simulation produisait des résultats satisfaisants.

7.1.2.3 Distribution des vitesses désirées

La consistance du modèle en ce qui concerne la distribution des vitesses désirées est ici testée. Cette distribution a été déterminée sur le terrain (site de Saint Raymond) en étudiant les véhicules circulant seuls (i.e. les véhicules ayant un écart t_s valant au moins 5 s avec le véhicule suivant et t_p au moins 15 s avec le véhicule précédent). Il est possible d'extraire de la simulation cette même population de véhicules, en un point quelconque du parcours et de vérifier par des tests statistiques que la distribution des vitesses « libres » correspond à la loi normale injectée.

Il ne s'agit pas ici d'un test portant sur la qualité de notre générateur de nombres aléatoires ; celui-ci a été étudié par le test du Khi Deux pour diverses distributions et il s'est avéré performant. Il s'agit de vérifier si la construction de la population des véhicules circulant « seuls » permet d'obtenir un échantillon représentatif pour la détermination de la distribution des vitesses désirées. Dans un premier temps, cette hypothèse a été testée en simulant une section sans zone de dépassement. La Figure 7-6 représente les distributions de vitesse obtenues et la distribution théorique des vitesses désirées – cf. Chapitre 6 paragraphe Éléments véhicule/conducteur. Elle confirme une remarque importante effectuée précédemment, selon laquelle la fonction de répartition des vitesses désirées se situe entre la fonction de répartition des vitesses des véhicules circulant seuls (i.e. t_s = 5 s et t_p = 15 s) et celle des véhicules circulant librement (i.e. t_p=8s et t_s = 0 s).

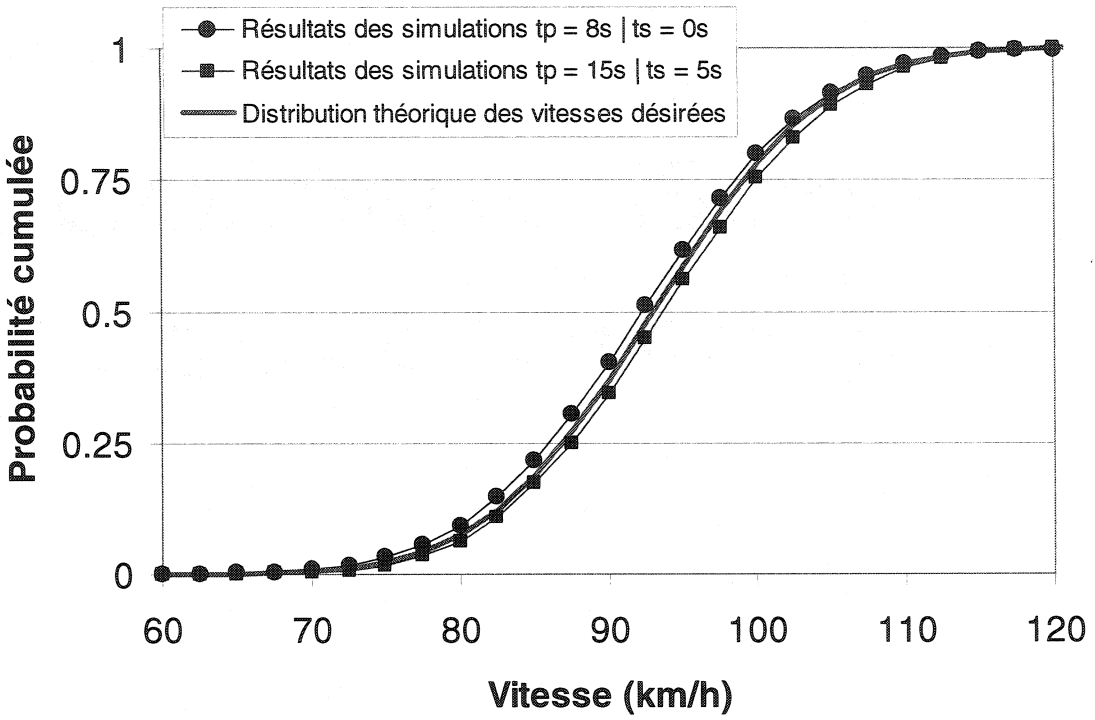


Figure 7-6 : fonction de répartition des vitesses désirées, comparaison simulation/distribution théorique, sans zones de dépassement

Le test du Khi Deux indique que la distribution des vitesses des véhicules seuls suit une loi normale de moyenne 93.7 km/h et d'écart type 9.06 km/h avec un niveau de confiance de 95 %, à comparer à une loi théorique normale de moyenne 93 km/h et d'écart type 9 km/h. Étant donné qu'uniquement 25 réplications ont été conduites, ce résultat paraît satisfaisant.

Cependant, lorsque des zones de dépassement sont introduites dans la simulation, deux phénomènes entrent en jeu, perturbant la distribution obtenue :

1. Lors de la réalisation d'un dépassement, il est probable que le véhicule dépassant atteigne une vitesse supérieure à sa vitesse désirée. Étant donné que le conducteur ne freine ensuite qu'avec l'aide de la résistance aérodynamique, ces vitesses élevées peuvent persister pendant une longue durée. Or, ces véhicules seront catégorisés « libres ». La distribution des vitesses désirées est donc décalée vers les vitesses supérieures.

2. Si un véhicule n'a pas encore atteint sa vitesse désirée après avoir effectué un dépassement, il accélère selon le modèle « voiture libre » pour atteindre cette vitesse. Cette catégorie de véhicules sera également considérée dans l'échantillon pour le calcul de la vitesse désirée. La distribution des vitesses désirées est alors décalée vers les vitesses inférieures.

La série de simulations précédente a donc été reprise en introduisant sur les 500 premiers mètres une zone de dépassement. Le point de mesure des vitesses est situé 500 m en aval de la zone de dépassement. Les distributions théoriques, observées et issues de la simulation sont représentées sur la Figure 7-7. Contrairement au cas précédent, il a pu être établi par un test du Khi Deux avec un risque de 5 % que la distribution n'était pas normale.

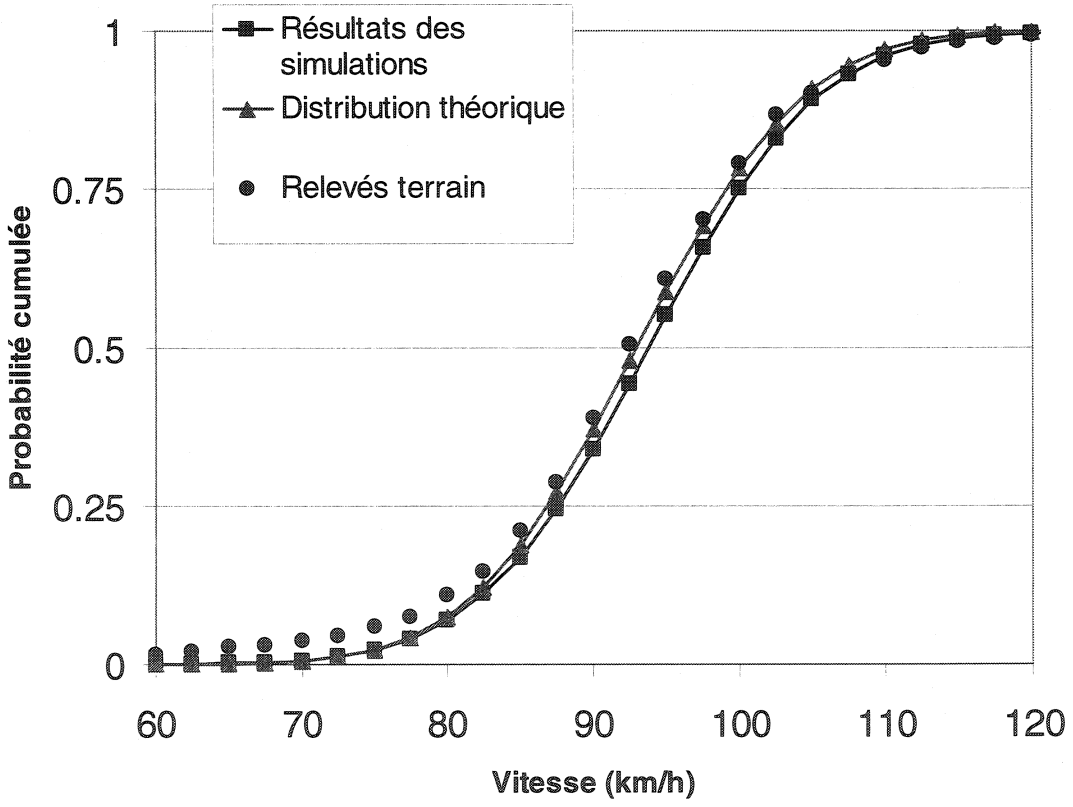


Figure 7-7 : distribution des vitesses désirées, comparaison simulation/distribution théorique, avec zones de dépassement

À proximité d'une zone de dépassement, la simulation et la méthode de relevé des vitesses désirées ne sont donc pas consistantes, bien que l'erreur commise semble relativement faible (de l'ordre de 1 km/h pour les moyennes).

Il est donc recommandé pour l'établissement de la distribution des vitesses désirées :

1. d'effectuer les mesures en aval d'une zone de dépassement, à une distance supérieure à 500 m; les zones de dépassement en amont n'ont pas d'influence.
2. de considérer les populations de véhicules circulant « seuls » et circulant « librement ».
3. d'inférer la distribution théorique des vitesses désirées à partir des distributions correspondant à ces deux échantillons selon une méthode à développer s'inspirant des techniques utilisées pour la détermination des créneaux critiques (cf. Brilon, Koenig et Troutbeck, 1999)
4. d'effectuer un relevé des distributions de vitesse issues de la simulation selon la méthode utilisée pour les relevés terrain ;
5. de comparer cette distribution avec la distribution théorique définie comme variable d'entrée de la simulation, et ainsi de vérifier la consistance du programme pour la situation spécifique considérée.

7.1.2.4 Manoeuvre de dépassement

L'objectif de ce paragraphe est d'observer si la manœuvre de dépassement produite est réaliste dans ses composantes décisionnelles et dynamiques. Le domaine de fonctionnement d'un dépassement peut être trouvé dans la littérature. Outre les données moyennes collectées lors de l'analyse de littérature par (Farber et Silver, 1967), trois études exhaustives des propriétés de dépassement sont disponibles dans la littérature :

- Troutbeck (1982) injecte des véhicules de longueur variant entre 5 et 21 m de longueur, avec pour objectif principal de déterminer comment la décision

d'initier un dépassement est prise. Son étude concerne quatre routes (parcourues sur toute leur longueur) et tous les types de manœuvres.

- Farber (1969) investigue le dépassement retardé, de nuit et de jour. Son étude est également principalement orientée sur l'acceptation des créneaux. Les caractéristiques d'une des deux sections de route sur lesquelles les relevés ont été effectués sont documentées exhaustivement (longueurs, distance de visibilité, débit et distribution des vitesses).

- Polus et Tomecki (1987) utilisent deux véhicules instrumentés, introduits sur une route réelle, le conducteur du deuxième véhicule recevant l'instruction de dépasser le premier véhicule. Toutes les caractéristiques du dépassement sont établies dans le but de calibrer un modèle normatif de distance de visibilité nécessaire pour l'établissement des zones de dépassement.

(a) Offre et demande de dépassement

Ces paramètres dépendent fortement de la configuration de la route en termes de disposition des zones de dépassement, distance de visibilité et répartition du trafic. Par conséquent, la simulation doit reproduire une situation de trafic existante pour que la comparaison prenne une valeur. Seule l'expérience de Farber (1969) nous permet une tentative de reproduction des conditions de simulation – cf. annexe G, car les autres sont insuffisamment documentées. Le protocole de mesure élaboré par Farber est le suivant :

- Un véhicule lent LC conduit par des opérateurs est introduit au bout d'une zone de dépassement lorsqu'un véhicule en situation de conduite libre se présente ;

- Dès l'arrivée de LC dans la zone de dépassement suivante, les dates de passage des véhicules en sens opposé vis-à-vis de LC sont enregistrées ainsi qu'une estimation des vitesses de parcours de ces mêmes véhicules opposés, de même que les dates de début et de fin de dépassement. Ceci

permet de reconstituer la distribution des opportunités de dépassement qui se présentent ainsi que la distribution des créneaux de dépassements acceptés et du temps passé sur la voie opposée.

- Trois situations de dépassement sont distinguées : de jour et de nuit, avec un véhicule en sens opposé intervenant à un instant du dépassement dans le champ de visibilité; de nuit, sans véhicule en sens opposé intervenant à un instant du dépassement dans le champ de visibilité.

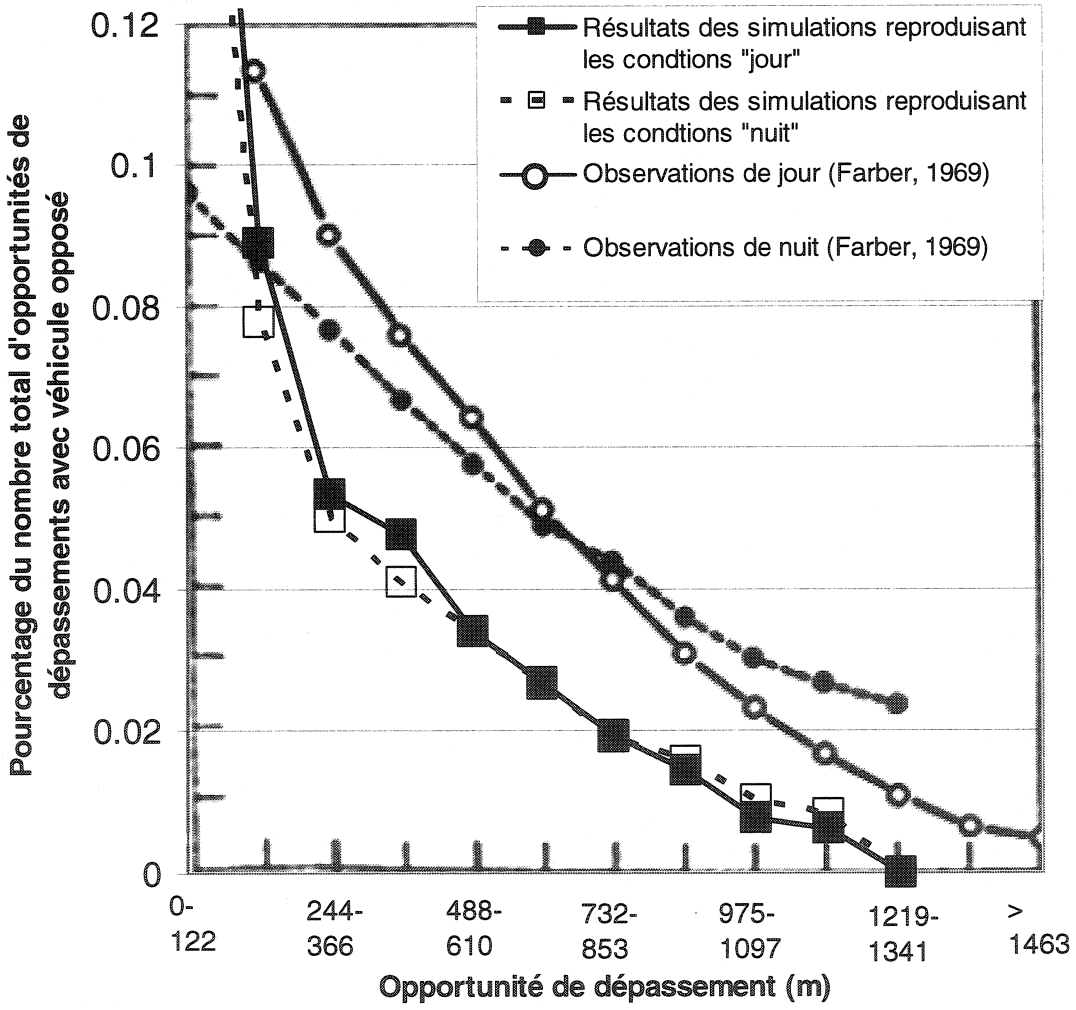


Figure 7-8 : distribution des opportunités de dépassement avec véhicule en sens opposé, reproduction de l'expérience de Farber (1969)

Dans les figures suivantes, les résultats des simulations sont superposés sur les diagrammes originaux représentatifs des données d'observation des expériences de Farber (1969). Comme ces dernières étaient présentées en système de mesure des longeurs impérial, une conversion a dû être effectuée, qui a été arrondie au mètre.

Dans la simulation, nous avons procédé selon la même méthodologie (introduction de véhicules, distinction des cas nuit/jour). Cependant, les opportunités de dépassement effectives ont été mesurées, plutôt qu'une estimation à partir de la date à laquelle LC rencontre un véhicule opposé. Les Figure 7-8 et Figure 7-9 présentent la distribution d'opportunités de dépassements avec (respectivement sans) véhicule en sens opposé exprimée comme le pourcentage du nombre total d'opportunités avec (respectivement sans) véhicule en sens opposé.

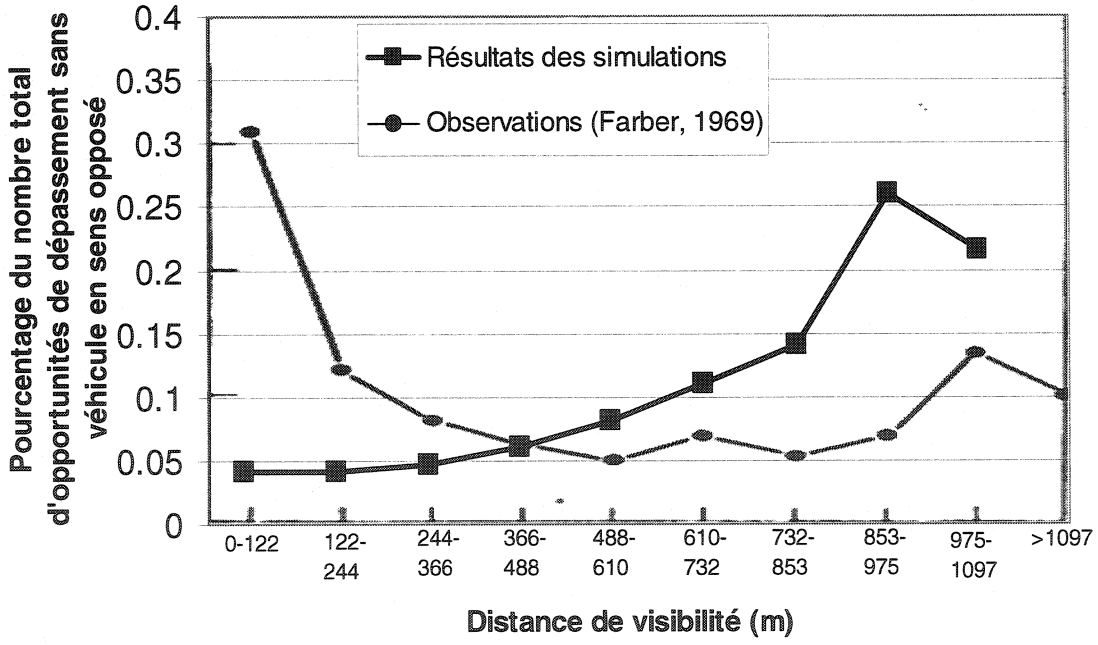


Figure 7-9: distribution des opportunités de dépassement sans véhicule en sens opposé, reproduction de l'expérience de Farber (1969)

Le modèle diverge fortement des résultats expérimentaux. Il a été trouvé que ces divergences s'expliquent par les approximations réalisées dans le protocole de relevés sur le terrain : notamment, le nombre d'opportunités de dépassement sans véhicules

arrivant en sens opposé est largement sous estimé par Farber (1969). De fait, il est difficile de juger si les simulations reproduisent fidèlement la réalité du terrain. Par conséquent, l'analyse des créneaux de dépassement acceptés ne peut avoir qu'une valeur indicative.

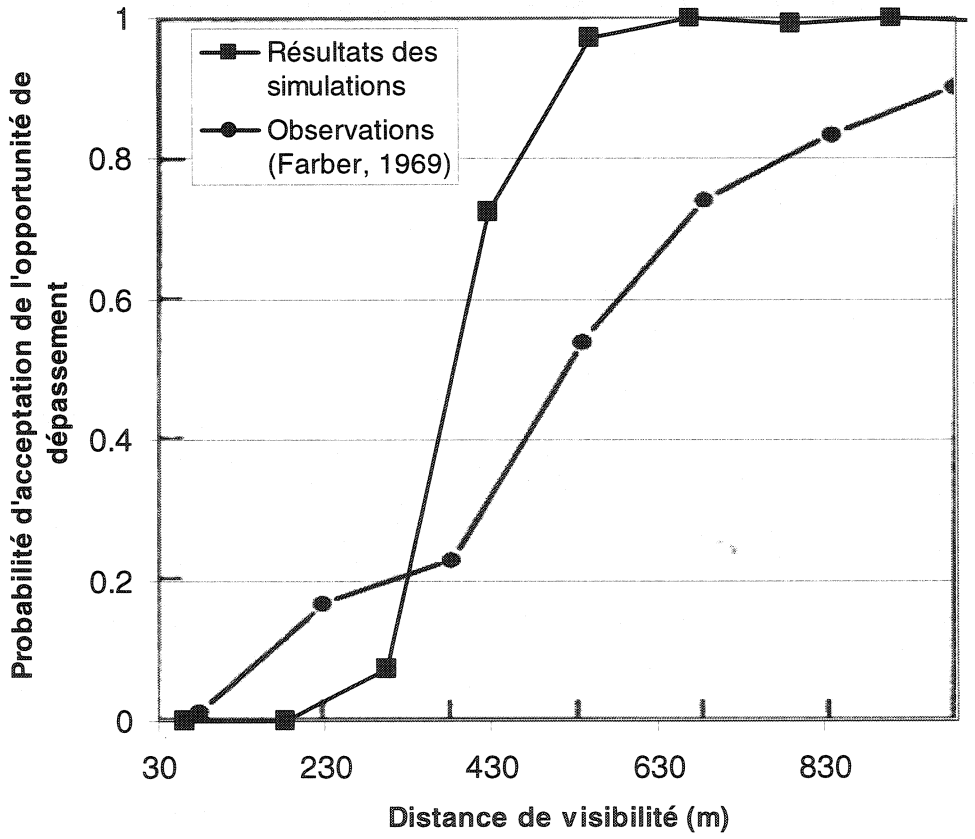


Figure 7-10 : probabilité d'acceptation des créneaux de dépassement avec véhicule en sens opposé

Les courbes représentatives des distributions de demande de dépassements avec (respectivement sans) véhicule en sens opposé – exprimée pour des classes d'opportunités de largeur 121.92 m comme le pourcentage d'opportunités acceptées parmi le nombre total d'opportunités dans la classe – sont néanmoins produites sur les Figure 7-10 et Figure 7-11. En ce qui concerne l'acceptation des créneaux de dépassement, notre modèle est conservateur par rapport aux données de Farber pour les très faibles créneaux (< 250 m). A contrario, les conducteurs sont plus agressifs pour

les créneaux importants. Il est inféré que cette situation provient du paramètre d'agressivité de base des conducteurs, qui ne serait pas distribué normalement. Si l'offre avait été comparable entre le modèle et l'expérience terrain, il aurait été possible de calibrer la composante d'impatience de dépasser de telle sorte que la courbe obtenue par simulation soit ajustée à la courbe relevée sur le terrain.

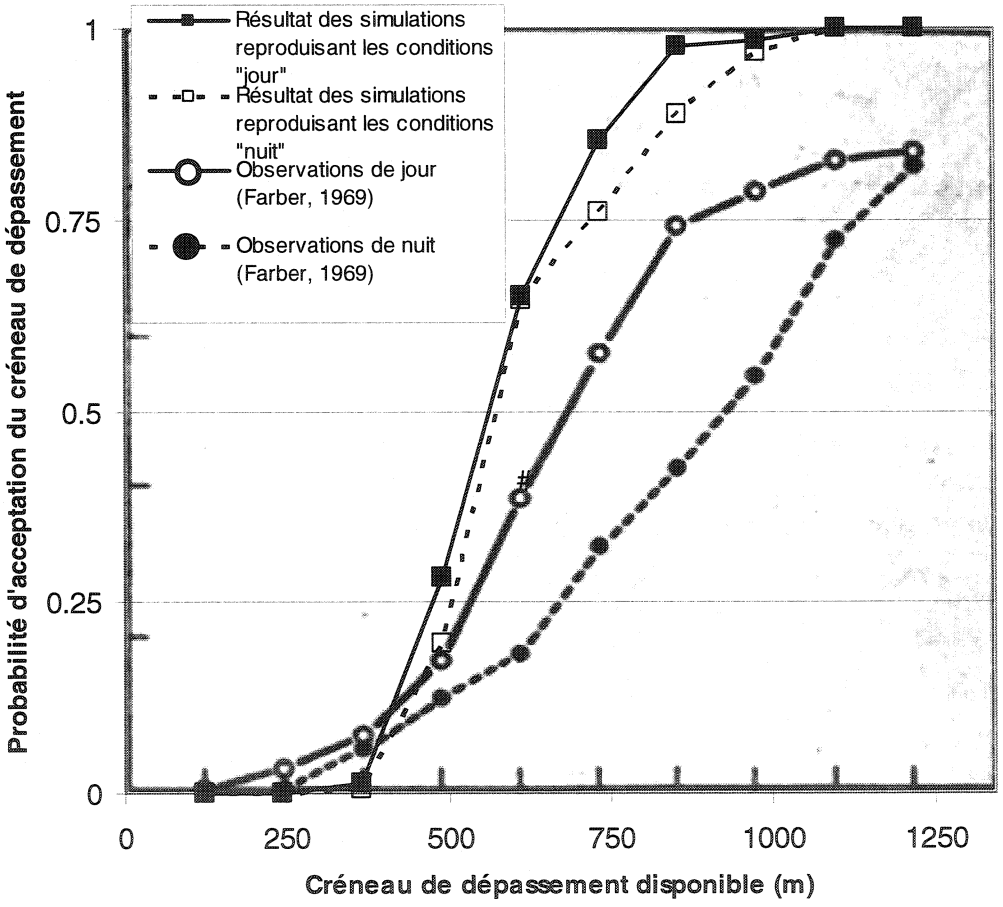


Figure 7-11 : probabilité d'acceptation des créneaux de dépassement sans véhicule en sens opposé

L'expérience de Farber constituait la seule source de relevés suffisamment documentée pour être reproduite par simulation. Elle ne nous permet pas de conclure définitivement quant à la qualité de notre modèle, du fait de l'incompatibilité entre les données relevées par Farber et certaines situations réelles.

