

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

OPTIMISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉCONOMIQUE

PAR

NICOLAS VINCENT

JUILLET 2006

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je remercie mes directeurs Max Blouin et Nicolas Marceau pour leur précieuse assistance et pour leur professionnalisme. Je les remercie également pour toutes leurs suggestions. Je remercie aussi ma famille et mes amis pour leur support de tous les instants et Caroline pour sa patience et pour m'avoir rappelé les choses importantes de la vie.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	II
TABLE DES GRAPHIQUES	V
TABLE DES TABLEAUX.....	VI
RÉSUMÉ	VII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I.....	3
REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1. DEMANDE DE SERVICES ROUTIERS	3
1.1 LITTÉRATURE TECHNIQUE DE L'INGÉNIERIE ROUTIÈRE.....	10
CHAPITRE II	13
LE MODÈLE THÉORIQUE.....	13
2. LA THÉORIE.....	13
2.1 LES HYPOTHÈSES	14
2.2 LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE.....	16
2.3 LA POPULATION, LES TYPES D'AGENTS ET LES PARTICULARITÉS DU MODÈLE	17
2.5 LES ARGUMENTS DE LA FONCTION D'UTILITÉ DES USAGERS.....	21
2.5.1 <i>Le nombre d'usagers</i>	21
2.5.2 <i>La qualité</i>	21
2.6 LA FONCTION D'UTILITÉ DES GENS N'UTILISANT PAS LA ROUTE	23
2.7 LA CONTRAINTÉ BUDGÉTAIRE DU GOUVERNEMENT ET SA FONCTION D'UTILITÉ.....	24
CHAPITRE III.....	26
LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DES USAGERS	26
3. LE NOMBRE D'USAGERS DE LA ROUTE.....	26
CHAPITRE IV	29

RÉSOLUTION DU PROBLÈME DU GOUVERNEMENT.....	29
4.1 LA MAXIMISATION	29
4.2 EXEMPLE NUMÉRIQUE	32
CHAPITRE V.....	35
STATIQUE COMPARÉE.....	35
5.1 EFFETS DE LA VARIATION DU PRIX DE LA QUALITÉ	35
5.2 EFFETS DE LA VARIATION DU PARAMÈTRE A	36
5.3 EFFETS DE LA VARIATION DU PARAMÈTRE B	37
5.4 EFFETS DE LA VARIATION DU PARAMÈTRE Σ	38
CONCLUSION ET COMMENTAIRES	39
ANNEXE.....	41
BIBLIOGRAPHIE.....	50

TABLE DES GRAPHIQUES

Figure 1 : Relation entre la densité, le flux et le temps du voyage	6
Figure 2 : Relation entre le temps et la rugosité.....	9
Figure 3 : Relation entre la densité, le volume et la vitesse.....	11
Figure 4 : Relation entre le temps de transit et le nombre de véhicules.....	18
Figure 5: Relation entre l'utilité et la qualité	22
Figure 6 : Distribution de la population	27
Figure 7 : Effets de la variation du prix de la qualité.....	43
Figure 8 : Effets de la variation du paramètre α	45
Figure 9 : Effets de la variation du paramètre β	47
Figure 10 : Effets de la variation du paramètre σ	49

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau résumé	34
Tableau 2 : Effets de la variation du prix de la qualité	42
Tableau 3 : Effets de la variation du paramètre α	44
Tableau 4 : Effets de la variation du paramètre β	46
Tableau 5 : Effets de la variation du paramètre σ	48

RÉSUMÉ

Ce mémoire a pour but de déterminer sur quoi le gouvernement pourrait se baser afin de déterminer la qualité optimale des infrastructures routières qu'il doit fournir à la population pour que l'utilité de celle-ci soit maximisée. Il a également pour but de déterminer les caractéristiques d'une taxe qui serait mise en place pour financer la construction et l'entretien de ces infrastructures. Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'un regain d'intérêt des gouvernements pour les infrastructures car la vie utile de celles-ci tire à sa fin. Il faudra tout d'abord déterminer le nombre de gens utilisant la route et le nombre de gens ne l'utilisant pas. Il sera ensuite possible en utilisant une fonction de bien-être social de type utilitarienne de maximiser le bien-être de la population et d'obtenir de la qualité optimale ainsi que la taxe optimale. Les résultats obtenus respectent la littérature que nous avons consultée.