Il semble cependant que notre modèle de génération des véhicules combinant une distribution générique et une zone tampon soit trop rigide. Le développement d'un algorithme permettant d'ajuster la génération à des relevés terrain d'écarts intervéhiculaires est conseillé. Une telle méthode est par exemple fournie dans Fluteaux (2003).

En outre, la réalisation d'une expérience déterminant les mêmes variables que dans l'expérience de Farber est conseillée pour calibrer et valider le modèle d'offre et de demande de dépassement sur le réseau routier québécois. Une attention particulière devra cependant être portée au relevé terrain des opportunités de dépassement.

(b) Caractéristiques dynamiques des dépassements

La dynamique d'une manœuvre de dépassement peut être principalement caractérisée par les créneaux pré- et post- dépassement d'une part, et d'autre part le temps passé et la distance parcourue sur la voie opposée. Ces propriétés dépendent de nombreux paramètres : rapport poids puissance du véhicule, accélération maximale et vitesse désirée du conducteur lors d'une manœuvre de dépassement, agressivité du conducteur lors la décision de changer de voie et de se réinsérer. La calibration des propriétés est donc une tâche complexe (de nombreux facteurs sont corrélés), pour laquelle aucun exemple n'est proposé dans les modèles de simulation dont le présent projet a fait une revue.

L'analyse du comportement des conducteurs a été effectuée sur une base la plus générique possible ; par conséquent, afin d'obtenir des caractéristiques cohérentes, il est conseillé de procéder à une estimation minutieuse des variables d'entrée ainsi que proposé dans le Chapitre 6 Implémentation d'un outil d'évaluation des dépassements.

Dans l'esprit de vérification de l'absence de comportements irréalistes du modèle qui est proposé dans ce mémoire, les valeurs moyennes des variables précitées, obtenues pour 10 réplications d'une simulation de 1 heure sur une zone de dépassement de 1 km de longueur, avec un débit total de 1400 veh/h équilibré entre les deux sens et 15 % de

poids lourds, sont comparées aux données citées dans Troutbeck (1981) – qui expose également les résultats de Prisk (1941) et Matson et Forbes (1938) – et Polus (1987) ; certains résultats fournis par SSIUEL sont également présentés. Afin de procéder à cette comparaison, il était nécessaire de distinguer les catégories de dépassement identifiées au Chapitre 5 paragraphe Classification des dépassements. Dans la simulation, un dépassement est considéré comme retardé si la vitesse du véhicule dépassant au moment de la prise de décision est au plus égale à celle du véhicule dépassé ; il est lancé sinon. Les résultats de l'investigation sont repris dans la Figure 7-12, le Tableau 7-1, le Tableau 7-2 et le Tableau 7-3. Il apparaît que les résultats de nos simulations adhèrent correctement aux relevés terrain essentiellement en ce qui concerne le passé sur la voie opposée. Il semble que des efforts de recherche supplémentaires concernant le changement de voie lors de l'initiation et de l'achèvement du dépassement soient nécessaires. Ce résultat ne reflète qu'un cas précis et doit donc être pris comme valeur indicative – c'est pourquoi la comparaison s'arrête à ce niveau de détail « général ».

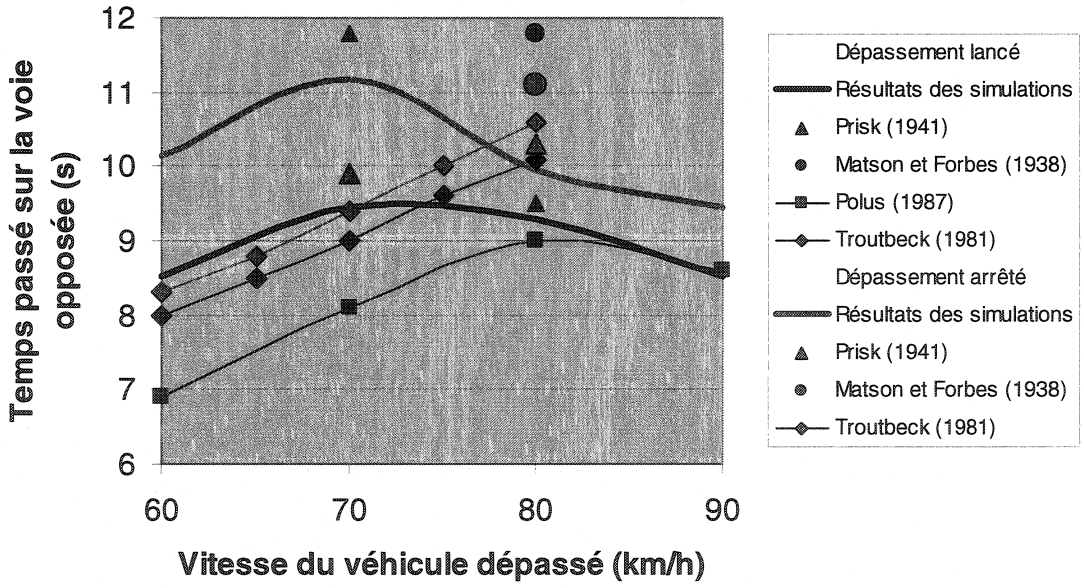


Figure 7-12: temps passé sur la voie opposée lorsque le véhicule dépassé est un véhicule particulier

Tableau 7-1 : temps passé sur la voie opposée lorsque le véhicule dépassé est un poids lourd

Vitesse du véhicule dépassé (km/h)	Longueur (m)	Temps passé sur la voie opposée (s)		Source
		Dépassement lancé	Dépassement retardé	
60	9	8.5	8.8	Troutbeck (1981)
70	9	2.6	9.9	Troutbeck (1981)
60	20	10.1	10.1	Troutbeck (1981)
70	20	11.4	11.5	Troutbeck (1981)
60	Poids lourd	9.89	12.44	Résultats des simulations
70	Poids lourd	11.16	13.74	Résultats des simulations

Tableau 7-2 : créneau post dépassement

	Sources			
Type de dépassement	Matson et Forbes (1938)	Résultats des simulations	SSIUEL	Polus (1987)
Arrêté retour libre	26 m	14.31 m	22.2 m	29.8 m
Lancé retour libre	27.4 m	13.66 m		
Arrêté retour forcé	19.8 m	14.44 m		
Lancé retour forcé	12.2 m	13.60 m		

Tableau 7-3 : créneau pré dépassement

Type de dépassement	Source		
	Résultats des simulations	Matson et Forbes (1938)	SSIUEL
Retardé	25.34 m	12.2 m	18.8 m
Lancé	28.05 m	21.3 m	

7.2. Exemple d'analyse sur une section de la route 101

Les paragraphes précédents ont permis de distinguer que le modèle vérifiait les propriétés générales de circulation sur une route rurale. Si le manque de données de validation ne permet pas à ce stade de réaliser une étude complète examinant l'influence de certains aménagements routiers, un exemple peut être proposé à titre indicatif, afin de tester les capacités de l'outil construit et de suggérer une démarche d'utilisation. Il s'agit ici par exemple d'analyser l'effet combiné de la pente et des longueurs de zones de non dépassement sur la formation de pelotons. À titre de rappel, il avait été établi au Chapitre 2 Définition de mesures d'efficacité pour le dépassement que les données disponibles pour l'analyse doivent être désagrégées spatialement et conduire à une compréhension des motivations des conducteurs liées aux choix de dépassement.

La section 33 de la route 101 est choisie pour la réalisation de cet exemple. En effet, des données de visibilité et de localisation des zones de dépassement fiables y sont disponibles (cf. Chapitre 4 Créneaux de dépassement offerts). La section analysée s'étend du chaînage 0+493 au chaînage 5+250. Les variables d'entrée utilisées sont décrites au Chapitre 6 paragraphe Variables d'entrée. La zone se situe intégralement en milieu rural, à la sortie de Rouyn Noranda. Des relevés de débits ont été effectués en aval de la zone dans le sens Sud-Nord. La situation critique, pour laquelle le débit total est maximum, est ici observée : elle a lieu entre 16 h 00 et 18 h 00 ; durant cette période, le débit vaut 250 veh/h dans le sens Sud-Nord[18] et 150 veh/h dans le sens Nord-Sud, dont 10 % de poids lourds dans chaque sens. Les relevés de vitesse disponibles étant agrégés temporellement, il est impossible de conduire une estimation

[18] Sur la route 101, le sens des chaînages croissants correspond également au sens Sud/Nord

de la distribution des vitesses désirées. Les données obtenues à Saint Raymond sont donc conservées.

100 réplications de la simulation de une heure de circulation réelle ont été effectuées. Elles nous permettent d'obtenir un ensemble de résultats descriptifs, que nous pouvons mettre en relation avec la géométrie et la localisation des zones de dépassement.

7.2.1. Taille des pelotons

Dans un premier temps, l'analyse porte sur la formation et à la dispersion des pelotons. En effet, un niveau de service individuel satisfaisant est offert lorsque la majorité des conducteurs peut circuler selon son programme de conduite propre, donc en dehors d'un peloton. Deux facteurs influencent la taille des pelotons : la taille des zones de non dépassement et la longueur et pente des courbes verticales. Les Figure 7-13 et Figure 7-14 permettent d'étudier leur effet combiné. Les zones de dépassement dans chaque sens y sont représentées par des rectangles translucides.

Sur la section-exemple choisie, la taille moyenne des pelotons varie entre 3 et 4.5 dans le sens Sud-Nord et entre 2 et 3 dans le sens Nord-Sud. Le relief y comporte des pentes faibles et de courte longueur. La représentation graphique permet de confirmer l'intuition : la formation de pelotons est due sur cette portion de la route 101 principalement à la longueur des zones de non dépassement. Ainsi, si entre les chaînages 1+250 et 1+600 se situe dans le sens Sud-Nord une section montante de 300 m avec une pente maximum de 4 %, celle-ci n'affecte pratiquement pas la taille du peloton, alors qu'il s'agit du début d'une zone de non dépassement. Ceci signifie que l'effet de cette pente n'est pas suffisant pour que les véhicules libres rattrapent immédiatement les poids lourds. La représentation de la taille des pelotons en fonction du profil en long présente donc ici un intérêt limité. Dans des zones plus montagneuses, elle permettrait cependant de distinguer les rôles respectifs des deux facteurs, ce qui constituerait un outil précieux pour la conception ou l'amélioration des routes.

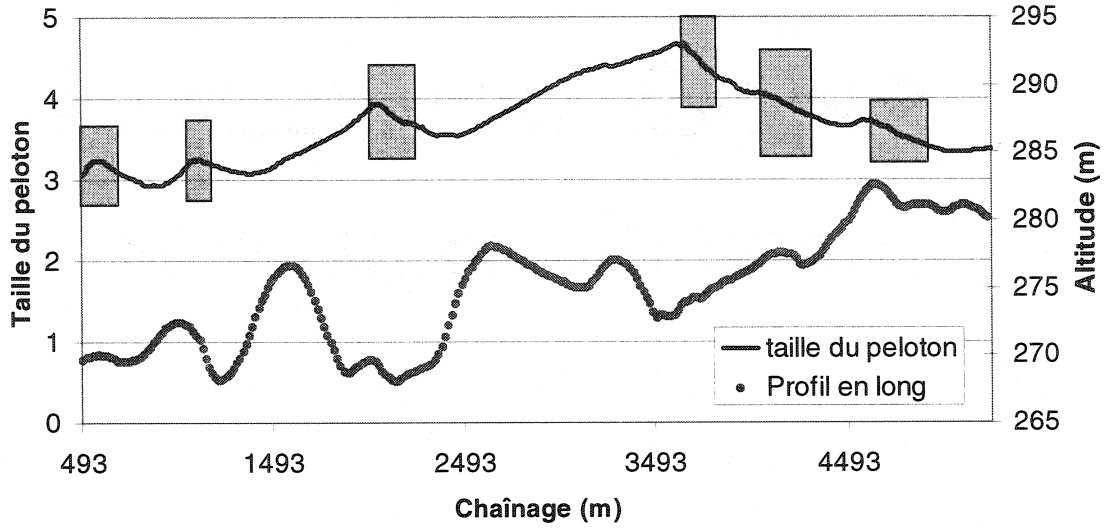


Figure 7-13 : taille moyenne du peloton sur la route 101, sens Sud-Nord

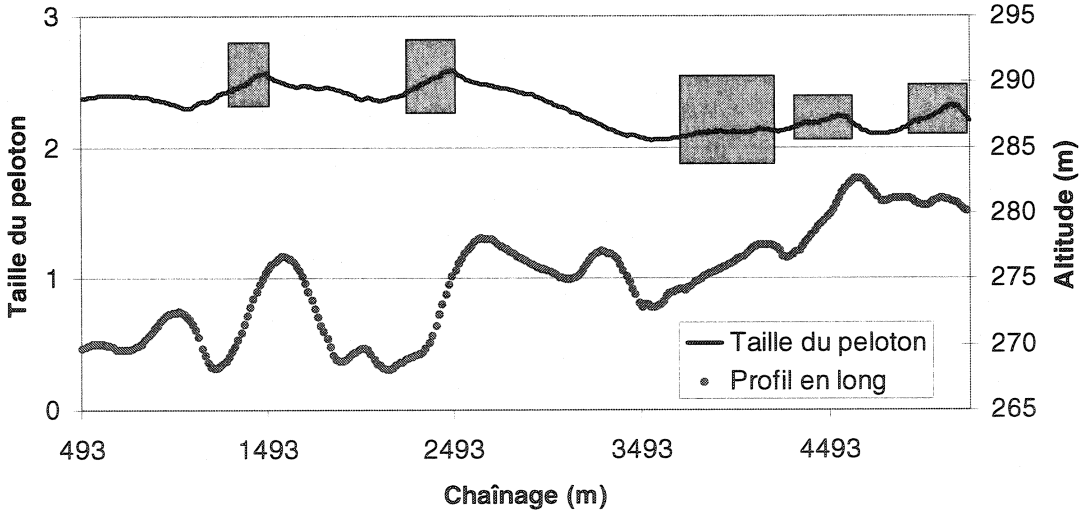


Figure 7-14: taille moyenne du peloton sur la route 101, sens Nord-Sud

Il apparaît en outre que la troisième zone de dépassement (entre les chaînages 3+708 et 4+219) dans le sens Nord-Sud n'a pas d'impact sur la taille des pelotons. A contrario, il serait déterminant dans l'autre sens de circulation de disposer sur cette section (chaînages 3+ 500 à 4 + 500) d'une zone de dépassement de taille la plus importante possible, car la taille moyenne des pelotons y est maximale. Cette remarque nous

conduit à suggérer de réaménager les zones de dépassement dans ce secteur de la route 101 en faveur du sens Sud-Nord. L'exemple analysé ne correspond cependant qu'à la situation d'heure de pointe du soir. Lors de l'heure de pointe du matin, les débits sont inversés (200 veh/h dans le sens Nord-Sud et 100 veh/h dans le sens Sud-Nord), et il faut donc vérifier si un phénomène inverse se produit dans ce cas avant de procéder à une conclusion.

7.2.2. Moyenne des vitesses instantanées

L'analyse des vitesses moyennes est effectuée de manière similaire à celle des tailles de peloton. La Figure 7-15 présente les variations des vitesses instantanées dans les deux sens de circulation, les zones de dépassement dans chaque sens étant représentées par les rectangles translucides encadrant la courbe correspondant au même sens de circulation.

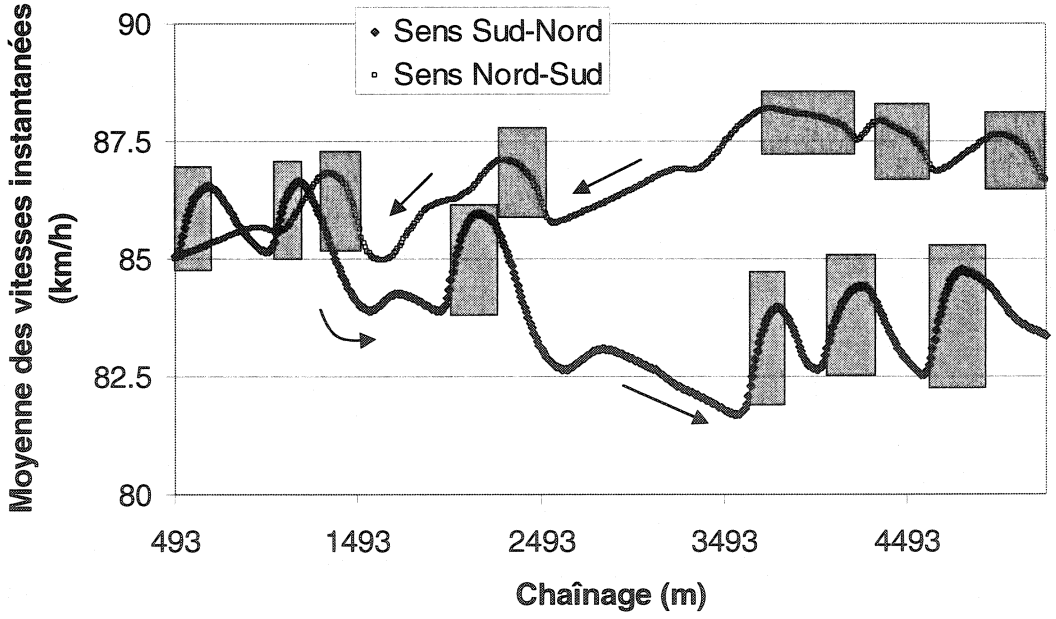


Figure 7-15 : moyenne des vitesses instantanées sur la route 101

Les vitesses instantanées sont sensibles aux mêmes paramètres que la taille des pelotons : longueur de la zone de dépassement et éléments géométriques du profil en

long. De manière similaire à l'analyse précédente, il a été constaté que les vitesses instantanées sont peu sensibles au profil en long sur la section de route analysée. Il a donc été choisi de ne pas représenter le profil en long sur la Figure 7-15.

La variation de la moyenne des vitesses instantanées est en outre très faible (de l'ordre de 5 km/h) pour permettre d'aboutir à une analyse détaillée. Il est néanmoins intéressant de noter que, dans les deux sens de circulation, la valeur de la moyenne des vitesses instantanées à la sortie de la section de route est inférieure à la valeur à l'entrée sur la section de route, ce qui semble indiquer que l'offre de dépassement n'est pas suffisante.

7.2.3. Possibilités de dépassements

Il s'agit de la clé principale d'analyse, qui doit être effectuée, d'après les réflexions du Chapitre 2, sous l'angle du ratio dépassements effectués/dépassements désirés.

Dans un premier temps, l'offre de dépassement est examinée en fonction de la distance de visibilité déterminée par l'algorithme développé au Chapitre 4 paragraphe Calcul de la distance de visibilité de dépassement disponible. Selon les normes du Ministère des Transports du Québec (1999), lorsque la vitesse affichée vaut 90 km/h, tout point d'une zone de dépassement doit garantir une distance de visibilité minimale de 350 mètres. En outre, toute zone de dépassement doit mesurer au minimum 100 m. Sur les Figure 7-16 et Figure 7-17 sont représentées la distance de visibilité disponible et le marquage routier existant. Les zones de dépassement existantes ont été représentées à une ordonnée correspondant à une distance de visibilité de 350 m sur la figure, ce qui permet de vérifier la correspondance entre l'emplacement des zones de dépassement et la visibilité calculée.

Globalement, les zones de dépassement sont correctement aménagées. Une zone de dépassement dans le sens Sud/Nord et deux zones de dépassement dans le sens Nord/Sud semblent pouvoir être ajoutées. Une zone de dépassement dans le sens Sud/Nord pourrait également être considérablement allongée. Il faudrait cependant

vérifier que l'interdiction de dépasser ne correspond pas à une voie d'accès. En outre, une perte de visibilité est identifiée dans les deux sens entre les chaînages 3+ 000 et 4 + 500. Il a été identifié que cette perte était liée à une dénivellation d'une hauteur de 2 mètres, qui peut par exemple être observée sur la Figure 7-13 au chaînage 4+100. Une suppression de cette résurgence permettrait notamment dans le sens Sud-Nord un important gain de distance de visibilité.

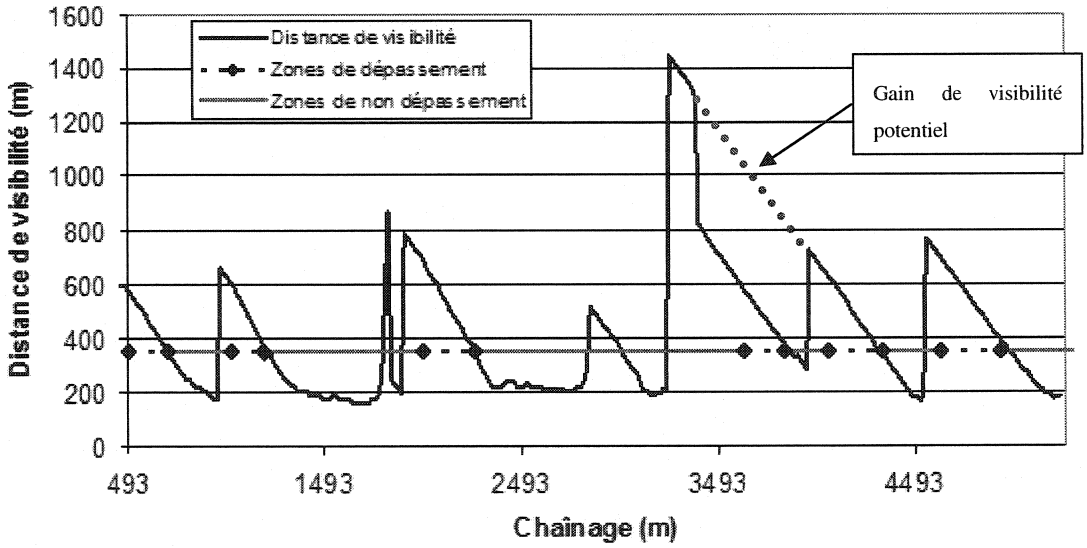


Figure 7-16 : comparaison distance de visibilité/zones de dépassement, sens Sud/Nord

L'amélioration éventuelle de l'offre de dépassement n'est pertinente qu'aux endroits où la demande de dépassement n'est pas satisfaite. Il est donc essentiel de combiner l'analyse de l'offre de dépassement avec une compréhension de la demande. Les Figure 7-19 et Figure 7-20 représentent le nombre de dépassements effectués ainsi que le nombre de dépassements désirés, et indiquent finalement la proportion de chaque motif conduisant à la décision de ne pas entamer un dépassement (distance de visibilité insuffisante, présence d'un véhicule dans le champ de vision, présence d'une zone de dépassement). La légende de ces deux figures est donnée sur la Figure 7-18.

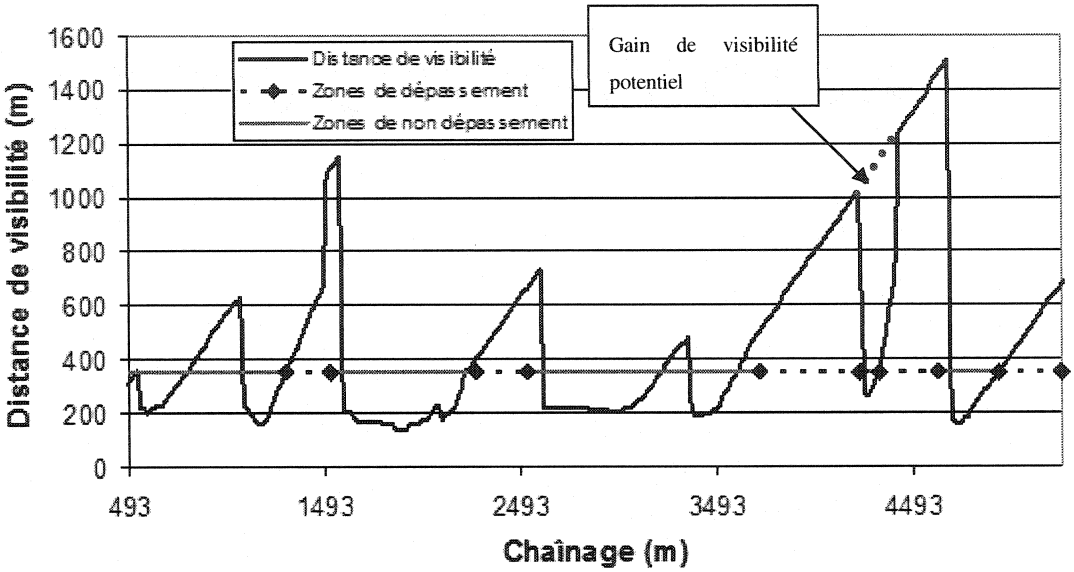


Figure 7-17 : comparaison distance de visibilité/zones de dépassement, sens Nord/Sud

Cette représentation spatiale peut être utilisée pour effectuer deux types d'analyse :

1. d'une part, observer si les dépassements refusés sont dus au trafic en sens opposé ou à une visibilité insuffisante. Dans le cas où le trafic représente l'intégralité des motifs de non dépassement, seul l'installation d'une voie de dépassement peut améliorer les conditions de circulation ;

2. comparer les figures obtenues pour différents aménagements, afin de déterminer si un projet d'aménagement routier permet une diminution importante du pourcentage de dépassements désirés mais non réalisés.

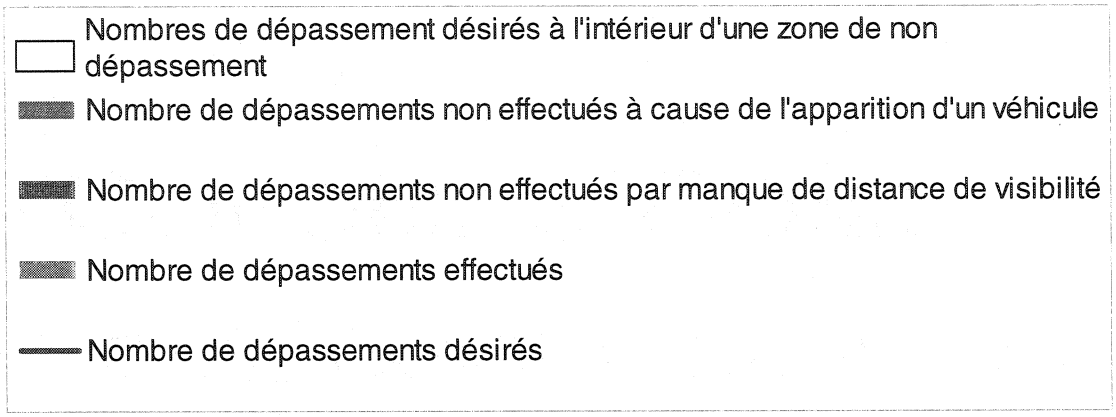


Figure 7-18 : légende des Figure 7-19 et Figure 7-20

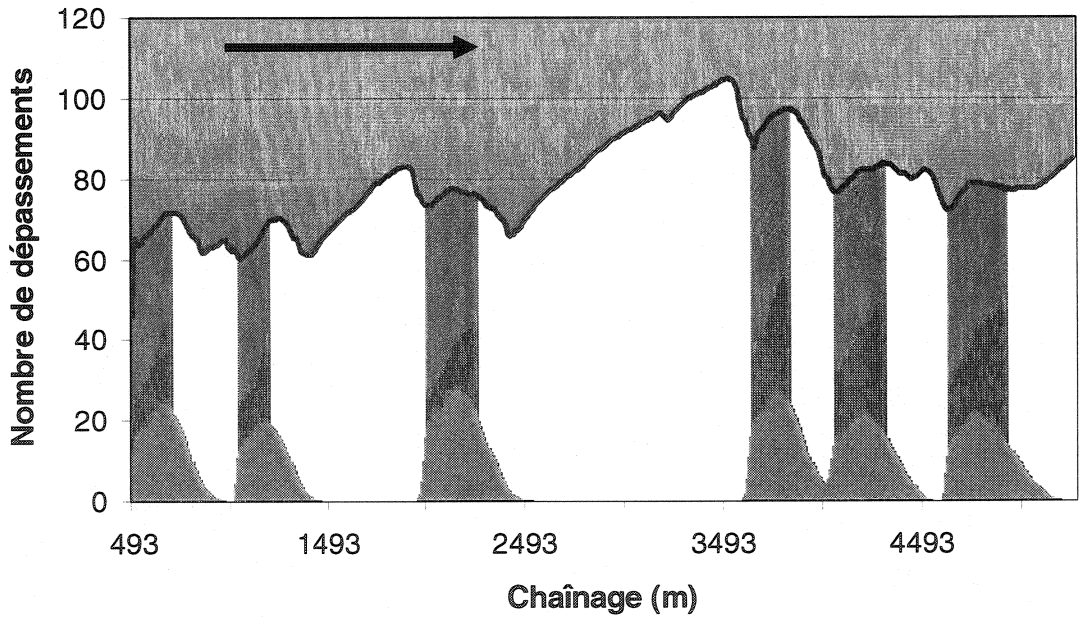


Figure 7-19 : ratio de dépassement dans le sens Sud-Nord

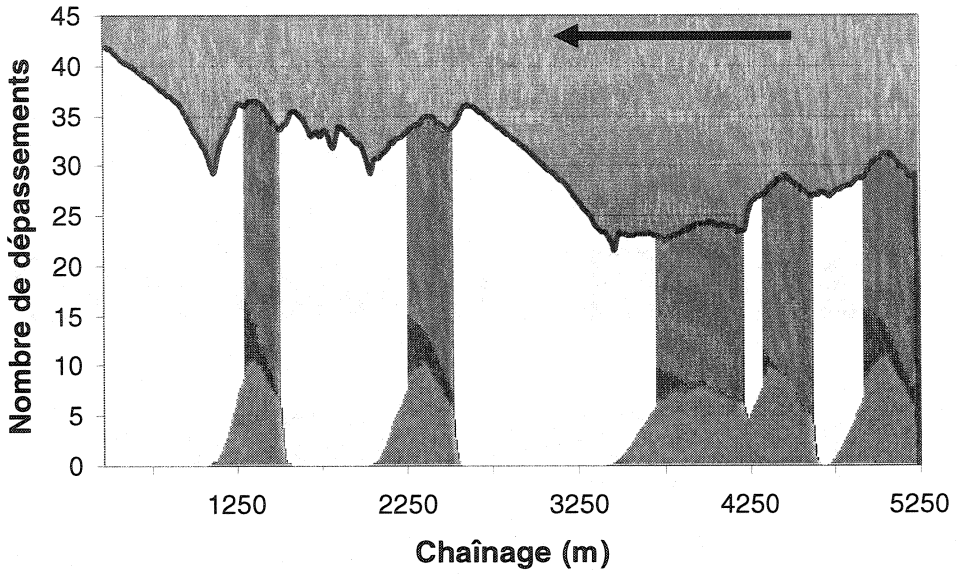


Figure 7-20 : ratio de dépassements dans le sens Nord-Sud

En outre, une compréhension fine du fonctionnement de la route peut être obtenue. D'une part, il semble que l'offre de dépassement soit insuffisante : dans le sens Sud/Nord (respectivement Nord/Sud), la demande de dépassement oscille initialement (chaînage 0+000) autour de 60 (25) dépassement par heure et se stabilise au bout de la section à une valeur de 80 (atteint une valeur de 45 dépassements par heure). Le cas Nord/Sud pourrait être traité en ajoutant une zone de dépassement entre les chaînages 0+750 et 1+028, ce qui est rendu possible par une distance de visibilité suffisante – cf. Figure 7-17. En outre, au chaînage 4+250 est constatée une situation potentiellement génératrice d'accidents. En effet, dans chacun des deux sens est localisée à ce chaînage une courte zone de non dépassement correspondant à une perte de visibilité. Les dépassements entamés dans la première zone de dépassement ne peuvent tous être achevés avant l'entrée de la zone de non dépassement, où la visibilité s'est restreinte dans des proportions importantes. Or, l'analyse de l'offre de dépassement a permis d'identifier une dénivellation de deux mètres de hauteur comme cause de la perte de visibilité. En outre, il a été détecté que ce point correspondait à un maximum de taille des pelotons dans le sens Sud/Nord. L'analyse combinée de ces trois facteurs indique

qu'une correction du profil en long entre les chaînages 4+000 et 4+200 pourrait avoir un impact important en termes de sécurité et de niveau de service, notamment dans le sens de circulation Sud/Nord.

En termes de modélisation, les figures nous conduisent à formuler deux remarques :

1. une diminution du nombre de dépassements désirés est constatée sur quelques dizaines de mètres avant la plupart des zones de dépassement ; ceci est du à l'initiation de manœuvres de dépassement. Certains véhicules, qui étaient en situation de voiture suiveuse, se retrouvent en conduite libre, car le véhicule précédent a changé de voie pour entamer un dépassement. Ils n'ont donc pas de désir de dépasser. Cette situation se propage le long du peloton. Un certain temps est nécessaire pour qu'ils rattrapent leur nouveau véhicule précédent ; à partir de cet instant, le désir de dépasser redevient positif. Ces véhicules se retrouvent alors à l'intérieur de la zone de dépassement, ce qui explique que le nombre de dépassements désirés augmente jusqu'au milieu de la zone de dépassement. Cette situation semble irréaliste ; il conviendrait de tenir compte du fait qu'une fois qu'un véhicule se trouve dans un peloton, il désire dépasser le véhicule de tête.
2. De nombreux dépassements se terminent en dehors de la zone de dépassement. Aucune donnée de comparaison ne nous est disponible pour juger de la pertinence de cette propriété. Il semble toutefois que le comportement des conducteurs soit trop agressif. Il est proposé d'intégrer un quatrième facteur d'impatience (cf. Chapitre 5 Manœuvre de dépassement), tenant compte de la taille de la zone de dépassement restante.

7.2.4. Conclusions de l'analyse

Il convient de rappeler que les analyses développées ci haut sont uniquement indicatives. Elles conduiraient ici éventuellement à recommander la correction du profil en long entre les chaînages 4+000 et 4+200, ainsi que la réalisation d'un marquage de

zone de dépassement dans le sens Nord/Sud entre les chaînages 0+750 et 1+030. La méthode d'analyse proposée, à la base des résultats obtenus, est la suivante :

1. détermination d'une situation de trafic problématique (analyse d'accidentologie, heures de pointe,...) ;
2. segmentation de la route à étudier en tronçons sur lesquels aucune intersection ne se présente ;
3. pour chaque tronçon, relevé des variables d'entrée du programme ;
4. production des statistiques descriptives et des analyses graphiques mettant en perspective l'offre de dépassement (distance de visibilité), la demande de dépassement (moyenne des vitesses instantanées, taille de pelotons, nombre de dépassements désirés) et la géométrie routière.

Conclusion et recommandations

Le travail de recherche a permis de formuler une problématique portant sur la mise au point d'un outil de caractérisation de l'offre et de la demande de dépassement sur une route rurale, l'objectif étant de déterminer si une certaine combinaison de débit, de caractéristiques géométriques de la route, de densité des zones de dépassement et de composition du trafic conduit à la formation de pelotons. La recherche s'est concentrée autour de trois axes correspondant à la définition d'un indicateur caractérisant l'offre et la demande de dépassement, à la mise en place d'un outil pour l'évaluation de cet indicateur et à l'estimation de la pertinence de l'outil proposé. Les résultats suivants ont été obtenus :

1. L'indicateur de dépassement doit être multicritère (analyser les différentes composantes du fonctionnement de la route rurale), désagrégé spatialement (détermination des indicateurs en chaque point d'une route) et relationnel (discernement de l'influence de chaque caractéristique de la section de route étudiée).

2. Seule la modélisation microscopique semble à la fois permettre la construction d'un tel indicateur et la prise en compte des interactions complexes entre les différents éléments d'une route rurale. Les modèles ainsi définis doivent en outre posséder un caractère générique et disposer de paramètres ayant une signification physique.

3. Les logiciels de simulation microscopique des routes rurales identifiés sont : TWOPAS, SIMLA ++, SSIUEL, HUTSIM, VTI et TRARR. Aucun de ces modèles n'offre d'indicateur satisfaisant. En outre, hormis SSIUEL, aucun ne développe une approche totalement générique.

4. Un modèle microscopique a donc été construit, tenant compte de la composition du trafic, de la visibilité disponible et du relief de la route. Une validation de principe a été effectuée qui a prouvé la robustesse du modèle.
5. Le programme a été utilisé pour l'analyse d'une section de la route 101 en Abitibi-Témiscamingue. Si elle n'est qu'indicative, elle laisse toutefois augurer d'un fort potentiel de représentation descriptive et prédictive, i.e. d'analyse.

Le modèle a en outre permis de dégager une compréhension portant sur diverses phases du dépassement. Tout d'abord, la distance de visibilité a pu être approximée par un algorithme portant sur des relevés GPS de l'axe de la route. D'autre part, le processus de prise de décision de dépasser a pu être caractérisé par la combinaison d'un seuil de détection de la vitesse de changement de l'angle avec lequel est perçu un objet et d'une variable floue représentant l'impatience de dépasser. Cette dernière variable est une innovation du présent projet et sa pertinence doit donc être confirmée par des travaux ultérieurs. Finalement, une distance critique définie selon des équations physiques a été définie, qui conditionne l'abandon ou l'achèvement forcé d'un dépassement.

L'outil finalement produit ne doit cependant pas être considéré comme un aboutissement permettant d'opter pour un choix d'aménagement ; il est plutôt conçu comme support décisionnel. D'une part, de par son principe, il vise à l'aide à la compréhension des phénomènes plutôt qu'au classement de la route selon des catégories. D'autre part, l'utilisation du programme sans une collecte détaillée de données permettant une compréhension exhaustive des variables d'entrée ne peut conduire à un résultat autre qu'indicatif. Il convient ici d'insister sur les problématiques liées à la détermination de la distribution des vitesses désirées en notant que des procédures simples, mettant en œuvre des compteurs de passage des véhicules, permettent d'obtenir des résultats suffisants. Finalement, le réseau rural ne peut pas y être représenté dans toute sa complexité. Les éléments suivants ne sont pas modélisés dans la présente version:

- Effet des courbes sur la dynamique des véhicules ;

- Fonctionnement des intersections ;
- Équations de mouvements et prise de décision sur les voies de dépassements et à l'interface entre celles-ci et les routes rurales ;
- Fonctionnement d'un réseau : choix des chemins d'une origine à une destination.

L'exploitation des données produites par le modèle nous a en outre conduit à formuler diverses questions portant sur ses limites :

- La procédure de génération des véhicules est rigide et ne permet pas de représenter des situations de congestion. Est-il possible d'adopter une méthode de génération des véhicules se basant sur des données terrain de temps d'arrivée (relevées par des compteurs de passage de véhicules) ?
- Dans notre exemple, de nombreux dépassements se terminent en dehors de la zone de dépassement. S'agit-il effectivement d'une caractéristique propre aux aménagements de la route 101 ou une composante tenant compte de la distance de dépassement restante doit-elle être ajoutée à l'impatience de dépasser ?
- Certains paramètres se révèlent malgré les efforts de modélisation impossibles à mesurer sur le terrain, tels que l'estimation de la décélération ou la valeur de l'impatience de base. Ces facteurs peuvent-ils être fixés pour l'ensemble de la population québécoise ou sont-ils variables pour chaque route rurale ?

Ces interrogations affectent considérablement la portée du modèle réalisé. Il convient d'une part de souligner que la simulation ne vise qu'à reproduire une approximation des comportements sur une route rurale (et ne vise donc pas un ajustement parfait avec le trafic réel), permettant de détecter des sources **potentielles** d'insécurité routière ou de service insatisfaisant. Un lieu problématique peut ainsi être détecté précisément grâce à une analyse microscopique et les efforts de réflexion peuvent alors être

concentrés sur des zones réduites, réduisant les coûts d'étude préalables à un aménagement routier. Cependant, si les variables d'entrée sont mal définies, l'analyse peut conduire à des erreurs d'estimation importantes. L'utilisation d'un outil microscopique doit donc considérer le coût d'obtention des variables d'entrée afin de juger si son utilisation est pertinente. D'autre part, l'étendue des questions posées sur les capacités du modèle souligne les limites de la validation réalisée. Ainsi, la calibration du modèle d'impatience de dépasser a par exemple conduit à une impasse, faute de données satisfaisantes. Un effort supplémentaire de validation est donc nécessaire, qui peut s'inspirer du schéma développé dans Hellinga (1998).

La simulation microscopique développée à partir d'une compréhension « ingénieur » nous permet de produire des résultats macroscopiques agrégés conformes à la théorie générale développée selon des méthodes d'ingénieur. Elle nous offre également la possibilité d'effectuer des analyses riches d'une complexité et d'un niveau de détails élaborés, confinant au niveau psychologique, procédure qui doit encore être examinée plus attentivement en vue de validation.

Bibliographie

AIMSUN. [Logiciel] Transportation Simulation Systems. http.//www.aimsun.com/.

AKÇELIK. R. et BESLEY. M. 2001. Acceleration and deceleration models. 23rd Conference of Australian Institutes of Transport Research CAITR 2001. Monash University. Melbourne. Australia. 10-12 December 2001. 9 p.

ARCHILLA, A.R. et MORRALL, J.F. 1995. Traffic simulation on two-lane highway downgrades. Road & Transport Research. Vol. 4. No. 3. ARRB Transport Research Ltd. pp. 28-39.

AYCIN, M. F. et BENEKOHAL, R. F 1999. Comparison of Car-Following Models for Simulation. Transportation Research Record 1678. TRB. National Research Council. Washington. D.C.. pp. 116-127.

BAASS, K. et GRANGE, H. 2004. Mesure de la distance de visibilité de dépassement disponible sur la route. Montréal : Ministère des Transports. 38 p.. rapport d'étape 2002-SR-86382.

BAASS, K. 1999. Révision des normes de distances de visibilité appliquées au marquage. Montréal : Ministère des Transports. 115 p. Rapport d'étape final C.D.T. P2410.

BENGTSSON, J. 2001. Adaptive Cruise Control and Driver Modeling. 91 p. Licentiate Thesis. Department of Automatic Control. Lund Institute of Technology. Lund. Sweden.
ISRN LUTFD2/TFRT--3227—SE.

BOER, E. R. 1999. Car following from the driver's perspective. Transportation Research Part F. Vol 2. pp. 201-206.

BRACKSTONE, M. et McDONALD, M. 1999. Car-following : a historical review. Transportation Research Part F. Vol 2. pp. 181-196.

BRANDON, J. A. et COWLEY, A. 1983. A weighted least squares method for circle fitting to frequency response data. Journal of Sound and Vibration. 83:3. pp. 419– 424.

BRANNOLTE, U. et HOLZ, S. 1983. Simulation des Verkehrsablauf auf Landstraßen – Modellerweiterung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 402. 59 p.

BRILON, W. 2000. Traffic flow analysis beyond traditional methods. Transportation Research Circular E-C018. 4th International Symposium on Highway Capacity. TRB. pp. 26-41.

BRILON, W., KOENIG, R. et TROUTBECK, R. 1999. Useful estimation procedures for critical gaps. Transportation research part A. Vol. 33. pp. 161 – 186.

BRILON, W. et BRANNOLTE, U. 1977. Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Strassen mit Gegenverkehr. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 239. 56 p.

BRILON, W. 1976. Warteschlangemodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 201. 56 p.

BRODIN, A. 1983. VTI simulation model. A program for the Monte Carlo simulation of vehicle traffic along two-lane rural roads. Sweden : VTI MEDD. 81 p.

BRYANT, J.F.M. 1978. Driver judgement in overtaking manœuvres. ARRB proceedings. Vermont South, Victoria, Australia, : Australian Road Research Board. Vol 9. Part 5. pp 245-253.

CORMIER, D. 2003. Validation du modèle proposé au projet de recherche : site d'essai de Saint-Raymond de Portneuf. Québec : Ministère des Transports du Québec. Projet de révision des normes de distance de visibilité appliquées au marquage. 67 p. C.D.T. P2410

CORSIM. [Logiciel] McTrans. Center for microcomputers in transportation. http.//www-mctrans.ce.ufl.edu/featured/TSIS/Version5/corsim.htm.

CRAWFORD, A. 1963. The overtaking driver. ergonomics. Vol. 6. pp 153 – 170.

EL HADOUAJ, S., DROGOUL, A. et ESPIÉ, S. 2000. How to Combine Reactivity and Anticipation : The Case of Conflicts Resolution in a Simulated Road Traffic. 2nd Workshop on Multi Agent Based Simulation. Manchester, United Kingdom : Manchester Metropolitan University Business School. pp. 82-96.

ESPIÉ, S. 2004. Communication personnelle.

FARBER, E. et SILVER, C.A. 1967. Overtaking and passing on two-lane rural highways: a literature review. Research & development report. US department of transportation. Federal Highway Administration. Bureau of Public Roads. Washington. USA. 44 p.

FARBER, E. 1969. Passing behavior on public highways under daytime and nighttime conditions. Transportation Research Record 292. TRB. National Research Council. Washington. D.C. pp 11-23.

FLUTEAUX, L. 2004. Contribution à l'évaluation des conditions de circulation sur les routes bidirectionnelles en rase campagne. 208 p. Thèse de doctorat. Université de Marne la Vallée. France.

GARDNER, M. 1970. Mathematical games: the fantastic combinations of John Conway's new solitaire game life. Scientific American. Vol. 223. pp. 120-123.

GAZIS, D.C. 2002. The origins of traffic theory. Operation Research. Vol. 50. No. 1. pp. 69–77.

GAZIS, D.C., HERMAN, R. et ROTHERY, R.W. 1961. Nonlinear follow- the- leader models of traffic flow. Operation Research. No 9. pp. 545-567.

GERLOUGH, D.L. 1959. Traffic Inputs for Simulation on a Digital Computer. Proceedings of the Highway Research Board. 38th Annual Meeting. Washington D.C., USA : NAS-NRC publication. pp. 480-492.

GIPPS, P.G. 1986. A model for the structure of lane-changing decisions. Transportation Research - part B. Vol. 20B. pp 404-413.

GIPPS, P.G. 1981. A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Resarch - Part B. Vol. 15 B. pp. 105 – 111.

GLENNON, J.C. et WEAVER, G.D. 1971. The relationship of vehicle paths to highway curve design. Texas Transportation Institute. Resarch Report 134-5.

GORDON, D.A. et MAST, T.M. 1968. Driver's decision in overtaking and passing. Public roads. Octobre 1968. pp 97-101.

HAMMERSLEY J.M. et HANDSCOMB D.C. 1967. Les méthodes de Monte-Carlo. Paris : Dunod. 229 p. traduction française de Monte Carlo Methods, (1964). London : Wiley. 178 p.

HARMIGNIES, C. 2003. Distance de visibilité sur le profil en long. 22 p. Projet de Fin d'Études, École Polytechnique de Montréal.

HARWOOD, D.W., MAY, A.D., ANDERSON, I.B. LEIMAN, L. et ARCHILLA, R.A. 1999. Capacity and quality of service of two-lane highways : final report. Prepared for National Cooperative Highway Research Program. Midwest Research Institute Project. University of California-Berkeley. 166 p. No. 104215.

HASSAN, Y. EASA., S.M. et ABD EL HALIM, A.O. 1998. Highway alignment : three-dimensional problem and three dimensional solution. Transportation Research Record 1612. pp. 17-25.

HASSAN Y., EASA., S.M. et ABD EL HALIM, A.O. 1996. Analytical Model for sight distance analysis on three-dimensionnal highway alignements. Transportation Research Record 1523. TRB. National Research Council. Washington. D.C.. pp. 1-10.

HELLINGA, B.R. (1998), Requirements for the calibration of traffic simulation models, Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering, Vol IVB, pp. 211-222.

HERMAN, R. et LAM, T. 1972. A dilemma in overtaking on two lane-roads. Traffic engineering and control. Nov. 1972. pp. 276-282.

HOBAN, C.J. et MC LEAN, J.R. 1982. Progress with rural traffic simulation. ARRB proceedings. Australian Road Research Board. Vol 11. Part 4. pp 23-33.

JACQUOT, M. 2003. Description des modèles de voiture suiveuse. 44 p. Cours CIV 6702 théorie de la circulation. Rapport Interne. École Polytechnique de Montréal.

JIMÉNEZ, T., MUSSI, P. et SIEGEL, G. 2000. A road traffic simulator. car-following and lane-changing. European Simulation Multiconference 2000. Gent. Belgium. pp. 241-245.

KALLBERG, H. 1980. Overtakings and Platoons on Two-Lane Rural Roads. Espoo : Technical Research Center of Finland. Road and Traffic Laboratory. Report 61.

KEREN, D. 2003. Advanced Computer Vision. Fitting. Haifa University : Departement of computer science. http.//www.cs.haifa.ac.il/~dkeren/IP-Advanced/fitting-ponce-forsyth-17.pdf (consulté le 20 Octobre 2003). Notes de cours. Chap 17.

KOOREY, G. 2002. Assessment of Rural Road Simulation Modelling Tools. IPENZ Transportation Group Technical Conference 2002. New Zealand : Rotorua. 12 pp.

KOSONEN, I. 2002. Microscopic traffic modelling of two-lane rural roads. Rapport interne pour l'Université de technologie d'Helsinki et l'Université de la Ruhr à Bochum. 11 p.

LANGMEIER, R. 1998. Simulation : application au système bonus-malus en responsabilité civile automobile. 36 p. Travail de séminaire. École des HEC de l'université de Lausanne.

LAY, M.G. 1998. Handbook of road technology. Speeds. Melbourne, Australia : Gordon and Brach science publishers. Vol. 2. Chap. 18. pp 688-697.

LEIMAN, L., Archilla, R.A. et May, A.D. 1998. TWOPAS model improvements. NCHRP project : capacity and quality of service of two-lane highways. University of California, Berkeley. 91 pp. project 3-553.

LEROUX, D. et BEAUDOIN, M. 2003. Développement d'un outil de marquage des zones de dépassement. Ministère des Transports du Québec. 56 p. Rapport final 5.20 R451.1.

LIEBERMAN, E. RATHI, A.K. 1992. Revised Monograph on Traffic Flow Theory. Traffic simulation. Washington D.C. : Transportation Research Board. Chap. 10 pp. 10.1-10.23.

LIST, G. et TROUTBECK, R. (2000): Advancing the Frontier of Simulation as a Capacity and Quality of Service Analysis Tool, Transportation Research Circular E-C018, pp. 485-502.

LOVELL, D.J., LAU M.Y.-K et MAY, A.D. 1988. Using the TRARR model to investigate alignement alternatives and passing lanes configurations on the Buckhorn grade. Institute of transportation studies. University of California. Berkeley. pp. 73-84.

LUTTINEN, R.T. 2001a. Traffic Flow on Two-Lane Highways—An Overview. Lahti : TL Consulting Engineers. Ltd. 63 p. TL Research Report 1/2001. ISBN 952-5415-00-7. ISSN 1458-3313.

LUTTINEN, R.T. 2001b. Uncertainty in the operational analysis of two-lane highways. Lahti : TL Consulting Engineers. Ltd. 57 p. TL Research Report 2/2001. ISBN 952-5415-01-5. ISSN 1458-3313.

MATSON, T.W. et FORBES, T.W. 1938. Overtaking and passing requirements as determined from a moving vehicle. Proceedings of the Highway Research Board. pp. 100-112.

MAVROMATIS, S. et PSARIANOS, B. 2003. Analytical model to determine the influence of horizontal alignment of two-axle heavy vehicles on upgrades. Journal of transportation ingineering. vol. 129. No. 6. November/December 2003. pp. 583-589.

MICHAELS, R.M. 1963. Perceptual factors in car following. Proceedings of the second international symposium on the theory of traffic flow. Paris : OECD. pp 44-59.

MORRALL, J.F. et WERNER, A. 1990. Measuring level of service of two-lane highways by overtakings. Transportation Research Record 1287. TRB. National Research Council. Washington. D.C.. pp. 62-69.

NAGEL, K. et SCHRECKENBERG, M. 1992. A cellular automaton model for freeway traffic. Journal de Physique. Vol I 2. pp. 2221-2229.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. 2003. Guide des normes de charges et dimensions des vehicules. Service de la normalisation technique de la Direction du transport routier des marchandises. Direction des Communications. 29 p. Normes du Québec. ISBN : 2-550-40730-X.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. 1999. Signalisation routière. Québec : les publications du Québec. Normes des ouvrages routiers. t. V signalisation routière. Vol 2. Rubrique Marques sur la chaussée.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. 1994. Conception routière. Québec : les publications du Québec. Collection des normes – ouvrages routiers. Chapitres 7 et 9

NORMANN, K.O. 1942. Results of highway capacity studies. Public Roads. vol. 23. no. 4. pp. 57–81.

PARAMICS. [Logiciel] Quadstone. www.paramics-online.com/.

PARK, S.K et MILLER, K.W. 1988. Random Number Generators : Good Ones Are Hard To Find. Communications of the ACM. New York : ACM. Press. Vol 31. 10. Oct. 1988. pp. 1192-1201.

POLUS, A. et TOMECKI, A. 1987. Passing experiment on two-lane rural highways. Transportation Research Record 1112. TRB. National Research Council. Washington. D.C.. pp. 115-123.

PRISK, C.W. 1941. Passing practices on rural highways. Proceedings of the Highway Research Board. pp. 366-378.

RAKHA, H., LUCIC, I., DEMARCHI S.H., SETTI, J.R. et VAN AERDE, M. 2001. Vehicle dynamics model for predicting maximum vehicle acceleration levels. Journal of Transportation Engineering. Vol. 127-5. pp. 418–425.

RAKHA, H. et LUCIC, I. 2002. Variable Power Vehicle Dynamics Model for Estimating Maximum Truck Acceleration Levels. Journal of Transportation Engineering. Vol. 128-5. Sept./Oct. 2002. pp. 412-419.

RICKERT, M., NAGEL, K., SCHRECKENBERG, M. ET LATOUR, A. 1996. Two Lane Traffic Simulation on Cellular Automata. Physica A. Volume 231.

ROTHERY, R.W. 1992. Revised Monograph on Traffic Flow Theory. Car following models. Washington D.C. : Transportation Research Board. Chap. 4. pp. 4.1-4.42.

RUSU, C., TICO, M., KUOSMANEN, P. et DELP, E.J. 2003. Classical geometrical approach to circle fitting. review and new developments. Journal of Electronic Imaging. Vol. 121. pp. 179-193.

SIMON, P. et GUTOWITZ, H.A. 1998. a cellular automaton model for bi-directionnal traffic. Phys Rev E. vol 57. pp 2441-2444.

SLEDGE, N.H. et MARSHEK, K.M. 1997. Comparison of ideal lane-change trajectories. Society of Automotive Engineers transactions. Journal of passenger cars. section 6. part 1. pp. 2004-2027.

SMARTEST. 1997. Review of micro-simulation models. Institute of Transportation Studies: University of Leeds. 45 p. SMARTEST Project Deliverable D3.

SMITH, G.J. SMITH, J.E. 1967. Lateral Forces on Vehicles During Driving. Automobile Engineer. Dec. 1967. pp. 510-515.

STANG, N.E. 1993. Modeling The Driver For Traffic Flow Simulation. 250 p. M. Sc. A. Thesis. University of British Columbia.

ST JOHN, A.D. et KOBETT, D.R. 1978. Grade effects on traffic flow stability and capacity. Washington D.C. : Transportation Research Board. National Cooperative Highway Research Program. 110 p. Report 185.

TSS. 2001. AIMSUN version 4.0. User manual. 113 p.

TRAFFIC ENGINEERING HANDBOOK. 1999. Third edition. Washington D.C. Institute of Traffic Engineering.
TRAFFIC ENGINEERING HANDBOOK. 1965. Fifth edition. Washington D.C. Institute of Traffic Engineering.

TRANSPORTATION RESARCH BOARD. 2000. Highway Capacity Manual. Washington D.C. : National Academy of Science. ISBN 0-309-06681-6.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 1998. Highway Capacity Manual. Special Report 209. 3rd Ed.. Revised. Washington. D.C. : National Research Council.

TROUTBECK, R. 1982. Effect of Overtaken Vehicle Speed and Length on Overtaking behavior on Two-Lane Rural Roads. Traffic Engineering & Control. Juin 1982. pp 318 – 328.

VISSIM. [Logiciel] ptv. traffic mobility logistics. http.//www.english.ptv.de/cgi-bin/produkte/vissim.pl.

VOULAND, J. 2003. Dépassements effectifs et souhaités selon le HCM 1950. Rapport interne. École Polytechnique de Montréal. .

WARDROP, J.G. 1952. Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Part II. Vol. 1.. pp. 325–378.

WIEDEMANN, R. 1974. Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Institutes für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe. Heft 8. 84 p.

WOLFRAM, S. 2002. A new kind of science. Wolfram Media. 1197 p.

WU, J.S. 1992. Stochastische Simulation des Überholverhaltens auf zweistreifigen Landstraßen. 214 p. Promotionsarbeit. Institut für Straßen und Verkehrswesen. Universität Stuttgart. ISSN 0932-402 X. ISBN 3-9803148-1-2.

ZADEH, L.A. 1965. Fuzzy sets. Information and control. Vol. 8. pp. 338-353.

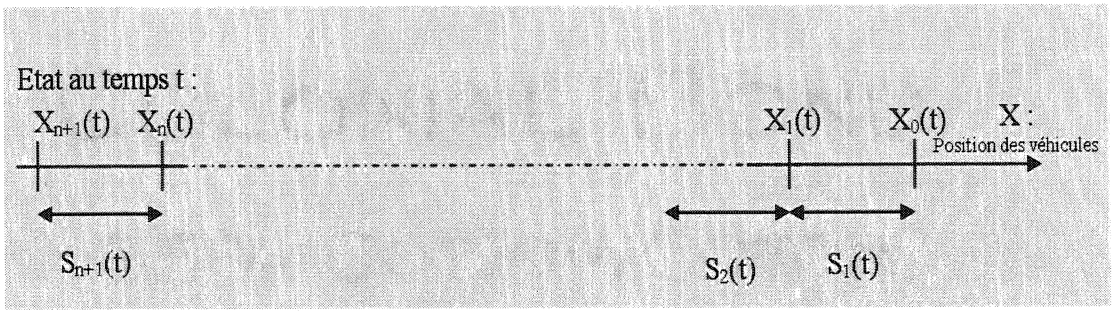
Annexes

Annexe A

Modélisation microscopique classique – rappels théoriques

1. Modèle de voiture suiveuse

Ces modèles s'intéressent au déplacement des véhicules lorsqu'ils sont contraints à circuler sur une seule voie (sans possibilité de dépassement).



La figure ci-dessus éclaire le schéma de description du trafic proposé : il s'agit d'étudier un peloton de N véhicules, la position du pare-choc avant du véhicule n sur l'axe de la route étant décrite par $x_{n-1}(t)$, la vitesse du véhicule $v_{n-1}(t)$ et son temps de réaction τ (étant donné que le mouvement est étudié sans changement de voie, le processus peut être décrit en une dimension spatiale). Les interdistances sont notées $S_{n-1}(t)$.

Généralement, ces modèles postulent l'existence de deux conditions de circulation pour un véhicule : libre et contraint.

Dans ce schéma, la revue de littérature de Brackstone et McDonald (1999) permet d'identifier trois principaux types de modèles historiquement développés décrivant l'accélération choisie par un conducteur en mode contraint :

1. Les modèles de réponse à un stimulus : un élément véhicule/conducteur réagit aux mouvements du (ou des) conducteur(s) précédent(s) ; il est considéré

comme un processeur répondant avec un certain gain aux informations externes. Une équation typique pour ces modèles est donnée dans Gazis, Herman et Rothery (1961) :

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \lambda_{l,m}(t) \cdot \left[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t) \right]$$

$$\lambda_{l,m}(t) = \lambda \cdot \frac{\left(\dot{x}_n(t+T) \right)^m}{\left(x_n(t) - x_{n+1}(t) \right)^l}$$

Ces modèles ont été étudiés en détail, il est désormais avéré qu'ils reproduisent mal le caractère stochastique du problème. En outre, la calibration des facteurs m et l n'a pas abouti à des résultats concluants;

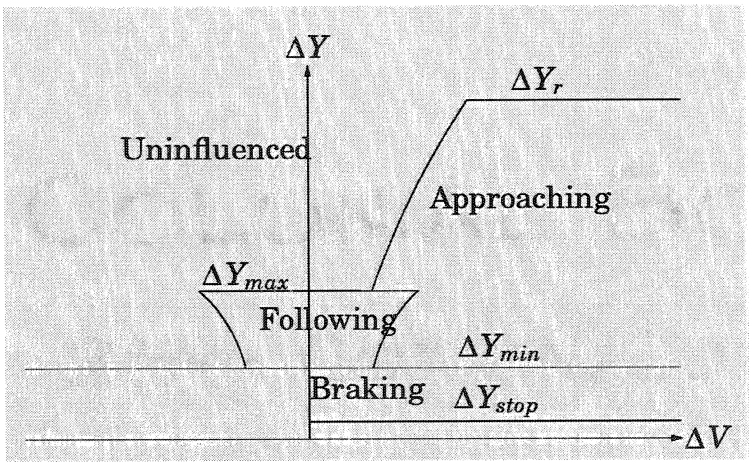
2. Les modèles à écart constant : l'étude de l'arrêt brutal du véhicule précédent conduit à la définition d'un écart « préféré » par le conducteur pour lequel il lui est toujours possible de s'arrêter en sécurité. Gipps (1981) propose un modèle de ce type :

$$v_n(t+\tau) = b_n \tau + \sqrt{(b_n \tau)^2 - b_n \cdot \left[2 \cdot \left(x_{n-1}(t) - S_{n-1} - x_n(t) \right) - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}_n} \right]}$$

S_n est la distance entre les pare chocs avant des deux véhicules (couple prédécesseur/suiveur) à l'arrêt, b_n la décélération maximum qu'un conducteur est prêt à accepter et $\hat{b}_n$ la décélération maximum du conducteur précédent, telle qu'estimée par le conducteur sujet. La critique sur ces modèles porte sur l'hypothèse d'écart sécuritaire, qui semble peu justifiable par la conduite réelle des automobilistes.

3. Les modèles psychologiques/physiques : ces modèles considèrent les capacités de perception du conducteur en fonction des vitesses ΔV et positions Δx relatives. À chaque modification perçue par le conducteur correspond un type de réaction (mouvement libre, phase d'approche, voiture suiveuse et freinage). Par exemple, un conducteur ne peut au-delà d'une certaine distance détecter

qu'il se rapproche d'un autre véhicule – le taux de modification de l'angle visuel sous lequel un objet est observé a une valeur seuil de 6.10^{-4} rad/s. Il a donc un déplacement libre et reste à vitesse désirée. Dès que Δx devient tel que le conducteur aperçoit qu'il s'approche, il commence à ralentir jusqu'à ce que $\Delta V=0$. La figure ci-dessous, extraite de Bengsston (2001) dans sa description de Wiedemann (1974), décrit les seuils entre les différents comportements :



Selon Brackstone et McDonald (1999), ces modèles n'ont cependant pas été calibrés dans les détails ; en outre, peu de littérature explique les choix d'accélération faits dans chaque zone.

En mode libre (partiellement déjà traité par le troisième cas), une forme pour l'accélération est choisie (généralement, l'accélération varie linéairement en fonction de la vitesse, elle est maximale à vitesse nulle) ; une certaine vitesse maximale (dépendant de la géométrie de la route, des limite de vitesse, du désir du conducteur) peut être atteinte.

Aucune de ces approches ne s'est jusqu'alors avérée totalement satisfaisante. Les méthodes de type stimulus ont par exemple été presque totalement abandonnées. La difficulté tient principalement à la grande variabilité de comportements et de motivations parmi la population et à l'importance qu'ils prennent dans la conduite. Les

lois doivent donc être tout autant basées sur la psychologie que sur certains principes physiques.

Deux nouveaux champs de recherche ont émergé récemment, qui peuvent apporter un nouveau regard sur le problème :

- Les modèles de logique floue traitent l'imprécision caractérisant la conduite. Ainsi, un conducteur est capable de juger son écart par rapport au véhicule précédent selon les termes linguistiques {très loin, loin, proche, très proche}. Le terme très proche peut correspondre à un écart entre 0s et 2s. Il convient donc de définir une fonction (appelée fonction d'appartenance) caractérisant à quel degré le véhicule est très proche : si l'écart vaut 0s, le degré d'appartenance sera 1, tandis que si l'écart vaut 2 s le degré d'appartenance vaudra 0. Entre les deux extrêmes, le degré d'appartenance sera certainement une fonction décroissante prenant des valeurs entre 0 et 1. La modélisation est donc basée sur des fonctions d'appartenance (décrivant aussi bien les informations entrantes que les transformations des informations en termes linguistiques ou l'accélération résultante) et des relations entre les informations et l'accélération floue résultante, ainsi qu'un processus transformant cette dernière en une valeur déterminée. Stang (1993) a proposé un modèle utilisant la logique floue, décrivant le fonctionnement du cerveau humain dans la tâche de conduite. Son modèle ne décrit pas complètement tous les programmes du cerveau humain, il pose surtout une base de compréhension psychologique. Il n'a pas fait l'objet de commentaires extérieurs et mériterait d'être observé sous une perspective « ingénierie du trafic ».

- Les modèles multi-agents permettent de décrire un système dans lequel des éléments hétérogènes – appelés agents - interagissent. Selon El Hadouaj, Drogou et Espié (2000) – traduit de l'anglais par l'auteur de ce document :

  « Chaque agent est une entité autonome qui a son expérience propre, son but propre et sa propre stratégie afin de réaliser les diverses

tâches de conduite et de résoudre toute source de conflit potentiel avec d'autres agents. »

El Hadouaj, Drogou et Espié (2000) proposent un modèle de ce type. La communication entre les agents, permettant à chaque agent de recevoir les informations sur son environnement, est réalisée par un processus central, avec lequel les agents communiquent pour recevoir des informations et donner les informations sur leur état. Les interactions entre les agents sont représentées par une notion de conflits (un conflit typique est créé lorsqu'un véhicule plus rapide rattrape un véhicule plus lent). La méthode de résolution des conflits développée présente l'intérêt de permettre une combinaison de deux propriétés de conduite : réactivité (réaction à des conditions de trafic à court terme) et anticipation (prévision de l'évolution du trafic à long terme). Le modèle expliqué dans El Hadouaj, Drogou et Espié (2000) souffre des mêmes manques d'analyse comparative et de description que celui de Stang(1993).

Le développement de ces deux analyses suggère fortement le développement de modèles non plus basés sur des lois physiques s'imposant au conducteur, mais sur le développement d'un modèle de conducteur, avec l'aide des psychologues. Deux caractéristiques de conduite semblent importantes à intégrer dans la modélisation :

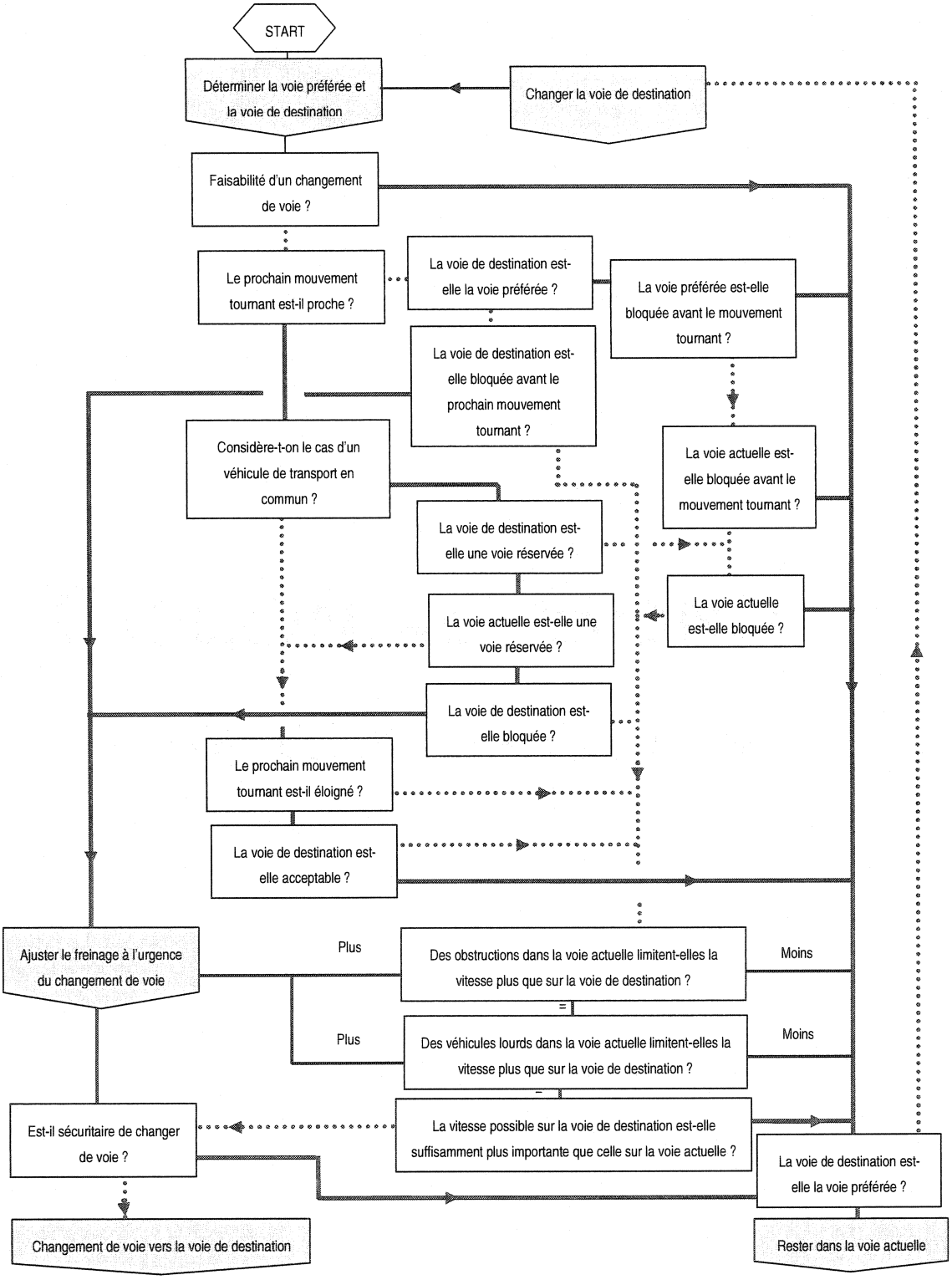
- les prédictions réalisées par un conducteur lui permettent d'anticiper;
- le conducteur ne vise pas une solution optimale mais satisfaisante, il ne concentre pas son attention sur l'unique véhicule devant, mais sur tout l'environnement.

2. Modèle de changement de voie

La nature bidimensionnelle de la route (inévitable lorsque il y a deux sens circulation) impose comme tâche essentielle de simulation la compréhension des changements de voie. Les premiers travaux à ce sujet traitent essentiellement de la problématique des dépassements de véhicules plus lents sur autoroute, dont le but principal est de permettre de circuler à une vitesse la plus proche possible de la vitesse désirée ; le

problème de changement de voies pour sortir de l'autoroute, ou lors de la transition entre l'autoroute et une artère à une voie par sens de circulation était également étudié (ainsi qu'expliqué dans Gipps, 1986).

Gipps (1986) s'intéresse de manière générale à la problématique du changement de voies lorsque différentes contraintes concurrentes peuvent influencer la réaction du conducteur. Il s'agit essentiellement selon lui de bâtir un graphique décisionnel (reporté page suivante) comportant les questions ayant un impact sur le choix de changer de voie.


START
Déterminer la voie préférée et la voie de destination
Changer la voie de destination
Faisabilité d'un changement de voie ?
Le prochain mouvement tournant est-il proche ?
La voie de destination est-elle la voie préférée ?
La voie préférée est-elle bloquée avant le mouvement tournant ?
La voie de destination est-elle bloquée avant le prochain mouvement tournant ?
Considère-t-on le cas d'un véhicule de transport en commun ?
La voie actuelle est-elle bloquée avant le mouvement tournant ?
La voie de destination est-elle une voie réservée ?
La voie actuelle est-elle une voie réservée ?
La voie actuelle est-elle bloquée ?
La voie de destination est-elle bloquée ?
Le prochain mouvement tournant est-il éloigné ?
La voie de destination est-elle acceptable ?
Ajuster le freinage à l'urgence du changement de voie
Plus
Des obstructions dans la voie actuelle limitent-elles la vitesse plus que sur la voie de destination ?
Moins
=
Plus
Des véhicules lourds dans la voie actuelle limitent-elles la vitesse plus que sur la voie de destination ?
Moins
-
Est-il sécuritaire de changer de voie ?
La vitesse possible sur la voie de destination est-elle suffisamment plus importante que celle sur la voie actuelle ?
La voie de destination est-elle la voie préférée ?
Changement de voie vers la voie de destination
Rester dans la voie actuelle

Note : les flèches discontinues correspondent à une réponse affirmative et continues infirmative

Tout d'abord, il faut s'interroger sur les facteurs entrant en compte. Le conducteur cherche à atteindre une destination avec un degré spécifique de confort : la dynamique du déplacement est régulée par un modèle de voiture suiveuse et ne subit pas de modifications lors du changement de voie (notamment, la trajectoire suivie n'entre pas en compte) ; le changement de voie dépend directement de deux critères : la vitesse désirée et le prochain mouvement à effectuer (tourne à gauche, à droite ?). Cependant, ce désir général entre en conflit avec certaines caractéristiques de la route.

Il convient donc d'examiner quels stimuli entrent en compétition, puis de les hiérarchiser :

- Sécurité du changement de ligne : cette étape consiste pour le conducteur à vérifier qu'un espace sur la voie adjacente est disponible, et que les vitesses relatives avec les véhicules précédents et suivants ne sont pas sources potentielles de collision. Les niveaux d'acceptation de ces trois paramètres (espace disponibles, vitesse relative par rapport au précédent et par rapport au suivant) varient en fonction des conducteurs et de la présence d'obstacles sur la voie du conducteur dont le mouvement est considéré;

- Présence d'obstructions permanentes : à l'approche d'obstructions connues sur la route (parkings), les véhicules cherchent à se positionner sur une ligne adjacente afin d'éviter d'être bloqués derrière l'obstacle. L'importance de ce comportement dépend de l'éloignement par rapport à l'obstruction;

- Présence de voies réservées pour les bus : ces voies sont réservées à certains véhicules, en général à des systèmes de transport collectif (bus, taxis). Ces véhicules vont rouler « normalement » sur cette ligne et utiliser les voies adjacentes uniquement pour dépasser des véhicules plus lents;

- Prochain mouvement tournant du conducteur : la distance avant le prochain mouvement tournant détermine le comportement du conducteur. Deux limites sont

définies : jusqu'à un certain éloignement, le mouvement tournant n'a aucune influence ; ensuite, le désir de changer de voie pour profiter d'un avantage temporaire diminue jusqu'à devenir nul – si le véhicule se trouve sur la ligne lui permettant d'effectuer son mouvement tournant, il y reste ; enfin, le véhicule cherche impérativement à changer de voie pour effectuer le mouvement tournant dans les meilleures conditions ;

- Présence de véhicules lourds : du fait de l'accélération faible des véhicules lourds, une vitesse stationnaire s'établit (en fonction de la géométrie de la route) dans la voie dans laquelle il circule. Les véhicules chercheront donc à dépasser ce type de véhicules ;

- Vitesse : obtenir un gain de vitesse constitue l'objectif déterminant le changement de voie, lorsque il n'y a pas d'incident ou de prochain mouvement tournant prévu. Le conducteur observe donc les vitesses possibles dans les trois voies (au maximum) dans lesquelles il peut circuler. Dans certains cas, l'avantage peut être nul (si le véhicule doit retourner dans sa voie actuelle après un dépassement) ou même négatif (les voies extérieures sont peu appréciées du fait du fort potentiel de risque de formation de queues).

Pour modéliser les interactions entre ces différents éléments, le cas d'un véhicule entre son entrée dans le système et son prochain mouvement tournant est considéré. Le principe consiste en la construction d'un arbre posant les questions soulevées successivement et par ordre d'importance. L'approche standard aurait étudié l'intégralité des cas possibles ; elle conduit cependant à un nombre de possibilités beaucoup trop élevé et étudie des combinaisons de cas qui ne peuvent se présenter (par exemple doubler sur une voie obstruée).

L'arbre de décision est reporté sur la page précédente.

Le modèle est réparti selon deux types de questions, requérant soit des réponses simples du type oui/non soit une formulation mathématique plus complexe. Bien que

spécifiquement construit pour un modèle de voiture suiveuse développé par Gipps (1981), différentes formulations des problématiques de déplacement du véhicule peuvent être utilisés, avec comme unique contrainte le fait qu'une vitesse « de sécurité » (c'est à dire une vitesse maximum que peut atteindre l'élément véhicule conducteur) correspondant à un état réel du véhicule (et non une limite fictive) doit être définie. Ce paramètre permettra de déterminer les créneaux espace dans lesquels les véhicules peuvent s'insérer moyennant certaines contraintes dynamiques.

Le processus et les questions sont globalement suffisamment compréhensibles, le détail des paramètres pris en compte n'est pas d'intérêt ici. Une explication rapide du vocabulaire employé permettra par contre, éventuellement, une refonte du diagramme et une mise en application de la solution selon des modélisations définies.

À chaque étape, le conducteur ne peut changer de voie que sur les voies adjacentes (le changement sur deux voies n'est pas permis).

La **voie préférée** est fixée en fonction du prochain mouvement tournant du conducteur, de telle sorte que celui-ci se place sur la voie le rapprochant de celle lui permettant d'effectuer ce déplacement.

La **voie cible** correspond initialement à la voie préférée, mais peut changer en fonction des conditions du trafic.

La **faisabilité** du changement de ligne dépend de l'acceptation d'espaces d'insertion dans la voie de destination (dans le modèle de Gipps, prise en compte de la décélération requise pour changer de voie).

Dans ce contexte, les techniques de modèles multi-agents et de logique floue s'appliquent également. Stang (1993) et El Hadouaj, Drogoul et Espié (2000) sont également les deux références à ce sujet. Les mêmes remarques que celles concernant les déplacements des véhicules sur une ligne s'appliquent ici.

Annexe B

Détermination des créneaux intervéhiculaires dans le modèle de voiture suiveuse de Gipps (1981)

1. Établissement d'une vitesse de voiture suiveuse constante

Soit un véhicule n dont nous désirons connaître le déplacement. Supposons que le véhicule précédent soit à vitesse constante, et que n, après éventuellement divers ajustements entre sa vitesse libre et sa vitesse "suiveur" atteigne à un instant t' la vitesse du véhicule précédent v. On peut remarquer immédiatement par récurrence que si la vitesse au pas de temps suivant est égale à v, alors le véhicule restera à v indéfiniment, et sera par conséquent situé à une distance constante du véhicule de tête. Il s'agit donc de déterminer $v_n(t+\tau)$ (m/s).

Elle vaut :

$$v_n(t+\tau) = b_n\tau + \sqrt{(b_n\tau)^2 - b_n \cdot \left[2 \cdot \left(x_{n-1}(t) - S_{n-1} - x_n(t)\right) - v\tau - \frac{v^2}{\hat{b}_n}\right]}$$

avec :

v_{n-1} : vitesse du véhicule précédent (m/s)

b_n : décélération maximum que le conducteur n peut accepter (m/s^2);

S_{n-1} : somme de la taille effective du véhicule n-1 et de l'espace intervéhiculaire à l'arrêt (m);

τ : temps de réaction (valeur constante de 2/3 s);

$\hat{b}_n$: décélération maximale supposée du véhicule précédent (m/s^2).

Soit d la distance entre les deux véhicules à $t-\tau$ et $v^* > v$ la vitesse de n en $t-\tau$, alors, comme entre $t-\tau$ et t, la vitesse de n évolue constamment, celui-ci a parcouru entre les deux instants la distance $\frac{(v+v^*)}{2\cdot\tau}$, tandis que le véhicule n-1 a parcouru $v\tau$. L'interdistance en t vaut donc : $d + \frac{(v-v^*)}{2\cdot\tau}$

Ainsi :

$$v_n(t+\tau) = b_n\tau + \sqrt{(b_n\tau)^2 - b_n \cdot \left[2 \cdot \left(d - S_{n-1} + \frac{(v - v^*)}{2 \cdot \tau}\right) - v\tau - \frac{v^2}{\hat{b}_n}\right]}$$

$$= b_n\tau + \sqrt{(b_n\tau)^2 - b_n \left[2 \cdot (d - S_{n-1}) - v^*\tau - \frac{v^2}{\hat{b}_n}\right]}$$

$$= v_n\left((t-\tau)+\tau\right)$$

Par conséquent, dès qu'un véhicule suiveur atteint à un instant la vitesse du véhicule précédent, il conserve cette vitesse tant que le véhicule précédent reste à vitesse constante.

2. Valeur de l'espacement en situation de voiture suiveuse

Deux véhicules sont considérés ; on se place après l'instant où l'égalité de vitesse à V s'est établie et on cherche l'espacement constant d (m) qui s'est établi entre les deux véhicules. Alors :

$$V = b_n\tau + \sqrt{(b_n\tau)^2 - b_n \cdot \left[2 \cdot (d - S_{n-1}) - V\tau - \frac{V^2}{\hat{b}_n}\right]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$(V - b_n\tau)^2 = (b_n\tau)^2 - b_n \cdot \left[2 \cdot (d - S_{n-1}) - V\tau - \frac{V^2}{\hat{b}_n}\right]$$

$$\Leftrightarrow$$

$$2 \cdot d \cdot b_n = V^2\left[\frac{b_n}{\hat{b}_n} - 1\right] + 3 \cdot V \cdot b_n\tau + 2 \cdot b_n \cdot S_{n-1}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$d = \frac{V^2}{2}\left[\frac{1}{\hat{b}_n} - \frac{1}{b_n}\right] + \frac{3 \cdot V\tau}{2} + S_{n-1}$$

3. Distance à partir de laquelle le suiveur réagit aux stimuli du prédécesseur

On considère que, jusqu'à t, deux véhicule consécutifs peuvent évoluer à leur vitesse libre (V_l et V_l*) et on cherche à déterminer la distance à laquelle doit se rapprocher le suiveur (dans le cas où sa vitesse est supérieure à celle du véhicule de tête) pour que la vitesse "suiveur" devienne le paramètre limitant, i.e. :

$$V_l = b_n\tau + \sqrt{(b_n\tau)^2 - b_n \cdot \left[2\cdot(d - S_{n-1}) - V_l\tau - \frac{V_l{}^{*2}}{\hat{b}_n}\right]}$$

Une manipulation de cette équation permet d'obtenir :

$$d = \frac{1}{2}\left[\frac{V_l{}^*}{\hat{b}_n} - \frac{V_l}{b_n}\right] + \frac{3\cdot V\tau}{2} + S_{n-1} \text{ (m)}$$

Annexe C

Description des modèles de simulation des routes rurales

1. TWOPAS

TWOPAS est un instrument de microsimulation réalisé par FHWA (Federal Highway Administration) qui « prend en compte de manière réaliste la géométrie, le trafic, le comportement des conducteurs ainsi que les caractéristiques des véhicules » (cf. http://216.161.62.248/ihsdm_public/html/tam/tam_em.html#_toc, FHWA, 2003, consulté le 17 juillet 2003). Les données macroscopiques (telles que les données de formation de peloton ou le pourcentage du temps passé à suivre un véhicule lent) obtenues dans TWOPAS sur une route générique sous différentes conditions de trafic ont été utilisées pour la réalisation du HCM 2000.

TWOPAS est décrit originellement par St John et Kobett (1978), puis révisé par Leiman, Achilla et May (1998). Les sous-modèles sous-jacents à la simulation sont formulés ici.

1.1 Capacités d'accélération des véhicules

L'objectif est de déterminer l'accélération maximale effectivement disponible. Deux classes de véhicules sont identifiées : véhicules particuliers, utilitaires et récréatifs d'une part, poids lourds d'autre part. Dans les deux cas, une première estimation de l'accélération sur le plat est effectuée. L'effet des pentes est ensuite analysé.

Véhicules particuliers, utilitaires et récréatifs

Une expérience a été conduite sur plusieurs types de véhicules et dans deux configurations (plat, pente moyenne de 6.1 %) ; les véhicules devaient être conduits à l'accélération maximale jusqu'à ce qu'une certaine vitesse soit atteinte.

En terrain plat, une approximation linéaire entre l'accélération disponible a (m/s^2) et la vitesse v (km/h) du véhicule est établie sous la forme :

$a = a_0\left(1 - \frac{v}{v_m}\right)$ où a_0 (m/s^2) est l'accélération maximum et v_m (km/h) la pseudo-vitesse maximum. Dans le modèle, pour des vitesses supérieures à V_m, l'accélération disponible est nulle. Cependant, le comportement réel permet de maintenir de faibles accélérations à des vitesses supérieures à celle prédite par le modèle linéaire. Cette valeur indiquée dans le modèle linéaire n'est donc pas la vitesse maximum effective, mais une vitesse pseudo-maximum. Les valeurs de a_0 et de v_m sont donc étudiées non pas par régression directe entre a et v, mais par identification des facteurs dont elles dépendent. L'étude donne par exemple pour les véhicules récréatifs et les vans :

$a_0 = -0.2056 + 0.00553\left(\frac{r_1 r_2}{W/bhp}\right)$ (m/s^2) où r_1 est le rapport de vitesse en première, r_2 est le rapport de vitesse de l'axe arrière, W le poids du véhicule (kg) et bhp (W) la puissance de freinage.

$v_M = 3.13 + 4.766 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\left(\frac{\rho C_D A}{2W} + C_{RV}\right) \cdot W/bhp}}$ (m/s) où ρ est la densité de l'air (kg s^2/m^2), C_D est le coefficient de résistance aérodynamique, A est la surface frontale de la voiture projetée sur un plan vertical (m^2), et C_{RV} un coefficient de friction ($0.6.10^{-7}$ s^2/m^2).

Des formules similaires décrivent le comportement des autres types de véhicules particuliers.

À noter que les valeurs de a_0 et de V_m sont également corrigées en fonction de l'altitude, dont les effets influencent la puissance du véhicule ainsi que les forces aérodynamiques.

L'ajustement à effectuer en terrain en pente (de valeur décimale p) est estimé sous la forme :

$$a(p) = a(0) - pg$$

Poids lourds

Le profil de l'accélération est déterminé par un programme utilisant l'accélération au démarrage dans le premier rapport de vitesse, effectuant les changements de vitesse (temps pendant lequel l'accélération dépend de forces de résistance), et utilisant le minimum de l'accélération limitée par la friction et la traction entre les changements de vitesse. En outre, il est tenu compte d'une utilisation du moteur plus efficace dans es pentes que sur le plat (les rapports de vitesse sont utilisés pendant une plus grande durée). La formulation des équations n'est pas délivrée ici (St John et Kobett, 1978). Le critère pour le changement de vitesse n'est pas explicité ici. Une formule analytique complexe a pu ainsi être établie dans St John et Kobett (1978), tenant notamment compte de la puissance du véhicule, de sa surface frontale et du temps de passage des vitesses.

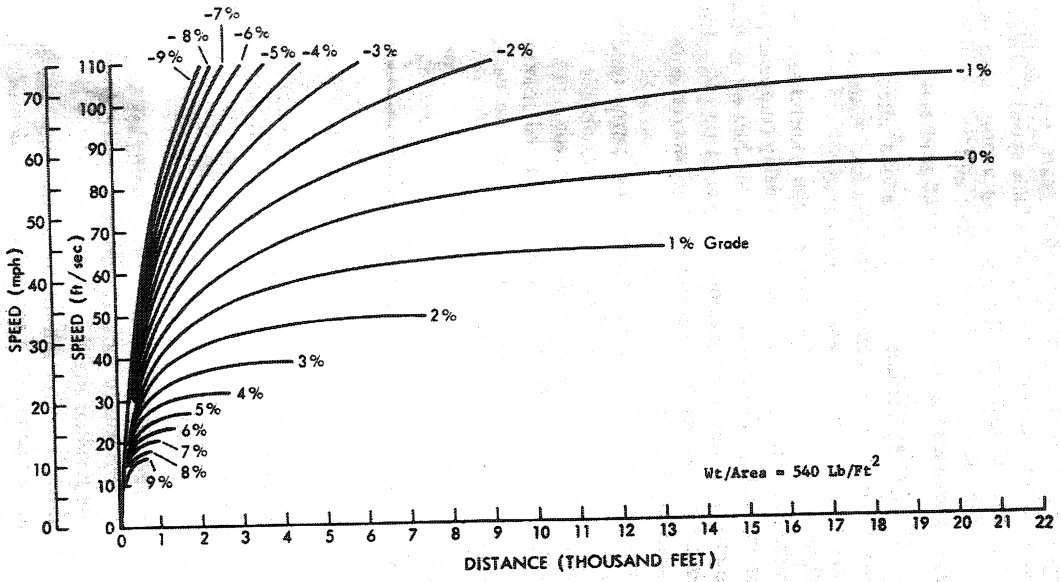


Figure 1. Speed-distance relation for a 300-lb/NHP truck accelerating from rest.

La figure précédente donne l'accélération disponible en fonction de la vitesse pour un véhicule accélérant à partir de 0 $ft.s^{-1}$ et ayant un rapport poids/puissance de 492 kg / kW, en fonction de différentes pentes.

1.2 Caractéristiques de « conduite normale »

Vitesses désirées

Méthode générale de détermination

Il s'agit de la vitesse qu'un conducteur désire atteindre à tout moment. Cette vitesse désirée varie en fonction des caractéristiques de la route. Ainsi, la négociation d'un virage serré réduit la vitesse à laquelle le conducteur désire conduire. TWOPAS modélise quatre types de zones où les vitesses désirées sont distinctes : les sections de ligne droite, les courbes, les zones de vitesse de croisière en pente pour les camions et les zones de réduction de vitesse (travaux, limitation de vitesse « locale »).

La vitesse désirée sur chaque zone est déterminée comme suit :

- À chaque zone et à chaque type de véhicule sont affectés une vitesse désirée moyenne et une variance des vitesses désirées;
- À chaque véhicule est assigné une valeur aléatoire $f \in [-3,3]$ prise parmi une distribution normale centrée réduite tronquée;
- Pour ce véhicule, sachant la vitesse désirée moyenne V_{dm} et la variance σ associés à la zone et au type de véhicule, la vitesse désirée est calculée par :

$$V_d = V_{dm} + f\,\sigma$$

Ceci a pour effet de donner une distibution normale des vitesses désirées comprise entre V_{dm}-3 σ et V_{dm}+3 σ pour chaque type de véhicule et chaque zone.

Caractéristiques des différentes zones

Vitesse désirée dans les sections droites

Aucune méthode de mesure expérimentale de V_{dm} et de σ n'est proposée. St John et Kobett (1978) indiquent qu'elle est très proche de la vitesse instantanée en cas de très faible trafic. Ces valeurs sont définies pour l'ensemble des sections droites.

Vitesse désirée dans les courbes

L'analyse est basée sur des mesures terrain de vitesse et d'accélération latérales (cf. Smith et Smith, 1967 ; Glennon et Weaver, 1971). Cette étude permet de définir des valeurs extrêmes de vitesses U_{min} et U_{max} (m/s) en fonction du rayon R (m) de l'accélération de la gravité g (m^2/s) et du dévers e (m/m) sous la forme :

$$U = \frac{g.a_1}{\frac{2}{R} + 0.00092} + \sqrt{\left(\frac{g \cdot a_1}{\frac{2}{R} + 0.00092}\right)^2 + \frac{g.(a_0 + e)}{\frac{1}{R} + 0.00046}}$$

Cette formule est basée sur des coefficients a_0 et a_1 prenant des valeurs distinctes pour U_{min} et U_{max} déterminés expérimentalement ; $a_0 - a_1 U$ représente l'accélération latérale. En fait, cette formule correspond à la condition de non-renversement du véhicule dans une courbe. a_0 (adimensionnel) est le coefficient de frottement, tandis que a_1 (1/(m/s)) est probablement une force aérodynamique latérale causée par la vitesse.

La vitesse désirée en courbe dans le modèle original (St John et Kobett, 1978) était différente de la vitesse désirée en section droite uniquement si $U_{max} < V_{sectiondroite} + 3 \sigma_{sectiondroite}$. Leiman, Achilla et May (1998) ont modifié le modèle en posant :

Si $U_{min} > V_{sectiondroite} - 3 \sigma_{sectiondroite}$ alors $U_{min} = V_{sectiondroite} - 3 \sigma_{sectiondroite}$

Et

Si $U_{max} > V_{sectiondroite} + 3 \sigma_{sectiondroite}$ alors $U_{max} = V_{sectiondroite} - 3 \sigma_{sectiondroite}$

Les caractéristiques de la distribution de vitesse désirées sont :

$$V_{dm} = \frac{U_{max} + U_{min}}{2}$$

$$\sigma = \frac{U_{max} - U_{min}}{6}$$

Vitesse de croisière en pente

Il s'agit de la vitesse utilisée par les poids lourds sur des pentes négatives α supérieures à 4% et longues d'au moins 1.609 km, elle est définie dans le modèle par :

$V_{crawlm} = \frac{89.3}{\alpha}$ (m/s) : vitesse moyenne dans la zone de vitesse de croisière en pente.

La variance est donnée par :

$$\sigma = \frac{V_{crawlm}}{V_{sectiondroitem}} \sigma_{sectiondroite}$$

Zones de réduction de vitesse

Une vitesse moyenne V_{dm} pour la zone est définie. σ est calculée par :

$$\sigma = \frac{V_{dm}}{V_{sectiondroitem}} \sigma_{sectiondroite}$$

Accélération pour atteindre la vitesse désirée

Les conducteurs utilisent seulement une portion de l'accélération maximum. Après régression sur les données du Traffic Enginnering Handbook (1965), St John et Kobett (1978) donnent pour l'accélération d'un véhicule ayant une vitesse V (m /s) et une vitesse désirée V_d (m/s) :

$A_p = 0.366 + 0.108 (V_d\text{-}V)$ (m/s^2)

Si la vitesse est plus élevée que la vitesse désirée (à la conclusion d'un dépassement par exemple), une décélération maximum de 0.366 m/s^2 est adoptée et de 1.2192 m/s^2 si la vitesse dépend d'une courbe ou d'une zone de vitesse de croisière limitée.

Vitesse lors du changement de zone

Il s'agit de la vitesse du véhicule lorsque il passe d'une section droite de à une zone Z où la vitesse désirée V_{cm} est inférieure.

La vitesse d'approche est appliquée à partir d'une distance :

$z = \frac{(V_{dm}^2 - V_{cm}^2)}{2A_a}$; où A_a est l'accélération moyenne lors de l'approche (prise égale à 1.067 m/s^2).

La vitesse d'approche V_a (m/s^2) est fonction de la distance x séparant le véhicule du début de la zone Z, elle vaut :

$$V_a(x) = V_{am}(x) + f\sigma_c$$

V_{am} est une fonction du second ordre en x ayant une accélération moyenne A_a, une vitesse initiale de V_{dm} et une vitesse finale de V_{cm}. À noter que la vitesse de sortie de zone de vitesse désirée réduite est prise en compte par l'accélération pour atteindre la

vitesse désirée. Ni St John et Kobett (1978), ni Leiman, Achilla et May (1998) ne précisent à quelle position cette accélération débute. Il est inféré qu'il s'agit du début de la section droite.

Effet de la largeur de la chaussée et des accotements

Leiman, Achilla et May (1998) introduisent une réduction de vitesse due à des accotements de largeur inférieure à 1.83 m. Celle-ci s'applique uniformément sur tous les véhicules sur les sections droites. Si le véhicule se situe sur une courbe ou une zone de réduction de vitesse, le minimum entre la vitesse désirée sur section droite (tenant compte de l'étroitesse de l'accotement) et la vitesse désirée sur la section particulière est sélectionné comme vitesse désirée effective.

Modèle de voiture suiveuse

Lorsque un véhicule f suit ou rattrape un autre véhicule l, sa vitesse est limitée, au temps t+Δt (Δt est le pas temporel d'évolution de la simulation) par V_f (m/s) :

$$V_f(t+\Delta t) = \max\left\{\frac{\alpha_1+\alpha_2 G}{\alpha_3+\alpha_4 G}V_l(t) + \frac{\alpha_5+\alpha_6 G}{\alpha_7+\alpha_8 G}, V_l(t) - 3{,}0\right\} \quad (1)$$

Les paramètres α_i sont calibrés et identiques pour tous les conducteurs. Lorsqu'un certain véhicule lent est rattrapé, et dans les mêmes conditions géométriques, la réaction de tous les conducteurs aux modifications de vitesse du véhicule leader sera identique. Le temps de réaction est égal au pas temporel de simulation.

En outre, sous certaines conditions combinées de vitesses et d'accélération, f entre en état de suiveur proche. L'équation (1) est utilisée, les paramètres α_i sont tous identiques au premier cas, hormis α_2.

À noter que l'accélération fournie $a(t) = \frac{v_f(t+\Delta t) - v_f(t)}{\Delta t}$ doit être inférieure aux capacités du véhicule. Dans le cas des véhicules particuliers, utilitaires ou récréatifs, en conditions de voiture suiveuse, seulement 70 % de la puissance est utilisée. L'effet sur la formule est approximé par l'utilisation de 81 % de l'accélération maximale sur le plat à l'arrêt et de 90% de l'utilisation de la vitesse maximale (Leiman, Achilla et May, 1998).

1.3 Manœuvre de dépassement

Les manoeuvres de dépassement ont fait, dans le cadre du projet, l'objet d'études expérimentales spécifiques concernant l'acceptation des créneaux. Le dépassement est lié à deux algorithmes principaux de prise de décision : initiation du dépassement, d'une part, et décisions prises pendant le dépassement d'autre part – qui concernent l'achèvement ou l'abandon du dépassement, l'extension du dépassement au prochain véhicule et la réinsertion du véhicule dans sa voie.

Initiation du dépassement

Lors de l'initiation du dépassement, le modèle considère l'environnement du dépassement :

- d'une part le modèle vérifie s'il est rationnel de dépasser (présence d'autres véhicules dépassant, taille de la zone de dépassement, marge de sécurité projetée)
- d'autre part, un test stochastique est passé afin de déterminer si le créneau disponible est accepté. Les probabilités de dépasser sont données par les courbes précédentes (établies expérimentalement), selon qu'un véhicule opposé est visible ou non. Elles dépendent de la vitesse du véhicule précédent.

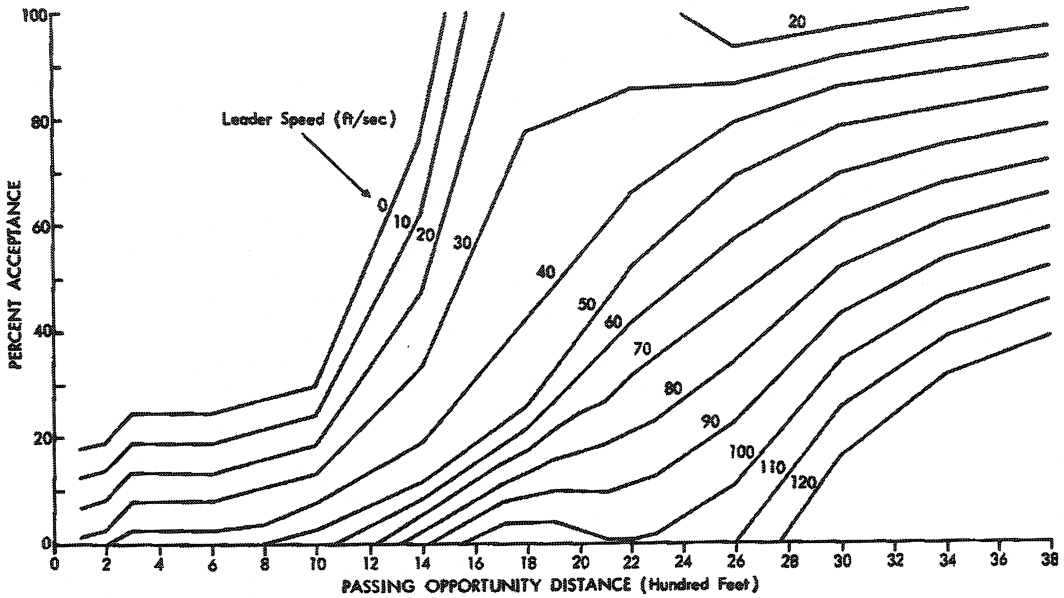


Figure 6. Percent of passing opportunities accepted with oncomer's vehicle in sight.

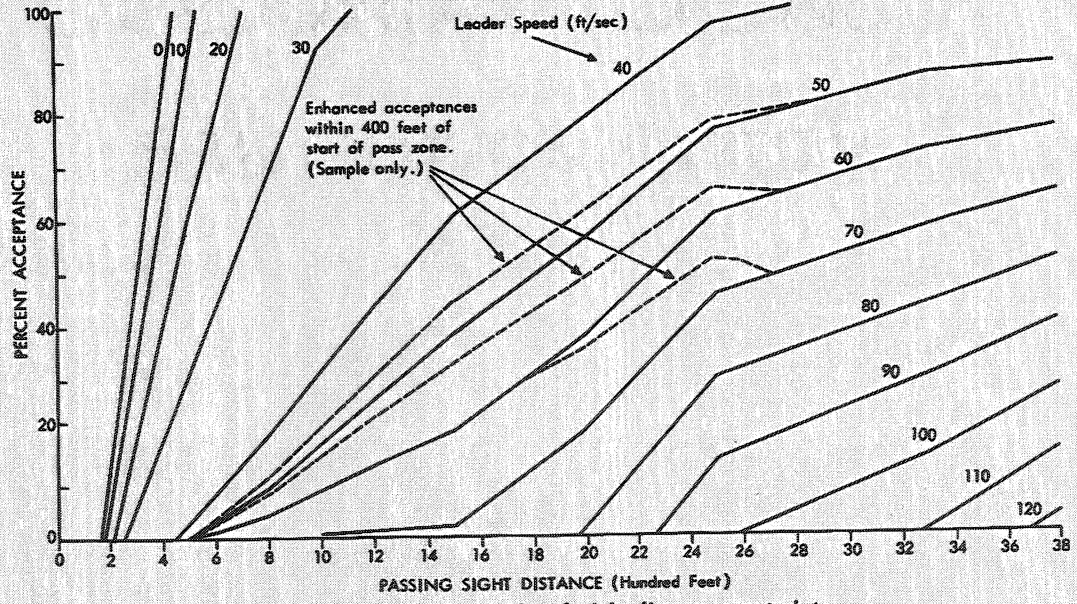


Figure 5. Percent of passing opportunities accepted with sight distance constraint.

Une marge se sécurité de 15.24 – 0.2 V_l m, avec V_l : vitesse du véhicule dépassé, est prise en compte dans les calculs.

Décisions pendant le dépassement

Tous les deux intervalles de simulation, le programme vérifie si le dépassement doit être abandonné, i.e. si :

1. la marge se sécurité devient négative (resp < 2s) sans (avec un) véhicule en sens opposé visible.
2. Les conditions de dépassement ne sont pas rationnelles (par exemple si un véhicule dans le même sens de circulation abandonne une manœuvre de dépassement)

Les manœuvres de réinsertion ne sont pas décrites en détail dans St John et Kobett (1978).

Si un dépassement est terminé (véhicule dépassant se situant devant le véhicule dépassé), un nouveau test d'initiation du dépassement sur le futur véhicule précédent est effectué, si les caractéristiques dynamiques et spatiales de celui-ci créent un désir de dépasser.

Dynamique de la manœuvre

Le véhicule accélère tout d'abord jusqu'à atteindre une vitesse désirée de dépassement, donnée par :

$v_{dep} = 1.167 v_{\text{sec}tiondroite}$ (m/s) si le véhicule se situe sur une section droite sans réduction de sa vitesse, et $v_{dep} = \min(1.1167 v_{\text{sec}tiondroited} + 15, 1.167 v_d)$ (m/s) sinon (V_d est la vitesse désirée par le conducteur dans la zone avec réduction de vitesse sur laquelle il se situe).

Pour atteindre cette vitesse, un véhicule ayant une vitesse V (m/s) dispose de l'accélération :

$A_p = 0.366 + 0.108\ (V_{dep}\text{-}V)\ (m/s^2)$

La décélération après le dépassement rétablissant la vitesse désirée s'effectue à 0.366 m/s^2 si la zone est une section droite et 1.2192 m/s^2 dans les zones de vitesse désirée réduite.

Si un autre véhicule dans le même sens de circulation effectue également un dépassement, le modèle vérifie si le véhicule sujet doit suivre ce véhicule ou peut circuler librement.

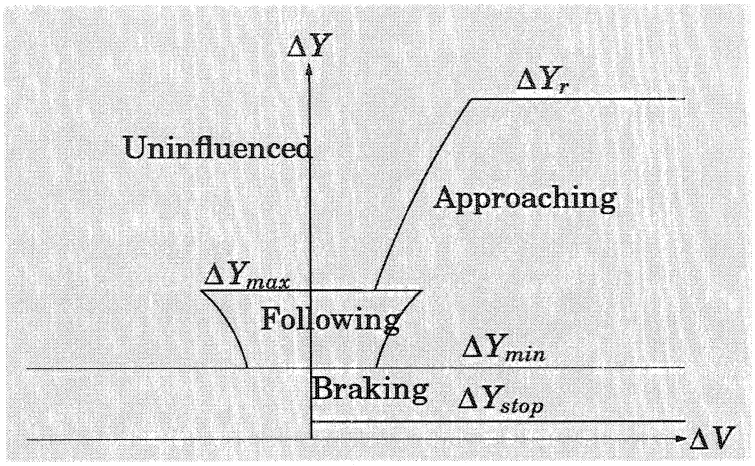
2. SIMLA ++

SIMLA ++ a été créé initialement par Brilon et Brannolte (1977) à la suite des travaux de Wiedemann (1974) sur les modèles de voiture suiveuse. Des améliorations ont ensuite été apportées au modèle par Brannolte et Holz (1983). L'étude est basée sur la compréhension des choix réalisés par l'élément véhicule/conducteur (EVC).

SIMLA ++ est un modèle microscopique pour lequel le temps est discrétisé selon un pas de 1 s.

2.1 Interactions entre les EVC

Les interactions entre les EVC lorsqu'ils circulent dans leur voie de circulation fonctionnent selon le modèle psycho physique de Wiedemann (1974). Le schéma suivant présente, en fonction de l'interdistance ΔY entre le véhicule considéré et le véhicule précédente et de la vitesse relative ΔV, lequel des comportements adopte le conducteur parmi : conduite libre, phase d'approche, conduite contrainte et réaction à un danger. Les séparations entre les différents domaines correspondent à des seuils physiques psychiques de perception des interdistances et vitesses relatives.



Conduite libre

Le conducteur utilise l'accélération B pour atteindre la vitesse désirée wu. Soit bmax (m/s^2) l'accélération maximale, donnée en fonction de la vitesse v (m/s) par :

- $b\max = 1.9 - 0.07 \cdot v + 0.5 \cdot ZFWU + 1.5 \cdot ZF3$ pour les véhicules particuliers, où ZFWU est une variable distribuée selon une loi normale centrée réduite traduisant le désir du conducteur de conduire à vitesse élevée et ZF3 une variable distribuée selon une loi normale de moyenne 0.5 et d'écart type 0.15 traduisant l'acceptation de taux d'accélération élevés.

- La formule pour les poids lourds n'est pas donnée dans la deuxième version de SIMLA ++ ; dans la première : $b\max = (0.04 + 0.04 \cdot ZF3) \cdot (25 - v)$.

Pour les véhicules particuliers, bmax est utilisée lorsque v = wu – 5 (m/s) ; l'accélération disponible décroît ensuite linéairement jusqu'à valoir 2×bnull, lorsque wu est atteinte, où bnull est l'accélération minimale fournie lors de l'appui sur la pédale d'accélération (valeur distribuée normalement entre 0 et $0.4 m/s^2$).

Les poids lourds utilisent quant à eux l'intégralité de l'accélération disponible.

Dans SIMLA ++, la vitesse désirée varie en fonction du temps ; la distribution de la vitesse désirée est une loi normale, dont la moyenne WU et l'écart type – fixé de telle sorte que les variations ne dépassent pas une amplitude de 1m/s - sont des constantes

pour chaque conducteur. La vitesse désirée est calculée à chaque pas de temps en fonction de cette distribution des vitesses. Si la vitesse instantanée est supérieure à la vitesse désirée instantanée, le conducteur retire son pied de la pédale de frein, ce qui donne au véhicule une décélération -bnull.

Phase d'approche

Le conducteur utilise une décélération B lui permettant d'atteindre la vitesse du véhicule précédent lorsque l'écart entre les deux véhicules correspond à ΔY_{max} (m) (cf. schéma de Wiedemann, 1974). B (m/s) est déterminée selon les considérations suivantes, présentées dans l'ordre chronologique d'examen :

- Calcul de $B = 0.5\frac{\Delta V^2}{\Delta Y_{max} - \Delta Y}$ où ΔY (m) est l'écart entre les deux véhicule au temps t;
- Si B < Bmin, décélération maximale de l'EVC, alors B = Bmin (valeur individuelle croissant linéairement avec la vitesse) ;
- Si B > -Bnull, alors B = -Bnull, où Bnull est la valeur minimale d'accélération contrôlable ;
- Introduction d'un temps de réaction : un temps de réaction de 1 s, correspondant au pas de temps de réévaluation des positions est pris en compte ; la variable NZF caractérise le temps de réaction supplémentaire de chaque conducteur. Lors de l'entrée du conducteur en phase d'approche, la décélération est réduite ainsi : $B = B(1 - NZF)$
- Si, en appliquant cette décélération, la vitesse du véhicule considéré est inférieure à la vitesse du véhicule précédent à l'issue du pas de temps, B est modifié ainsi : $B = -\Delta V - Bnull$

Conduite contrainte

L'EVC entre dans un mode « pendulaire » :

1. Si l'accélération est positive au dernier pas de temps, une décélération de valeur –Bnull est adoptée ;
2. Si l'accélération est négative au dernier pas de temps, une accélération de valeur Bnull est adoptée.

Réaction à un danger

L'EVC applique une décélération B lui permettant d'atteindre la vitesse du véhicule précédent lorsque l'écart entre les deux véhicules correspond à la distance minimale ΔY_{stop} entre les deux véhicules à l'arrêt. B est obtenu par les considération suivantes :

1. $B = 0.5\frac{\Delta V^2}{\Delta Y_{stop} - \Delta Y} + B_{n-1} + B_{\min}\frac{\Delta Y_{\min} - \Delta Y}{\Delta Y_{\min} - \Delta Y_{stop}}$ si $\Delta V > 0$

   B_{n-1} : décélération du véhicule précédent si les feux de freinage de celui-ci sont allumés ; 0 sinon

   ΔV : vitesse relative entre le véhicule considéré et son prédécesseur au temps t (m/s)

   ΔY_{min} (m) : écart minimal accepté, cf. schéma de Wiedemann (1975)

2. $B = \min\begin{bmatrix} B_{n-1} - \Delta V \\ -Bnull \end{bmatrix}$ si $\Delta V < 0$

   Le programme tient compte des difficultés du conducteur à percevoir le freinage du véhicule en ajoutant une valeur aléatoire selon la formule :

$$B = B + (1 - x)\cdot\frac{(1 - 2\cdot NZF)}{RL}$$

x est la capacité du conducteur à juger les écarts entre les véhicules

NZF est un nombre aléatoire issue d'une distribution normale centrée sur 0.5 et d'écart type 0.15, généré à chaque pas de temps de simulation

RL est une variable traduisant la capacité du conducteur à identifier les changements de vitesse du véhicule précédent

2.2 Mesure des vitesses désirées

Il s'agit de la vitesse que les conducteurs désirent atteindre lorsqu'ils se trouvent en situation « conduite libre » sur le diagramme de Wiedemann (1974). La première version du modèle (Brilon et Brannolte, 1977) propose une méthode basée sur les relevés terrain de temps de parcours, tandis que la deuxième méthode (Brannolte et Holz, 1983) s'intéresse au relevé par des capteurs ponctuels des vitesses instantanées et des temps de passage des véhicules. Dans les deux cas, la distribution recherchée (temps de parcours désiré, vitesse désirée) est ajustée sur un échantillon de véhicules représentatif de la condition de conduite libre. Les véhicules dont l'écart avec le véhicule précédent est supérieur à 8s et dont l'écart avec le véhicule suiveur est supérieur à 4s sont dans un premier temps choisis ; il s'agit des véhicules circulant seuls. L'analyse détaillée de la deuxième condition a montré que son influence était faible et que l'échantillon des véhicules circulant librement (i.e. dont l'écart avec le véhicule précédent est supérieur à 8 s) était satisfaisant.

2.3 Comportement de l'EVC en courbe

À partir de données de vitesse relevées sur le terrain ont été établies les répartitions des vitesses désirées dans les courbes en fonction de différentes valeurs de rayon (10, 100, 200, 350 et 500 m pour les véhicules particuliers ; 80, 140, 200 et 350 m pour les poids lourds). Il est supposé que les fonctions de répartition sont distinctes selon que le véhicule considéré est un véhicule particulier ou un poids lourd.

À chaque EVC est assigné la valeur Pwu du pourcentile de la distribution de vitesse désirée correspondant à la valeur obtenue pour l'EVC considéré. Soit ZF1 la prudence

du conducteur, variable aléatoire distribuée normalement de moyenne 0.5 et d'écart type 0.15. Le pourcentile P_k de la distribution de vitesses désirées dans les courbes est choisi pour chaque EVC selon la méthode essai erreur suivante :

1. Génération d'une valeur P_k
2. Si $ZF1 \geq 0.5$ et $P_k \geq P_{wu}$, retourner à l'étape 1
3. Si $ZF1 < 0.5$ et $P_k < P_{wu}$, retourner à l'étape 1

Ainsi, les conducteurs ayant une prudence importante choisiront une vitesse restreinte dans les courbes, tandis que les conducteurs imprudents choisiront une vitesse plus importante.

Le tracé en plan est caractérisé par la succession d'éléments droits, de clothoïdes et d'arcs de cercle. Chaque EVC n'applique pas la vitesse désirée en courbe dès son entrée sur l'arc de cercle ou sur la clothoïde correspondante, mais lorsqu'un certain changement d'angle β_a est atteint (correspondant à un point a) ; de même, le conducteur considère qu'il sort de la courbe dès que le changement d'angle restant est inférieur à $\beta_e = 2\ \beta_a$ (correspondant à un point e). La valeur de β_a décroît linéairement avec ZF1 :

$\beta_a = 0.1728\text{-}0.11 \times ZF1$ (rad).

Le calcul de la vitesse désirée nécessite la connaissance du rayon ressenti par l'usager. Or selon les valeurs de β_a et β_e, une certaine proportion de la trajectoire s'effectue sur la clothoïde, sur laquelle le rayon de courbure n'est pas constant. Le rayon est donc estimé par $\frac{x}{\beta}$, où x (m) est la distance parcourue entre les points d'entrée effective a et de sortie effective b de la courbe et β (rad) le changement d'angle correspondant.

La décélération utilisée pour atteindre la vitesse en courbe vaut :

$$b = -1.5 - 0.5 \cdot ZFWU + 0.5 \cdot ZF3 + (ZF1 - 0.5)\ \text{(m/s)}^2$$

À la sortie de chaque courbe, le conducteur estime la distance le séparant du début de la prochaine courbe et décide d'une stratégie d'accélération lui permettant d'atteindre la vitesse désirée sur la prochaine courbe à partir du point a.

2.4 Comportement de l'EVC en pente

Cas des véhicules particuliers :

L'accélération maximale disponible sur le plat pour un véhicule de vitesse v (m/s) vaut :

$$b\max = 1.9 - 0.07 \cdot v + 0.5 \cdot ZFWU + 1.5 \cdot ZF3 \,(\mathrm{m/s^2}).$$

Sur une pente de P % en valeur algébrique, le terme -9.81×P/100 est ajouté à cette accélération maximale.

Si la pente est positive, la vitesse désirée sur le plat est réduite d'un facteur 1-vl, avec :

$$vl = 10 \cdot \left(\frac{P}{100}\right)^2 \cdot e^{1-ZF3}$$

L'accélération désirée est donc égale à $bwill = 0.07 \cdot (wu \cdot (1 - vl) - v)$ (m/s^2). L'EVC utilise comme accélération le minimum de bwill et de bmax.

Cas des poids lourds :

Un modèle de distribution des vitesses d'équilibre dans les pentes a été développé par Brannolte et Holz (1983) sur la base de résultats empiriques ; son expression n'est cependant pas communiquée. La vitesse que cherche à atteindre le poids lourd est le minimum de la vitesse désirée et de la vitesse d'équilibre.

Pour atteindre cette vitesse, il est supposé que le conducteur utilise l'intégralité de l'accélération disponible, qui est assignée spécifiquement à chaque EVC de telle sorte que l'accélération soit nulle lorsque la vitesse de croisière est atteinte.

2.5 Génération des véhicules

Les flux sont séparés en deux types : circulation libre 1 et gênée 2. Les fonctions de répartition des écarts intervéhiculaires selon les deux modes sont les suivantes :

$$P_f(t_1 > t) = e^{-\frac{t-t_0}{t\mu_1 - t_0}}$$

$$P_f(t_2 > t) = e^{-\frac{t-t_0}{t\mu_2 - t_0}}$$

P_f (respectivement P_g) est la probabilité qu'un créneau de taille $t_l > t$ se présente dans la circulation libre (dans la circulation gênée) ; t_0 est la valeur du créneau minimum en conditions de circulation libre et gênée (sa valeur n'est pas indiquée) ; $t_{\mu 1}$ ($t_{\mu 2}$) est le créneau moyen en circulation libre (gênée).

Les proportions respectives de chaque type de circulation a_1 et a_2 sont déterminées par :

$$a_1 = e^{-0.0016 \cdot Q}$$
$$a_2 = 1 - a_1$$

Les écarts moyens valent :

$t_{\mu 2} = 2.2$ s

$$\text{Alors } t_{\mu 1} = \frac{\frac{3600}{Q} - a_2 t_{\mu 2}}{a_1}$$

Un nombre aléatoire doit être généré (selon une distribution uniforme entre 0 et 1) ; si celui-ci est inférieur à a_1, le véhicule est en circulation libre sinon en circulation gênée. Un deuxième nombre aléatoire permet ensuite de déterminer le créneau à partir des distributions de probabilité décrites ci-dessus.

- Le premier véhicule est généré selon la proportion respective des deux types de véhicules ;

➢ Les véhicules suivants sont générés à partir de la connaissance du type du véhicule précédent :

Soient P_a et $P_b = 1 - P_a$ la proportion de poids lourds et de véhicules particuliers. La proportion de poids lourds suivant un poids lourd devrait être P_a^2. En réalité, cette proportion vaut $P_a.(P_a + B)$. B est estimé par une étude sur le terrain (dans SIMLA ++, B = 0,05). Dans ce cas, si le véhicule précédent est un poids lourds a (respectivement véhicule particulier b), les probabilités P_{aa} et P_{ba} (respectivement P_{ab} et P_{bb}) qu'un poids lourd (respectivement véhicule particulier) suive valent :

$$P_{aa} = B + P_a$$
$$P_{ba} = P_b - B$$
$$P_{ab} = (P_b - B)\frac{P_a}{P_b}$$
$$P_{bb} = \frac{1 - P_a(1 - B + P_b)}{P_b}$$

Soit x le type du véhicule précédemment généré. Un nombre aléatoire est généré à partir d'une distribution uniforme sur [0,1]. S'il est inférieur à P_{xa}, le véhicule généré est un véhicule particulier, sinon il s'agit d'un poids lourd.

Les temps d'arrivée des véhicules sont calculés en ajoutant au temps d'arrivée du véhicule précédent l'écart calculé selon la méthode ci-dessus. Les véhicules sont positionnés à une position et avec une vitesse sécuritaires, déterminés grâce au modèle de Wiedemann (1974).

2.6 Manœuvre de dépassement

Le véhicule considérant le dépassement est noté I ; il envisage le dépassement d'un nombre maximum de 4 véhicules le précédant.

Désir de dépasser

Le véhicule considéré I de vitesse v_I désire dépasser le véhicule précédent J de vitesse v_J lorsque les conditions suivantes sont remplies :

- $\Delta Y < 2\,\Delta Ymax$
- La vitesse désirée du véhicule I est au moins supérieure d'une valeur $SUDV = \frac{Q}{252} \cdot (0.5 + VAR9)$ à la vitesse instantanée du véhicule précédent. VAR9 est issue d'une distribution normale centrée sur 0.5 et d'écart type 0.15 ;
- Le véhicule J n'est pas engagé dans une manœuvre de dépassement ou a un désir de dépasser nul ;
- Aucun véhicule suiveur du véhicule I n'est engagé dans un dépassement qui concerne le véhicule I.

Décision de dépasser

Lorsque le véhicule I désire dépasser, il observe si le trafic en sens opposé offre un créneau suffisant pour achever un dépassement.

La disponibilité physique d'un créneau de dépassement est tout d'abord vérifiée, en considérant que le véhicule utilise une accélération constante égale à la moitié de l'accélération maximale disponible à v, vitesse du véhicule I au moment où il considère le dépassement. Il est supposé que le véhicule opposé circule à la valeur correspondant au maximum de sa vitesse actuelle et de sa vitesse désirée, et que le véhicule dépassé maintient sa vitesse constante.

Finalement, le créneau spatial de dépassement doit être supérieur à une valeur individuelle CS, qui suit une loi log normale de moyenne $310+12.2v_J$ (m), d'écart type $6.5v_J$ (m) et de valeur minimale $310+1.5v_J$ (m).

Dès que la décision de dépasser est prise, le véhicule se positionne sur la voie de gauche.

Réinsertion et dépassement multiple

Dès que le véhicule dépassant I se retrouve devant le véhicule dépassé J, il observe s'il lui est possible de dépasser le futur véhicule précédent I-1. Les procédures de désir de dépasser et de décision de dépasser sont utilisées.

S'il ne peut pas prolonger son dépassement à un autre véhicule, il continue son dépassement et se réinsère dès que l'écart avec le véhicule J est supérieur à ΔY_{stop}.

Déplacement lors du dépassement

Le déplacement est contrôlé par le modèle de Wiedemann (1974), par rapport au véhicule précédent également situé sur la voie de gauche.

3. SSIUEL

SSIUEL effectue une revue détaillée du dépassement sans tenir compte de l'effet de la visibilité, des pentes et des courbes. Il s'agit du seul modèle à proposer de considérer tous les effets d'un dépassement :

- Interactions entre les véhicules dépassants et les autres véhicules ;
- Détermination physique de la distance nécessaire pour effectuer un dépassement ;
- Description détaillée des différentes manœuvres liées au dépassement.

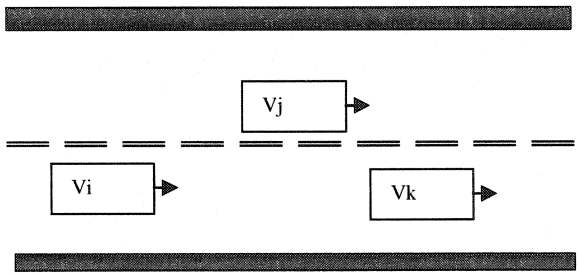
Le modèle de Wiedemann (1974) est utilisé pour décrire les mouvements des véhicules sur leurs voies (cf. SIMLA ++ pour une description détaillée). Dans chaque domaine d'interaction, de nouvelles formules d'accélération/décélération ont été calibrées.

La génération des véhicules s'effectue avec une répartition de trafic hétérogène (2 types de véhicules) et à deux phases (gêné et libre). Une zone tampon est ajoutée pour permettre la création d'un trafic réaliste.

3.1 Comportement de conduite des conducteurs situés sur leur voie de circulation, en fonction de véhicules effectuant des dépassements dans l'environnement

Trois situations de conduite complexes se présentent, pour lesquelles une réaction « spéciale » du conducteur est requise :

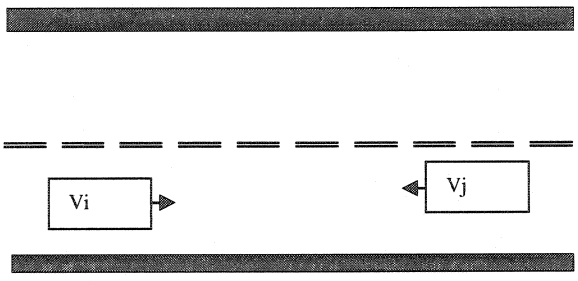
1. présence d'un véhicule j dans le même sens de circulation, situé en aval et effectuant un dépassement;



Soit k le véhicule précédant le véhicule considéré i. Si j est plus éloigné de i que k, ou si j est éloigné de telle sorte que i se situe en conduite libre par rapport à j, alors i n'est pas influencé par j. Sinon, plusieurs configurations sont à distinguer :

- j veut dépasser k
  i. j freine : i détermine son accélération par rapport à j et à k, celle-ci est au maximum nulle.
  ii. j est plus lent que i : i détermine son accélération par rapport à j et à k ;
- j veut se réinsérer dans sa voie de circulation : i détermine son accélération par rapport à j.

2. présence d'un véhicule j dans le sens opposé, situé en aval et effectuant un dépassement;



Soit i le véhicule considéré. Le modèle détermine la distance à parcourir par j pour compléter le dépassement S_u, la distance S_i parcourue par le véhicule i pendant que j effectue son dépassement et une marge de sécurité SLS. La

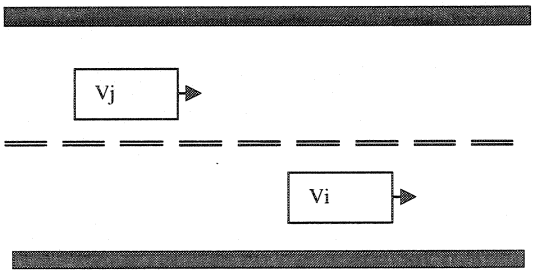
quantité SW = S_u + S_i + SLS est la distance requise pour le dépassement et est comparée à la distance DS séparant les deux véhicules. Deux cas se présentent, pour lesquels une décélération de i est nécessaire :

- DS < S_u, dans ce cas, i effectue un freinage d'urgence avec la valeur maximum ;
- DS > S_u etD S < SW, la décélération nécessaire est estimée de telle sorte que S_i diminue et soit telle que DS = SW. Elle vaut $2\frac{DS - SW}{T_u^2}$ (T_u est le temps nécessaire pour le dépassement).
- Si DS>SW, le véhicule i peut éventuellement accélérer, avec une valeur maximale déterminée de telle sorte que DS=SW. Elle vaut $2\frac{DS - SW}{T_u^2}$ (T_u est le temps nécessaire pour le dépassement).

Note : S_u et T_u sont déterminés au paragraphe suivant comportement de dépassement

3. présence d'un véhicule dans les même sens de circulation, situé en amont et effectuant un dépassement.

Le dépassement n'a une influence que s'il est effectué sur le véhicule considéré ; celui-ci devrait maintenir sa vitesse constante. Ceci se traduit par une accélération maximale nulle. Une décélération est cependant possible selon des critères sécuritaires.



3.2 Comportement de dépassement

Dépassement multiple

Le véhicule considéré pour la détermination du créneau critique dépend de la situation :

- si un véhicule lent est isolé, il devient l'objet du dépassement ;
- si un peloton de véhicules est rattrapé, le dépassement de chaque véhicule à compter du véhicule de tête est considéré, avec un maximum de 3 véhicules dépassés.

Lorsqu'un dépassement multiple est envisagé, un véhicule virtuel de vitesse celle du véhicule de tête du groupe dépassé et de longueur la distance entre le pare-choc avant du véhicule de tête et le pare-choc arrière du véhicule de queue est considéré.

Vitesse du dépassement

La vitesse de dépassement est comprise entre 1.5 fois la vitesse désirée et 1.03 fois la vitesse du véhicule dépassé. Elle est fixée par un processus itératif permettant de déterminer la vitesse optimale pour le dépassement, i.e. la plus faible vitesse possible permettant un dépassement sûr. Pendant le dépassement, cette vitesse est également adaptée au créneau de retour dans sa voie de circulation (adoption d'une vitesse d'autant plus faible que le créneau est court) et au créneau disponible pour le dépassement (vitesse d'autant plus élevée que le créneau est court).

Créneau nécessaire

2 conditions doivent être vérifiées pour qu'un dépassement soit entamé :

1. Un créneau minimum garantissant l'absence de collision frontale avec un véhicule en sens opposé est disponible ;

Ce créneau comprend trois composantes : la distance à parcourir pour le dépassement, la distance parcourue par le véhicule k arrivant en sens opposé et la marge de sécurité entre le véhicule opposé k et le véhicule dépassant i.

Note : lors du dépassement, le véhicule dépassé j ne peut accélérer, il est donc supposé que sa vitesse V_j reste constante pendant le dépassement.

Détermination de la distance à parcourir :

La distance relative de dépassement $S_{ur} = D_{ij} + ABX + FZL_i$ est la somme de l'écart entre le véhicule dépassant i et le véhicule dépassé j à l'initiation du dépassement D_{ij}, de l'écart minimal entre le véhicule dépassé i et le véhicule dépassant j, soit le seuil ABX en deçà duquel un véhicule suiveur se trouve en position de danger par rapport au véhicule précédent dans le modèle de Wiedemann (1974) et de la longueur du véhicule dépassé FZL_i.

La distance de dépassement effectivement utilisée peut être estimée à partir de la distance relative :

Cas du dépassement lancé :

Le véhicule i conserve une vitesse constante V_i, le temps mis pour dépasser vaut $T_u = \frac{S_{ur}}{V_i - V_j}$, et la distance à parcourir : $S_u = \frac{V_i}{V_i - V_j} S_{ur}$

Cas du dépassement arrêté :

Le véhicule accélère jusqu'à sa vitesse maximum V_{max} et parcoure une distance S_b, calculée par : $S_b = \int_{V_i}^{V_{MAX}} \frac{V}{B} dV$, en un temps $T_b = \int_{V_i}^{V_{MAX}} \frac{1}{B} dV$, où B ($m/s^2$) est donnée en fonction de la vitesse du véhicule V (m/s) par :

$B = 0.6\left(7 - \sqrt{V}\right)$ pour les véhicules particuliers

$B = 1.237 \cdot e^{-0.0352 \cdot V}$ pour les poids lourds

avec une pondération par un facteur représentant l'agressivité du conducteur.

Pendant le temps d'accélération, le véhicule j a parcouru la distance $S_m = V_j T_b$.

Si $S_m > S_b$, le véhicule dépassant roule pendant un temps $T_r = \frac{S_m - S_b}{V_{MAX} - V_j} T_r$ à la vitesse V_{MAX}. Donc $T_u = T_r + T_b$ et $S_u = V_j T_u + S_{ur}$

Sinon, le dépassement est achevé avant que la vitesse maximum soit atteinte. La vitesse V atteinte à la fin du dépassement est cherchée par un processus d'essai erreur. Ceci permet de déterminer S_u et T_u.

Distance parcourue par le véhicule opposé k :

$S_g = V_g T_u$ (V_g est la vitesse du véhicule opposé k au début du dépassement, supposée constante).

Marge de sécurité à la fin du dépassement :

$l_s = 30 (4 FDS - 1)$ où FDS est l'acceptation du conducteur de créneaux courts dans le modèle de Wiedemann (1974).

Le créneau minimum de dépassement vaut donc $S_u + S_g + l_s$

2. Un créneau suffisamment important pour le retour sur sa voie de circulation est disponible devant le véhicule dépassé.

Soit k le véhicule précédent le véhicule dépassé j au début du dépassement. Si DS_{ik} est le créneau entre i et k au début du dépassement, celui-ci vaut $DS_{ik} + S_k - S_u$ à la fin du dépassement. S_u est la distance parcourue lors du dépassement et correspond à la valeur déterminée précédemment. $S_k = V_k T_u + b_k T_u^2$ si k décélère en dépassant un seuil $b_k = 0.5 m/s^2$; $S_k = V_k T_u$ si le seuil n'est pas dépassé ou si k se déplace à vitesse constante V_k ou accélère au début du dépassement. La valeur de S_k ayant été déterminée, deux cas sont distingués :

- i est plus lent que k à la fin du dépassement ; dans ce cas le retour sera possible si DS > ABX ;
- i est plus rapide que k à la fin du dépassement. Dans ce cas, il faut qu'il puisse décélérer sans entrer en collision avec k. La distance DS'

entre les deux véhicules au moment où i a décéléré jusqu'à la vitesse k en utilisant le freinage maximum – et en supposant que le comportement de k est toujours consistant – est calculée. Si DS' > ABX, le retour sera possible.

3.3 Manoeuvres effectuées lors de l'initiation et de l'achèvement du dépassement

Préparation à un dépassement :

Avant le dépassement, une partie du trajet est effectuée sur sa voie de circulation, afin de minimiser la portion du dépassement effectuée avec une sensation de danger de collision frontale. Le moment de changement de voie correspond à la réalisation d'une des deux contraintes suivantes :

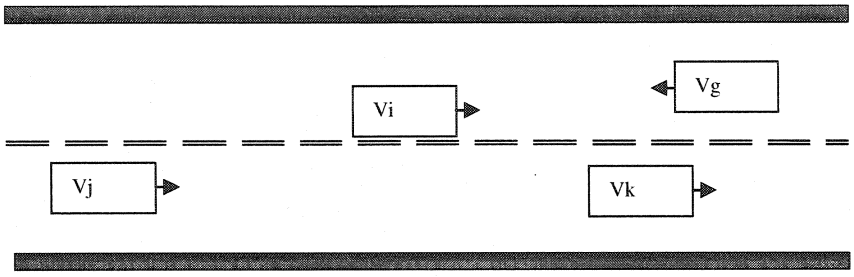
1. éviter une collision par l'arrière avec le véhicule dépassé lors du parcours sur la trajectoire de changement de voie ;
2. pouvoir freiner sans entrer en collision avec le véhicule précédent si le dépassement est abandonné.

Les conditions sont déterminées selon un processus analogue à la détermination du créneau minimum ou de la possibilité de retour sur sa voie après achèvement du dépassement.

Achèvement du dépassement :

Le schéma page suivante indique quels véhicules interviennent dans la prise de décision de changer de voie pour compléter le dépassement :

1. lorsque l'écart avec le véhicule opposé g devient trop court, le changement de voie est impératif;
2. lorsque le véhicule dépassant i est trop proche du prochain véhicule précédent k, il doit freiner avant d'effectuer le changement de voie;
3. Lorsque l'écart avec le véhicule dépassé j est trop faible, il doit accélérer pour disposer d'un écart suffisant.



Les considérations suivantes, présentées en ordre hiérarchique[19], permettent au conducteur d'effectuer son choix rationnellement :

1. Si l'écart DS entre g et i est inférieur à 30 FDS, où FDS est l'acceptation du conducteur de créneaux courts dans le modèle de Wiedemann (1974), alors le retour est impératif. i détermine sa vitesse par rapport à k par le modèle de Wiedemann (1974). Cependant, considérant le temps mis pour changer de voie T_{spw}, il se peut que cette réaction ne soit pas suffisante pour éviter une collision avec le véhicule g. La distance parcourue pendant le changement de voie est : $S_f = (V_i + V_g)\, T_{spw}$. Si $DS < S_f$, g décélère de telle sorte que $DS = S_f$; sinon, une accélération maximum égale à $2\frac{(DS - S_f)}{T_{spw}^2}$ est permise ;

2. Le conducteur i considère avec le modèle de Wiedemann (1974) si un risque de collision avec le véhicule k est possible. Dans le cas positif, une décélération permettant de se placer à une distance suffisante de k est calculée. Le retour sur sa voie de circulation ne sera possible que lorsque le risque de collision sera éliminé.

---

[19] Si une condition est remplie à une étape hiérarchique supérieure, alors les étapes suivantes ne sont pas observées

3. Si l'écart entre j et i est inférieur à AX (écart minimal à l'arrêt), le véhicule i ne peut retourner sur sa voie. Il poursuit son déplacement normalement jusqu'à obtention de l'écart minimum.

4. Si l'écart par rapport à g est égal à la marge de sécurité l_s, le véhicule retourne immédiatement sur sa voie de circulation. Les considérations sur les accélérations et décélérations des véhicules du point 1. sont également valables dans ce cas.

5. i observe dans quel domaine du modèle de Wiedemann il se situe par rapport à k. S'il est en situation de danger et que sa vitesse est supérieure à la vitesse de k, il freine grâce au module « danger » du modèle de Wiedemann. Sinon, il peut entamer la manœuvre de changement de voie. Dans le cas où il se situe cependant dans le domaine de circulation libre, il observe sa position par rapport à j (cas 6.)

6. Si la distance par rapport à j est plus grande que l'écart minimal de voiture suiveuse (FDS $(1.5 + 4.5\ V_j^{0.5})$), la manoeuvre de changement de voie est initiée. Sinon, il poursuit son dépassement pour s'éloigner de j.

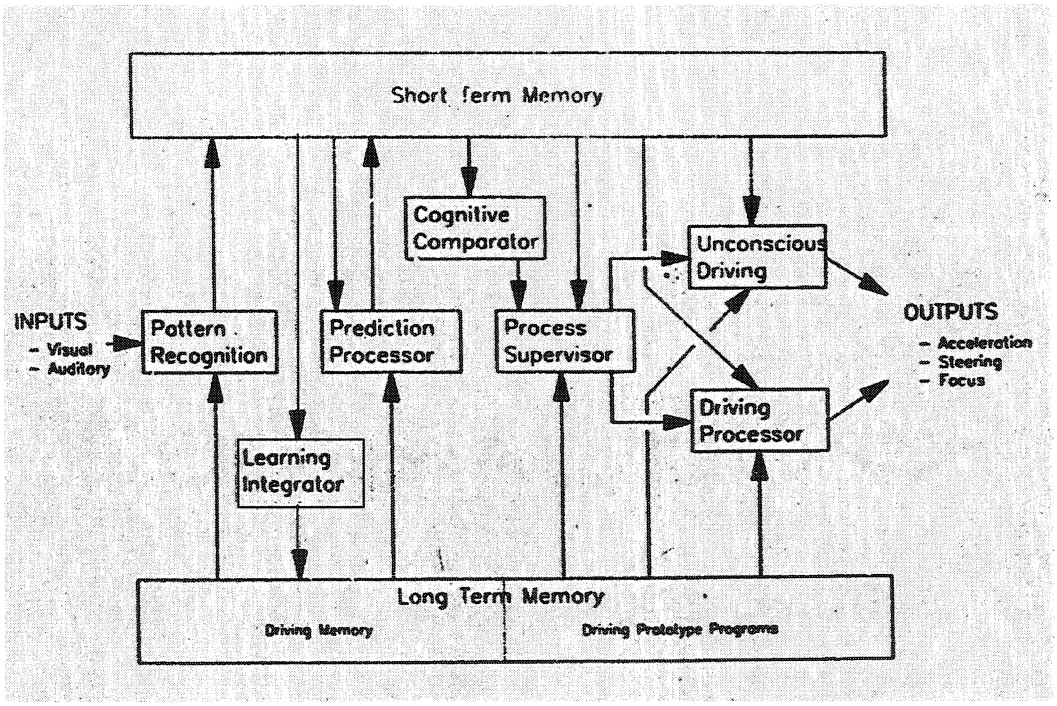
4. Modèle de Stang

Dans Stang (1993) est développée une base de compréhension du fonctionnement du cerveau du conducteur à partir de la logique floue. En réponse aux conditions de l'environnement et aux objectifs du conducteur, une accélération et un taux de changement de l'angle de braquage des roues sont produits. Les réactions sont basées :

- sur la comparaison entre la mémoire à court terme du conducteur (qui contient les informations sur lesquelles le conducteur concentre son attention et les informations périphériques, dont la vitesse de changement peut induire une réaction) et la mémoire à long terme (expérience du conducteur, qui lui permet d'anticiper l'état du système ; programmes de conduite);

- sur certains programmes de conduite conscients et inconscients dépendant des priorités de l'utilisateur (plaisir de la conduite risquée, sécurité de la conduite, vitesse de parcours).

Le schéma ci-dessous reproduit le fonctionnement du cerveau lors de la tâche « conduire ».



Les boîtes situées sur le graphique permettant la communication entre la mémoire à court terme et la mémoire à long terme sont des centres d'activité ; on distingue :

1. Reconnaissance de objets : quels sont les objets dans l'environnement de conduite ? Quels sont les objets situés dans la zone d'attention périphérique, qui suscitent une réaction immédiate du conducteur lorsque leurs propriétés varient avec une vitesse très élevée ? Quels sont les objets sur lesquels le conducteur concentre son regard ? Avec quelle précision sont détectées les caractéristiques (sont-elles floues ?) ? Combien de temps sont conservés les photos instantanées de l'environnement dans la mémoire à court terme ?

2. Processeur de prédiction : ce centre compare l'histoire des objets générée par la reconnaissance des objets avec l'expérience disponible dans la mémoire à long terme. Il forme ainsi un état futur hypothétique, qui est stockée dans la mémoire à court terme.

3. Comparateur cognitif : ce centre détermine le niveau de stress auquel est soumis le conducteur. Il peut être dû à la prédiction d'une situation pour laquelle l'expérience du conducteur indique un danger potentiel, ou à l'apparition de situation inattendues (comparaison des prédictions précédentes avec la situation actuelle). Outre la production d'un niveau de stress, ce centre attire l'attention du conducteur vers certains objets qui étaient auparavant situés dans la zone périphérique.

4. Superviseur de processus : la conduite est gouvernée par des programmes, correspondant aux expériences de conduite. Ils consistent en une liste d'actions effectuées pour atteindre un certain résultat désiré. Les programmes sont activés lorsqu'un certain niveau de stress se présente et qu'un certain degré d'appartenance est atteint. Le niveau d'appartenance indique quelles conditions de circulation induisent le début d'un programme. Ainsi, le rapprochement par rapport à un véhicule lent peut induire un programme de dépassement. Si le niveau d'appartenance est supérieur au stress, le programme peut être exécuté. La condition contraire indique que le programme n'est pas une réaction adaptée aux circonstances. Un programme en cours peut être stoppé par un programme d'un ordre de stress supérieur. Par exemple, l'exécution d'un dépassement correspond à un niveau de stress moins élevé que l'abandon. Par conséquent, si un véhicule en sens opposé se rapproche trop lors de l'exécution d'un dépassement, l'augmentation du stress va conduire à l'exécution d'un programme d'abandon du dépassement. Le modèle prend en compte la distraction du conducteur. Lorsque celui-ci entre dans un état distrait, il

fonctionne en mode inconscient. Ni le processeur prédictif, ni le niveau de stress ne sont alors plus considérés.

5. Le processeur de conduite indique une accélération, un braquage du volant et une modification de l'objet sur lequel le regard se focalise.

Stang (1993) a calibré son modèle dans le cas d'une route rurale, ce qui signifie qu'il a déterminé des schémas d'expérience de conduite dans la mémoire à long terme ainsi que des programmes de conduite.

5. Modèle d'automates cellulaires

5.1 Introduction aux automates cellulaires

Il s'agit d'un domaine de l'informatique qui cherche à modéliser les systèmes réels complexes à partir d'une définition la plus simple possible des interactions entre les différents objets qui composent le système. En détails, lorsqu'un phénomène spatio-temporel est étudié, une discrétisation à la fois de l'espace et du temps est réalisée. Un quadrillage à n dimensions est donc obtenu. L'état de chaque carreau est alors décrit : dans le cas le plus simple, avec un phénomène ne possédant qu'une dimension spatiale (par exemple l'écoulement du trafic sur une route), l'état du carreau peut prendre deux valeurs 0 ou 1 et son comportement dépend du voisinage immédiat, c'est à dire des deux carreaux l'entourant ; à deux dimensions, un exemple très populaire d'automates cellulaires est : « the game of life » de Conway (Gardner, 1970). Le problème des automates cellulaires est que, du fait de la discrétisation, la précision obtenue est nécessairement inférieure aux modèles continus.

En ce qui concerne la modélisation du trafic, les automates cellulaires sont utiles pour la modélisation microscopique du trafic. En effet, si l'espace est pris en compte de manière continue dans de nombreux modèles, cette caractéristique rend les modèles très difficiles à calibrer pour obtenir un comportement réaliste. Lorsque l'étude réalisée ne nécessite pas une précision extrêmement importante, l'utilisation d'automates cellulaires devient pertinente.

Historiquement, Nagel et Schreckenberg (1992) ont créé le premier modèle microscopique basé sur les automates cellulaires, concernant le déplacement sur une route à une voie, auquel a succédé un premier modèle décrivant le changement de voie (Rickert, Nagel, Schreckenberg et Latour, 1996). Récemment Simon et Gutowitz (1998) décrivent le processus de dépassement. À l'aide de ces diverses références et de notre compréhension de la modélisation microscopique développée plus haut, observons quels sont les différentes interactions entrant en jeu :

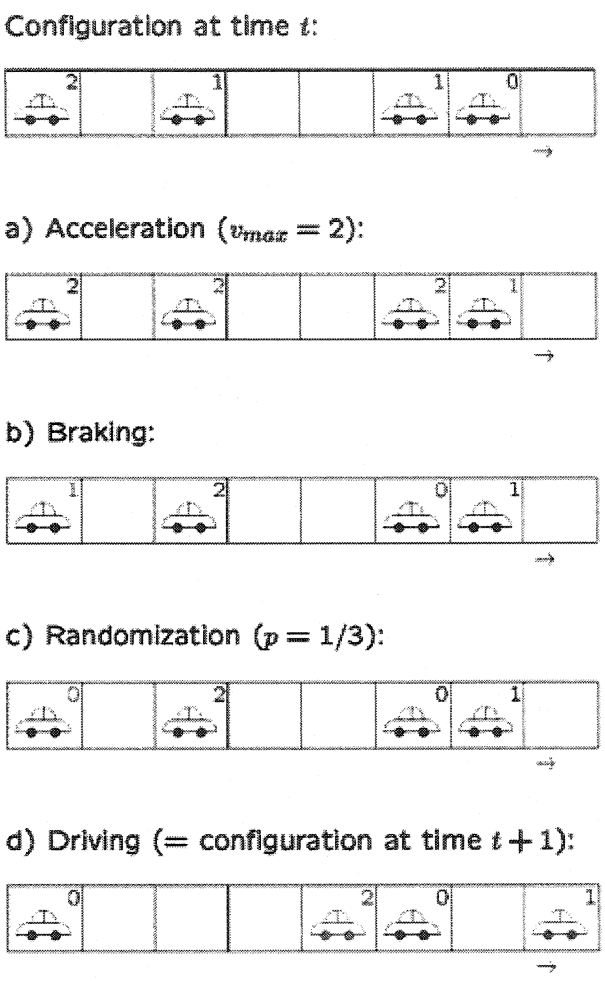
5.2 Principes généraux

- Pas de discrétisation temporelle : égal au temps de réaction, en général 1s
- Pas de discrétisation spatiale : égal à l'espace physiquement occupé par une voiture à l'arrêt (c'est à dire sa taille plus l'espace moyen à l'arrière du véhicule dans lequel aucun autre véhicule n'entre), en général 6.5 à 7.5 m
- Système de mise à jour des cellules : à chaque pas de temps, l'état de l'ensemble des cellules est recalculé simultanément. Ce système permet de prendre en compte le temps de réaction, car la position du véhicule au temps i+1 va dépendre des vitesses relatives et interdistances au temps i. Cette caractéristique explique en fait pourquoi le pas de temps est pris égal au temps de réaction.
- Chaque carreau peut prendre un nombre fini d'état, correspondant à la présence d'un véhicule et à sa vitesse. La valeur est -1 si il n'y a pas de véhicules, $0 \leq v \leq v_{max}$ si un véhicule est présent.

5.3 Modèle à une voie

À partir de cette formalisation du phénomène réel, l'état du système pour un modèle à une voie le plus simple (tel que décrit dans Nagel et Schreckenberg, 1992) est le suivant (la figure x schématise parallèlement le procédé) :

1. Accélération des véhicules : si la vitesse du véhicule est inférieure à la vitesse maximale, alors elle est augmentée d'une unité
2. Si la vitesse ainsi calculée est supérieure à l'espace entre les véhicules, alors la vitesse est égale au nombre de carreaux séparant les deux véhicules
3. Pour que le processus soit stochastique, on force le freinage d'une unité de vitesse de certains véhicules choisis aléatoirement
4. L'état des carreaux est finalement modifié selon le procédé général décrit ci-dessus



5.4 Modèle de changement de voie

Le modèle décrit dans Rickert, Nagel, Schreckenberg et Latour (1996) est présenté ici :

Le choix de changer de ligne est effectué après la sélection de la vitesse et dépend des valeurs des variables suivantes :

- Interdistance avec le véhicule précédent sur la même voie et interdistances maxima à partir desquelles une interaction entre les véhicules incite à changer de voie.
- Interdistance avec les véhicules précédents et derrière sur la voie opposée et interdistances minimum nécessaires pour effectuer un changement de voie en sécurité.

Tous les véhicules pour lesquels il y a interaction avec le véhicule précédent sur la même voie et qui peuvent effectuer un changement de voie sûr sont susceptibles d'effectuer de changer de voie. Une sélection aléatoire parmi ses véhicules détermine lesquels le font effectivement.

5.5 Modèle à deux voies et deux sens de circulation

L'évolution de l'état du système entre les temps i et i + 1 est effectuée en deux temps :

1. Tout d'abord le véhicule détermine s'il change de voie ou non
2. Ensuite, il modifie sa vitesse selon une adaptation du modèle à une voie

Dans ce cas, pour tenir compte de la présence de trafic dans deux sens de circulation, certains paramètres du système doivent être créés ou modifiés :

- Un sens de circulation « positif » est défini. Les états des carreaux sont alors compris entre $-v_{max}-1$ et $v_{max}+1$. 0 représente l'absence de véhicule, une valeur positive v un véhicule se déplaçant dans le sens positif à la vitesse v – 1 et une valeur négative –v un véhicule se déplaçant dans le sens opposé au sens positif à la vitesse v – 1
- Le paramètre H indique si le véhicule se trouve sur la voie correspondant à son sens de circulation
- Le paramètre oncoming indique si le véhicule précédent se déplace dans la direction opposée
- La densité entre en compte dans le choix de dépasser ou non, celle de la voie de circulation pour déterminer s'il est possible de se rabattre après le dépassement et celle de la voie dans le sens opposé pour déterminer s'il y a assez d'espace pour dépasser.
- Un paramètre l_{pass} indique à partir de quelle interdistance le conducteur envisage un dépassement

Muni de ces données, le modèle est alors le suivant :

Le changement de voie est effectué dans les deux cas suivants :

1. Le véhicule se situe sur la voie correspondant à son sens de circulation ; il y a changement de voie si les quatre conditions suivantes sont remplies :

- L'interdistance est inférieure à l_{pass}
- Les espaces sur la voie opposée par rapport à la voiture arrivant et par rapport au dernier obstacle rencontré sont sécuritaires (i.e. supérieurs aux distances de sécurité l_{opp} et l_{behind})
- La densité locale devant la voiture précédente est inférieure à une valeur limite
- Le tirage d'une valeur aléatoire donne un nombre inférieur à la probabilité de dépassement

2. Le véhicule se trouve sur la voie opposée à son sens de circulation ; il y a changement de voie si une des deux conditions sont remplies :

- L'espace sur la voie opposée est insécuritaire
- Le dépassement est accompli : l'espace devant sur la voie «normale » est sécuritaire de même que l'espace derrière.

La détermination de la vitesse dépend alors de la procédure suivante :

3. Accélération des véhicules : si la vitesse du véhicule est inférieure à la vitesse maximale, alors elle est augmentée d'une unité
4. Si un véhicule arrive en contresens et si la vitesse calculée est supérieure à l'espace entre les deux véhicules, alors celui-ci freine d'urgence. Il ne parcourt que la moitié de l'interdistance.
5. S'il n'y a pas de véhicule arrivant en contresens, et si la vitesse calculée est supérieure à l'espace par rapport au véhicule précédent, alors la vitesse est égale au nombre de carreaux séparant les deux véhicules

6. Si le véhicule est sur sa voie, si sa vitesse est non nulle et si aucun véhicule n'arrive en face, alors le véhicule est ralenti aléatoirement
7. Si le véhicule est sur sa voie et qu'un autre véhicule arrive en face, alors il freine d'une unité
8. L'état des carreaux est finalement modifié grâce aux vitesses définies ci-haut

L'analyse des résultats observés (représentation du débit sur une voie en fonction de l'autre voie) coïncide avec certaines études empiriques. Notamment, on note un débit total maximum lorsque les deux voies supportent chacune la moitié du trafic (il est possible de dépasser raisonnablement sur les deux voies).

6. Autres modèles

6.1 TRARR

TRARR a été développé pour l'ARRB par Robinson (1978) (cf. Hoban et Mc Lean, 1982) puis amélioré successivement en 1985 et 1991. Une comparaison du modèle avec TWOPAS (Harwood, May, Anderson, Leiman, et Archilla, 1999) montre que les caractéristiques et les résultats des deux modèles sont très peu distincts.

Quelques remarques tirées de Hoban et Mc Lean (1982) sont néanmoins pertinentes :

- Lorsqu'un véhicule désire dépasser, l'écart avec le véhicule précédent diminue fortement
- Lorsque plusieurs véhicules dépassent le même, la file de véhicules dépassants adopte un comportement de voiture suiveuse.
- Lors du dépassement, l'accélération maximale utilisée est supérieure à l'accélération libre
- Un indice d'agressivité caractérise le comportement des conducteurs. Si les véhicules l'entourant sont plus agressifs, le conducteur ne désire pas dépasser avant ceux-ci. Cet indice dépend de plusieurs facteurs : psychologie du conducteur, vitesse relative avec le véhicule à dépasser, place dans le peloton

- Le dépassement sans véhicule en vue est géré selon deux cas :
- Un véhicule virtuel se trouve à la limite de la distance de visibilité
- Le conducteur vérifie d'abord s'il peut atteindre le pare chocs arrière du véhicule précédent et si, à partir de cette position, le dépassement serait sûr en considérant un véhicule juste en dehors de la distance de visibilité.

6.2 HUTSIM

HUTSIM est un modèle de simulation microscopique développé par la « Helsinki University of Technology » (fin des années 80). En collaboration avec la « Ruhr-Universität Bochum », un modèle de trafic pour les routes rurales à 2 voies a été développé. Le modèle de voiture suiveuse est décrit par Jimenez (2000).

Il s'agit d'une suite de règles décrivant chacune une condition de circulation, dont l'importance est croissante (la règle antécédente domine les précédentes). Soit V la vitesse du véhicule au temps t, qui doit être réévaluée au temps $t+\tau$, $V_{désirée}$ sa vitesse désirée, S_{min} la distance minimale de sécurité que le conducteur désire conserver et W_{stab} un paramètre spatial de stabilité.

1. Cas par défaut : maintenir la vitesse
2. Si $V < V_{désirée}$ et un temps minimum T_{min} s'est écoulé depuis la dernière accélération, augmenter la vitesse d'une unité (les vitesses sont des nombres entiers de km/h)
3. Ne pas accélérer si la distance à un obstacle est inférieure à une distance ($S_{min} + W_{stab}$).
4. Décélérer d'une unité si la distance à l'obstacle est inférieure à S_{min}
5. Ne pas décélérer si la vitesse est déjà inférieure à celle de l'obstacle

La manœuvre de dépassement est effectuée comme suit :

1. La demande de dépassement est contrôlée par l'étude de la décélération que le conducteur doit fournir pour suivre le véhicule précédent. Si celle-ci est supérieure à celle qu'il lui faudrait fournir après dépassement, alors le conducteur choisit de dépasser.
2. Choix de dépasser : le conducteur compare le temps nécessaire pour effectuer le dépassement et le temps disponible. Comme ces estimations sont très délicates, une marge de sécurité importante (4s) est sélectionnée, dont la valeur est différente pour chaque conducteur. Le conducteur évalue le temps disponible pour le dépassement à partir de la distance le séparant du véhicule opposé et d'une estimation de la vitesse par la vitesse moyenne sur la route.
3. Le conducteur accélère linéairement jusqu'à atteindre une vitesse de dépassement.
4. Lorsque aucun véhicule opposé ne survient ou qu'aucune restriction de visibilité ne gêne le dépassement, les écarts avec le véhicule dépassé et le nouveau précédent sont légèrement inférieurs à ceux utilisés en situation de voiture suiveuse.
5. Lorsque les dangers se rapprochent, les écarts diminuent très fortement.

Annexe D

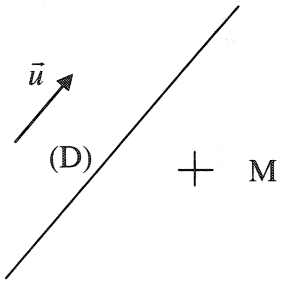
Recomposition du tracé en plan à partir de données GPS

La méthode est générale est présentée dans le Chapitre 4 Créneaux de dépassement offerts. Il s'agit dans cette annexe de décrire les techniques mathématiques qui permettent d'ajuster une droite ou un cercle à un ensemble de points, *dans le contexte routier.*

1. Droite aux moindres carrés

Les droites aux moindres carrés ont été étudiées en détails dans la littérature. L'exposé ci-contre a pour but d'en rappeler les caractéristiques. Cette technique d'ajustement nous permettra de déterminer les lignes droites du tracé en plan. Par extension du problème, la transformation classique du cercle en ligne droite nous permettra d'appliquer la technique d'ajustement aux courbes.

1.1 Distance d'un point à une droite



Soit (D) la droite d'équation ax + by + c = 0 et $M(x_M,y_M)$ le point pour lequel la distance par rapport à (D) doit être déterminée. Un vecteur directeur de (D) est : $\vec{u}=(-b,a)$; on pose en outre $a^2+b^2=1$.

Soit O(x',y') un point de la droite perpendiculaire à (D) passant par M. On cherche le point O appartenant à D, O vérifie donc : $ax'+by'+c=0$ (1)

Le vecteur $\vec{v}=(a,b)$ est unitaire et perpendiculaire à $\vec{u}$; par conséquent la distance d(M,D) est donnée par :

$$d(M,D)=\overrightarrow{OM}.\vec{v}=(x_M-x',y_M-y').(a,b)=a(x_M-x')+b(y_M-y') \quad (2)$$

En réintroduisant (1) dans (2), on obtient :

$$d(M,D) = ax_M + by_M + c$$

1.2 Détermination de la droite aux moindres carrés

Soit un ensemble de n points P_i (x_i,y_i). La droite ax + by + c = 0 caractérisant cet ensemble de points est cherchée. Le critère de sélection d'une droite proposée est basé sur la somme R^2 des carrés des distances des points à la droite.

La formulation standard du problème pose y = ax + b et cherche à minimiser :

$$R^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(ax_i + b - y_i\right)^2$$

Cependant, comme le note Keren (2003), les distances exactes entre la droite et les points ne sont pas ici prises en compte et ceci conduit à surestimer les écarts des points très éloignés.

En se basant sur le travail du paragraphe précédent, d'après (2), R^2 vaut en fait :

$$R^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(ax_i + by_i + c\right)^2 \text{, avec } a^2 + b^2 = 1$$

La droite minimisant la valeur de R^2 est cherchée.

Celle-ci est trouvée parmi les valeurs de a, b et c vérifiant l'ensemble de trois équations :

$$\frac{\partial R^2}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial R^2}{\partial b} = 0$$

$$\frac{\partial R^2}{\partial c} = 0$$

Les variables a et b sont cependant liées. Fixons la valeur de b > 0. Le système de trois équations devient, si a ≠0 :

$$\frac{\partial R^2}{\partial a} = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} (x_i - \frac{a}{b} y_i)(ax_i + by_i + c) = 0$$

$$a^2 + b^2 = 1$$

$$\frac{\partial R^2}{\partial c} = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} (ax_i + by_i + c) = 0$$

Il s'agit d'un système d'équations non linéaires :

Cependant, $c = -(a\bar{x} + b\bar{y})$ avec $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}$$

L'équation peut être ramenée à :

$$\boxed{\begin{array}{l} a(S_{xx} - S_{yy}) - \frac{a^2}{b} S_{xy} + bS_{xy} = 0 \\ a^2 + b^2 = 1 \end{array}}$$

avec $S_{xx} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n}$

$$S_{yy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{n}$$

$$S_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}).(y_i - \bar{y})}{n}$$

Si b ≠ 0, une équation du second degré en $\frac{b}{a}$ doit maintenant être résolue :

$$-\left(\frac{a}{b}\right)^2 S_{xy} + \frac{a}{b}\left(S_{xx} - S_{yy}\right) + S_{xy} = 0$$

Le déterminant de l'équation vaut :

$$\Delta = \left(S_{xx} - S_{yy}\right)^2 + 4 * S_{xy}^2$$

Le déterminant est toujours positif ou nul, il y a obligatoirement au moins une solution. Soient d une des deux racines (éventuellement égales) du polynôme, les valeurs de a et de b sont :

$$b = \frac{1}{\sqrt{1+d^2}}$$
$$a = b.d$$

La solution choisie (s'il y en a deux) est celle qui minimise R^2.

Dans les cas exclus (a = 0 ou b = 0) ; l'estimation de la droite est :

Cas a = 0	Cas b = 0
b = 1	a = 1
c = $\bar{y}$	c = $\bar{x}$

2. Ajustement d'un cercle à un ensemble de points

La méthode décrite ci-dessous est basée sur le travail de Rusu, Tico, Kuosmanen et Delp (2003) qui décrit comment ajuster un cercle à un ensemble de points. Il procède en réalisant une transformation du cercle en droite et en réalisant un ajustement de cette droite avec la technique des moindres carrés. Notre démarche se base sur cette procédure, en tenant compte des informations supplémentaires dont nous disposons dans le contexte de la géométrie routière.

2.1 Transformation d'un cercle en droite

La transformation sur le plan complexe :

$z \in C \rightarrow \frac{1}{z}$ permet de transformer tout cercle passant par l'origine (0,0) en droite et de garder toute droite passant par l'origine invariante.

En considérant les nouvelles coordonnées polaires (r', θ') en fonction de (r, θ), les propirétés de cette transformation sont les suivantes :

1. conservation de θ
2. $r' = \frac{1}{r}$

L'équation d'un cercle passant par l'origine est en coordonnées polaires :

$r^2 + 2.x_0.r\cos\theta + 2.y_0.r\sin\theta = 0$ (x_0, y_0) est le centre du cercle en coordonnées cartésiennes.

Par conséquent, l'équation de la transformée du cercle devient :

$$\frac{1}{r^2} + 2.\frac{x_0}{r}\cos\theta + 2.\frac{y_0}{r}\sin\theta = 0$$
$$\Leftrightarrow$$
$$1 + 2.x_0.r\cos\theta + 2.y_0.r\sin\theta = 0$$
$$\Leftrightarrow$$
$$1 + 2.x_0.x + 2.y_0.y = 0$$

Il s'agit donc de l'équation d'une droite de vecteur directeur ($-y_0$, x_0)

De même, l'équation d'une droite passant par l'origine est :

$a.r.\cos\theta + b.r.\sin\theta = 0$

Sa transformée a donc pour équation :

$$\frac{a}{r}\cos\theta + \frac{b}{r}\sin\theta = 0$$
$$\Leftrightarrow$$
$$a.r.\cos\theta + b.r.\sin\theta = 0$$

La droite reste donc invariante.

2.2 Méthode générale d'ajustement

Le principe permettant le calcul du cercle est présenté. Il s'agit d'un algorithme proposé par Brandon et Cowley (1983), décrit par Rusu, Tico, Kuosmanen et Delp (2003).

Soit un ensemble de points P (x_i, y_i) dont la meilleure estimation serait un cercle (C), dont on cherche à déterminer le centre et le rayon. Un point PI de représentation complexe z_0 est sélectionné, qu'on suppose être situé sur le cercle (C). On définit la transformation :

$$z \rightarrow z_0 + \frac{\rho^2}{z - z_0}$$

Si les points de P sont situés sur (C), alors la transformée de P doit pouvoir être approximée par une droite. Une méthode des moindres carrés peut être appliquée sur l'ensemble P' des transformées des points. Rusu, Tico, Kuosmanen et Delp (2003) constatent que la transformée du point diamétralement opposé à PI est le point de la droite (transformée du cercle) le plus proche du cercle. Si y = b x + a est l'équation de la droite, ce point est caractérisé par :

$$x = \frac{by_0 + x_0 - ab}{1 - b^2}$$
$$y = a + b\frac{by_0 + x_0 - ab}{1 - b^2}$$

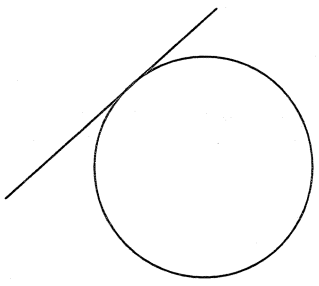
L'application de la transformée inverse: $z \rightarrow z_0 + \frac{\rho^2}{z - z_0}$ à ce point (x,y) permet d'obtenir le point diamétralement opposé à PI et les caractéristiques du cercle. La méthode repose donc principalement sur le choix d'une suite de points PI de telle sorte qu'un point PI soit finalement situé sur le cercle obtenu par régression – la méthode proposée consiste à choisir un premier point de l'ensemble P, puis à sélectionner le point diamétralement opposé après régression et ainsi de suite, jusqu'à obtention d'une distance ε très faible entre PI et le « cercle aux moindres carrés ».

ρ est un facteur d'échelle qui doit être adapté à la taille approximative du cercle considéré.

Rusu, Tico, Kuosmanen et Delp (2003) constatent que, en introduisant une erreur normale sur un ensemble de points situés initialement parfaitement sur un cercle, que l'erreur a un effet plus important lorsque les points sont proches du point pivot PI. Il propose donc d'associer un poids à chacun des points de P' pour le calcul de la droite aux moindres carrés (pour les détails de la méthode de détermination d'une droite au moindres carrés moyennant une pondération des points expérimentaux, se reporter à Rusu, Tico, Kuosmanen et Delp (2003).

Le poids d'un point (x_i, y_i) de P est estimé à $\left((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2\right)^2$

2.3 Méthode d'ajustement d'un ensemble de points à un cercle connaissant une tangente



La méthode décrite au chapitre précédent est utilisée. Il s'agit donc principalement de déterminer une valeur de ρ et d'une méthode itérative de détermination des PI, permettant d'aboutir à la meilleure représentation du cercle.

Examinons tout d'abord la propriété de la transformée de la tangente (T) au cercle. Soit TC le point de tangence, qu'on fixe comme origine d'un repère cartésien, et $O(x_0, y_0)$ les coordonnées du cercle dans ce repère. Soit M(x,y) un point de la tangente. L'équation représentative de celle-ci est :

$$\overrightarrow{TCO}.\overrightarrow{TCM} = 0$$
$$\Leftrightarrow$$
$$x.x_o + y.y_o = 0$$

Prenons TC comme point pivot de la transformation citée ci-dessus.

- La droite est invariante, car elle passe par le point pivot
- Le cercle se transforme en droite de vecteur directeur $(-y_0, x_0)$ (cf. 2.1 Transformation d'un cercle en droite).

La droite tangente au cercle est donc colinéaire à la droite issue de la transformation du cercle.

Par conséquent, la méthode proposée pour la détermination du cercle se base sur cette propriété pour chercher le point de tangence entre la droite (T) et le cercle. Les point PI sont choisis successivement sur la tangente, jusqu'à obtention d'une droite de régression de l'ensemble P' des points transformés parallèle à (T). Ce point PI est le point de tangence entre (T) et le cercle, à partir duquel il est ensuite aisé de reconstituer le cercle.

Soit $y = a\,x + b$ l'équation de la tangente

P l'ensemble des points expérimentaux

P' l'ensemble des transformés des points de P

1. Calculer $\theta ref = \tan^{-1}(b)$
    a. Choisir deux points PI1 et PI2 sur la tangente suffisamment éloignés (100 mètres) de part et d'autre du point approximatif de tangence ;

b. Choisir successivement chacun de ces PI comme pivot ;

c. Recalculer P' ;

d. déterminer la droite aux moindres carrés approximant le mieux P'
y = ai x + bi;
calculer $\theta i = \tan^{-1}(bi) - \theta ref$;

e. Si $\theta 1 > 0$ et $\theta 2 > 0$, PI2 := PI1 et choisir un nouveau point PI1 sur la tangente, tel que $\overrightarrow{TCPI1}.\overrightarrow{TCPI2} > \|TCPI2\|^2$
Si $\theta 1 < 0$ et $\theta 2 < 0$, PI1 := PI2 et choisir un nouveau point PI2 sur la tangente, tel que $\overrightarrow{TCPI1}.\overrightarrow{TCPI2} > \|TCPI1\|^2$
Sinon passer à 2

2. Sélectionner le milieu PIm de [PI1,PI2]

a. Choisir PIm comme pivot ;

b. Recalculer P' ;

c. Déterminer la droite aux moindres carrés approximant le mieux P'
y = ai x + bi;
calculer $\theta i = \tan^{-1}(bi) - \theta ref$;

d. Si $|\theta i| <$ erreur (10^{-5} par exemple), les droites sont parallèles, passer au 3 ;
Sinon

i. si $\theta 1 * \theta i < 0$ PI2 := PIm

ii. si $\theta 1 * \theta i > 0$ PI1 := PIm

e. Calculer la distance entre PI1 et PI2, si elle est inférieure à un seuil passer au 3 ; sinon recommencer au 2.

3. Le point de tangence est PIm, calculer le point diamétralement PI* opposé au point de tangence selon 2.2 Méthode générale d'ajustement.

Le centre du cercle est le milieu de [PI,PI*] et le rayon est la moitié de la distance entre PI et PI*

3. Détermination de l'alignement

Il s'agit d'adapter cette méthode à la situation d'ajustement d'un alignement à un ensemble de points. Une première étape consiste à imprimer le tracé en plan et déterminer visuellement quels ensembles de points correspondent à des droites ; par défaut, les ensembles de points restants correspondent à des courbes. À partir de ces ensembles, la procédure suivante est réalisée :

1. Pour chaque ensemble de points correspondant à une droites, déterminer l'équation de la droite aux moindres carrés : cf. 1.2 Détermination de la droite aux moindres carrés ;
2. Pour chaque ensemble de points correspondant à un cercle, déterminer le rayon du cercle grâce à la procédure 2.3 Méthode d'ajustement d'un ensemble de points à un cercle connaissant une tangente (la tangente est la droite précédente)
3. Déterminer la longueur L de chaque segment de droite comme suit :
    - Calcul des coordonnées de VPI, point d'intersection de la droite considérée et de la prochaine, détermination du rayon R de l'arc de cercle reliant ces deux droites ;
    - Calcul de la déviation Δ entre la droite considérée et la suivante ;
        - Si la droite considérée est la première sur le tracé et origine le premier point du tracé,

$$L = \sqrt{\left(x_{VPI} - x_{origine}\right)^2 + \left(y_{VPI} - y_{origine}\right)^2} - R\tan\left(\Delta/2\right)$$

        - Pour tout autre droite, si VPI' est l'intersection précédemment calculée, Δ' est la déviation précédente et R' le rayon du cercle précédent, alors

$$L = \sqrt{\left(x_{VPI} - x_{VPI'}\right)^2 + \left(y_{VPI} - y_{VPI'}\right)^2} - R\tan\left(\Delta/2\right) - R'\tan\left(\Delta'/2\right)$$

Pour chaque cercle :

- déterminer l'angle au centre Δ = déviation entre les deux droites tangentes à l'arc de cercle
- si $\Delta<0$, assigner une valeur négative au rayon

4. Déterminer les points de début et de fin des éléments géométriques ainsi que les chaînages respectifs.

Annexe E

Procédure de discrétisation d'une géométrie routière connue

1. Discrétisation du tracé en plan

Chaque élément géométrique du tracé en plan est caractérisé par l'ensemble ($chaînage_{debut}$, x_{debut}, y_{debut}) ainsi que par son gisement θ (dans le cas d'une droite) ou son rayon R (dans le cas d'une courbe).

Les points $\left(x^i_{UTM}, y^i_{UTM}\right)$ discrétisant le tracé sont déterminés pour une suite de chaînages ($chaînage^i$). À chaque pas, le chaînage permet de déterminer sur quel élément géométrique le point à calculer se situe.

- Les points sont déterminés dans le cas d'une droite par les équations suivantes :

$$x = x_{debut} + (chainage - chainage_{debut})\sin\theta$$
$$y = y_{debut} + (chainage - chainage_{debut})\cos\theta$$

Les points (x', y') situés sur les axes centraux des voies de roulement et sur les accotements sont données par :

$$x' = x + l\sin\left(\hat{\theta}\right)$$
$$y' = y + l\cos\left(\hat{\theta}'\right)$$

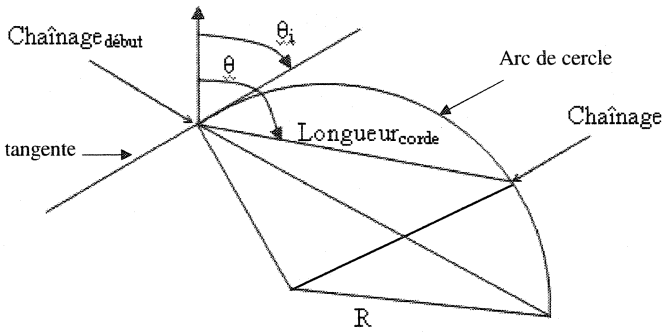
l correspond à la moitié de la largeur d'une voie (respectivement à la largeur d'une voie + la largeur de l'accotement)

$\hat{\theta} = \theta + 90$ pour les points situés à droite de l'axe central – avec une orientation correspondant aux chaînages croissants

$\hat{\theta} = \theta - 90$ pour les points situés à gauche de l'axe central.

➢ Dans le cas d'une courbe, l'implantation est faite à partir du point d'intersection entre la tangente et le cercle (tel qu'indiqué sur le schéma ci-dessous) selon la formule :

$$x = x_{debut} + longueur_{corde} \sin\theta$$
$$y = y_{debut} + longueur_{corde} \cos\theta$$



Si on note θ_i le gisement de la droite précédente et R le rayon de la courbe, θ s'obtient par :

$$\theta = \theta_i + \frac{(chainage - chainage_{debut})}{2R}$$

La longueur de la corde vaut :

$$longueur_{corde} = 2R\sin(\theta - \theta_i)$$

Les points (x', y') situés sur les axes centraux des voies de roulement et sur les accotements sont données par :

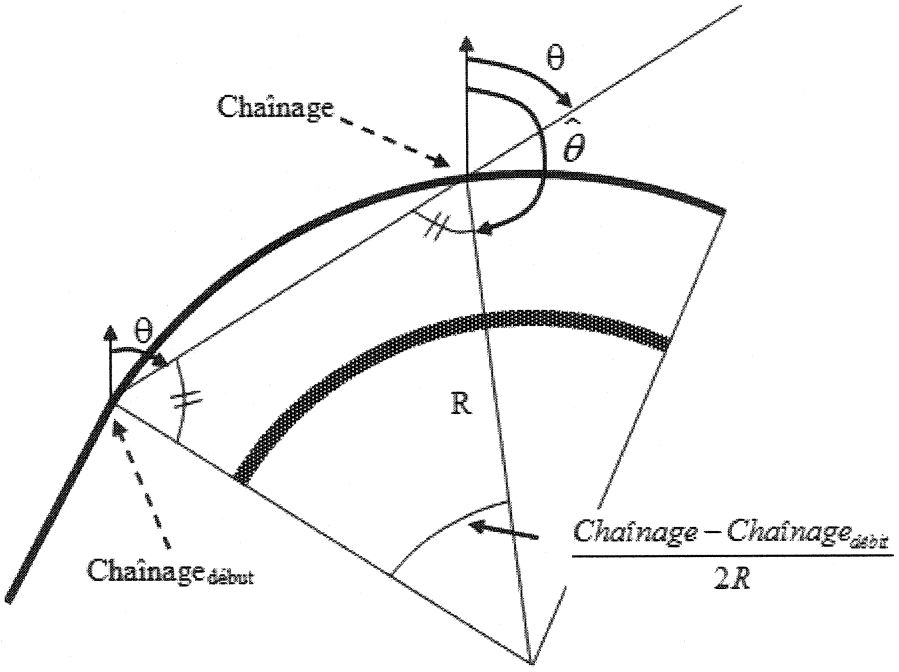
$$x' = x + l\sin(\hat{\theta})$$
$$y' = y + l\cos(\hat{\theta}')$$

l correspond à la moitié de la largeur d'une voie (respectivement à la largeur d'une voie + la largeur de l'accotement)

$\hat{\theta} = \theta + \frac{(chainage - chainage_{debut})}{2R} + 90$ pour les points situés à droite de l'axe central – avec une orientation correspondant aux chaînages croissants

$\hat{\theta} = \theta + \frac{(chainage - chainage_{debut})}{2R} - 90$ pour les points situés à gauche de l'axe central.

Le diagramme ci-contre expose le principe :



2. Discrétisation du profil en long

Chaque élément géométrique du profil en long est caractérisé par l'ensemble ($chaînage_{debut}$, z_{debut}) ainsi que par sa pente g (droite) ou sa longueur L, sa pente initiale g_1 et sa pente finale g_2 (parabole).

Des points de l'axe la route sont déterminés pour une suite de chaînage ($chaînage^i$). Grâce au chaînage, il est possible de déterminer sur quel élément est situé ce point. La hauteur z^i est obtenue par :

- Si le point est situé sur une droite :

$$z = g \cdot (chaînage - chaînage_{0rigine}) + z_{origine}$$

- Si le point est situé sur une parabole :

$$z = \frac{g_2 - g_1}{200L}(chaînage - chaînage_{origine})^2 + \frac{g_1}{100}(chaînage - chaînage_{origine}) + z_{origine}$$

Annexe F

Description du tracé en plan du RTS 101-04-33

Element : Linear		Station	NORTHING	EASTING
D.R.		176.3054	5352550.6438	644845.9388
C.T.	1	476.3259	5352844.0470	644908.6038
C.T.	Tangent Direction :	12.0561	5352745.7216	644887.2465
	Tangent Length :	300.0206		
	Tangent Length :	199.4033		
Element : Circular				
C.T.		476.3259	5352844.0470	644908.6038
P.I.	1	586.0272	5352951.3286	644931.5170
C.C.	1	640.7107	5351790.5313	649841.2561
T.C.	1	695.6939	5353059.5051	644949.7442
T.C.	Radius :	5043.9026	5353266.3994	644985.5419
	Delta :	2.4919	right	
	Length :	219.3680	left	
	Tangent :	109.7013		
	Chord :	219.3507		
	Middle Ordinate :	1.1925		
	External :	1.1928		
	Tangent direction :	12.0561		
	Radial direction :	102.0561		
	Chord direction :	13.3020		
	Radial direction :	99.5642		
	Tangent Direction :	9.5642		
	Tangent Direction :	9.4256		
Element : Linear				
T.C.		695.6939	5353059.5051	644949.7442

C.T.	1	1641.8167	5353992.4768	645106.9450
C.T.	Tangent Direction :	9.5642	5353986.8887	645105.1489
	Tangent Length :	946.1228		
	Tangent Length :	730.3497		
Element : Circular				
C.T.		1641.8167	5353992.4768	645106.9450
P.I.	2	1779.4088	5354128.1564	645129.8062
C.C.	2	1778.2326	5353903.5017	645635.0035
T.C.	2	1911.1743	5354236.0103	645215.2412
T.C.	Radius :	535.5020	5354238.6652	645216.8640
	Delta :	28.8198	right	
	Length :	269.3576	right	
	Tangent :	137.5921		
	Chord :	266.5270		
	Middle Ordinate :	16.8468		
	External :	17.3940		
	Tangent direction :	9.5642		
	Radial direction :	99.5642		
	Chord direction :	23.9741		
	Radial direction :	128.3840		
	Tangent Direction :	38.3840		
	Tangent Direction :	38.4288		
Element : Linear				
T.C.		1911.1743	5354236.0103	645215.2412
C.T.	2	2613.6232	5354786.6368	645651.4119
C.T.	Tangent Direction :	38.3840	5354783.4940	645649.1368
	Tangent Length :	702.4489		
	Tangent Length :	695.4842		

Element : Circular				
C.T.		2613.6232	5354786.6368	645651.4119
P.I.	3	2814.4294	5354944.0422	645776.0982
C.C.	3	2813.4902	5354246.7966	646332.9120
T.C.	3	3008.3143	5355140.1844	645819.1261
T.C.	Radius :	869.4078	5355141.8944	645819.3235
	Delta :	26.0110	right	
	Length :	394.6911	left	
	Tangent :	200.8062		
	Chord :	391.3105		
	Middle Ordinate :	22.3016		
	External :	22.8887		
	Tangent direction :	38.3840		
	Radial direction :	128.3840		
	Chord direction :	51.3895		
	Radial direction :	102.3730		
	Tangent Direction :	12.3730		
	Tangent Direction :	12.3726		
Element : Linear				
T.C.		3008.3143	5355140.1844	645819.1261
C.T.	3	5231.3557	5357311.5917	646295.4693
C.T.	Tangent Direction :	12.3730	5357310.4170	646295.0189
	Tangent Length :	2223.0413		
	Tangent Length :	2220.0848		
Element : Circular				
C.T.		5231.3557	5357311.5917	646295.4693
P.I.	4	5373.3650	5357450.3027	646325.8984

C.C.	4	5373.2100	5357167.0334	646954.4375
T.C.	4	5511.2876	5357564.9759	646409.6641
T.C.	Radius :	674.6379	5357565.6940	646410.0308
	Delta :	23.7741	right	
	Length :	279.9319	right	
	Tangent :	142.0093		
	Chord :	277.9281		
	Middle Ordinate :	14.4672		
	External :	14.7843		
	Tangent direction :	12.3730		
	Radial direction :	102.3730		
	Chord direction :	24.2601		
	Radial direction :	126.1471		
	Tangent Direction :	36.1471		
	Tangent Direction :	36.1341		
Element : Linear				
T.C.		5511.2876	5357564.9759	646409.6641
C.T.	4	6228.8230	5358144.3893	646832.9102
C.T.	Tangent Direction :	36.1471	5358144.9524	646832.9609
	Tangent Length :	717.5354		
	Tangent Length :	717.2239		

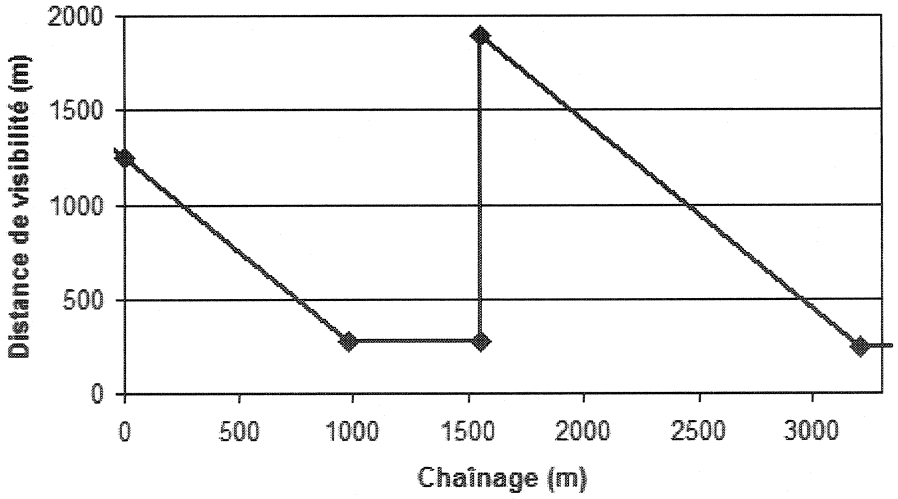
Annexe G

Reproduction des conditions expérimentales de Farber (1969)

- Les données sont relevées dans un sens de circulation uniquement (Nord vers Sud)

- Le long du trajet se succèdent une zone de dépassement 1 de longueur 975.36 m, une zone de non dépassement 2 de longueur 579.12 m et une zone de dépassement 3 de longueur 1645.92 m.

- Une série d'expérience est conduite le jour, puis une autre la nuit. Le jour, le débit directionnel varie entre 100 et 200 veh/h, ce qu'on approxime par un débit de 150 veh/h ; la nuit, le débit varie entre 70 et 190 veh/h, ce qui sera approximé dans la simulation par la succession d'une heure avec un débit de 130 veh/h. Le débit en sens opposé est égal au débit dans le sens de circulation. 15 % du trafic est composé de poids lourds.



- Lorsque le débit est inférieur à 200 veh/h, le HCM 2000 indique que la distribution des vitesses désirées est identique à la distribution des vitesses en un point de la route situé sur le plat. Farber (1969) note une vitesse moyenne de 75

km/h et d'écart type 12 km/h de jour, une vitesse moyenne de 85 km/h et un écart type de 15 km/h de nuit. Il s'agit donc des paramètres de vitesses désirées.

- La distance de visibilité vaut au maximum 274.32 m dans la zone 2 ; elle est illimitée au début des zones 1 et 3 et limitée à 243.84 m dans la zone 3. À partir de ces données, nous inférons le profil de visibilité illustré sur la figure précédente.

- Les zones de dépassement sont situées sur terrain plat, tandis qu'une courbe verticale est notée dans la zone 2. Il est supposé que cette courbe n'a pas un effet sensible sur les vitesses des véhicules.

- Farber (1969) provoque des dépassements en introduisant des véhicules lents juste avant la zone de non dépassement devant les véhicules circulant sur la zone 1 en mode libre et sans véhicule suiveur. Des véhicules fictifs sont donc introduits au début de la zone de non dépassement avec une vitesse désirée fonction de la vitesse du véhicule dont on désire observer les réactions.