INTRODUCTION

La vie utile¹ des autoroutes canadiennes et américaines arrivant rapidement à échéance (Haider, Mirza 2003), les gouvernements se devront de mettre au point une stratégie de réfection des infrastructures routières adéquate pour accommoder un parc automobile qui, depuis la fin de la seconde guerre mondiale, ne cesse de croître. En effet, seulement au Québec en 2000, le parc automobile québécois comptait 3.8 millions d'automobiles et camions et ceux-ci avaient parcourus respectivement, en moyenne, dix-sept mille kilomètres et quatre-vingts mille kilomètres par année. De plus, selon *l'Enquête sur les véhicules au Canada* (EVC) de Transports Canada publiée en août 2000, un peu plus de 30% de ces distances furent franchies dans le cadre du travail ou pour se rendre à celui-ci. Le but de ce mémoire est de déterminer de quelle façon le gouvernement devrait investir dans les infrastructures routières, plus particulièrement dans la qualité du revêtement routier, pour que l'utilité des automobilistes et des camionneurs soit maximisée.

Pour les usagers de la route, la qualité du revêtement n'a pas seulement un intérêt esthétique. Un bon revêtement signifie également une vitesse moyenne plus importante et des frais d'utilisation du véhicule plus faibles. En effet, selon une étude du *Minnesota Department of Transportation* publiée en juin 2003, la différence des frais d'utilisation que doit assumer un utilisateur qui emprunte une route de mauvaise qualité par rapport à une route de bonne qualité représente environ 1.625 cents US par Km pour les automobilistes et environ 3.44 cents US par Km pour les camionneurs. Ceci représente donc des coûts d'utilisation qui sont supérieurs de 260\$ US par an pour les automobilistes québécois et de 2 752\$ US pour les camionneurs et ce, si on fait l'hypothèse que la totalité de la circulation routière se fait sur de la chaussée de mauvaise qualité. Donc, pour le Canada en entier, si on fait la supposition que les dix-sept millions de voitures et les cinq cent quatre-vingts mille camions immatriculés au pays parcourent respectivement, en moyenne, quinze mille huit cents kilomètres pour les voitures et soixante-huit mille kilomètres pour les camions, ceci représente des frais supplémentaires pour les utilisateurs des routes d'environ 5.7 milliards de

¹ La période durant laquelle l'infrastructure peut fournir une offre de transport sans avoir à subir de travaux majeurs

dollars US par année. À ces montants, il faut également ajouter les coûts des fréquentes réparations que le Ministère des Transports doit effectuer à cause de la dégradation du revêtement ainsi que les coûts économiques qu'engendrent les retards causés par la construction. La congestion routière, causée par l'entretien trop fréquent des routes et par une mauvaise estimation de la demande de service de transport, est à la fois un irritant quotidien pour les usagers du système routier mais également un facteur de distorsion de l'activité économique. En effet, l'activité économique est perturbée par les retards au travail occasionnés par la congestion ainsi que les nombreux retards causés à l'industrie du camionnage. En 2000, aux États-Unis, on a estimé que la congestion routière aurait coûté environ 61,7 milliards de dollars US en retards de toutes sortes. Le choix de la qualité des matériaux utilisés pour la construction des routes et les nombreux travaux de réfection a donc des effets importants sur l'économie et sur les décisions de transport des usagers.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1. Demande de services routiers

La littérature traitant de l'économie du transport est, en général, relativement vieille et celle s'attardant spécifiquement au sujet traité ici, l'optimisation dans la construction routière, est presque inexistante. Par contre, comme le fait remarquer Clifford Winston dans *Conceptual Developments in the Economics of Transportation : An Interpretive Survey*, un regain d'intérêt semble exister depuis une trentaine d'années. La cause de ce soudain regain d'intérêt pourrait être le fait que la vie utile des infrastructures tire à sa fin et que les gouvernements et les chercheurs tentent d'élaborer une nouvelle stratégie d'allocation des budgets dans le domaine de la réfection et de la construction des routes. La littérature consultée discute surtout des coûts de la congestion et des tarifs optimaux pour diminuer les embouteillages, des coûts d'utilisation des véhicules, de la demande et de l'offre de transport et des caractéristiques techniques du trafic.

Dans son article de 1961, A.A. Walters décrit la méthode qu'il a utilisée pour déterminer quel serait le système optimal de taxation pour réduire la congestion routière. Dans le cadre de notre recherche sur l'optimisation de la construction routière, le choix optimal de taxation pour permettre au gouvernement d'augmenter la qualité des routes est bien sûr important, mais ce qui nous intéresse particulièrement dans l'article de Walters ce sont les hypothèses qu'il émet pour arriver à ses fins. Cette méthodologie nous sera utile lors de l'élaboration de la fonction d'utilité des usagers de la route. Tout d'abord, Walters pose les hypothèses suivantes : la circulation sur la route est homogène et tous les véhicules et les conducteurs sont semblables. Il établit également, pour simplifier son modèle, que tous les automobilistes font face aux mêmes coûts d'utilisation de leur véhicule. Walters prend comme exemple une section de route à une voie d'une longueur de 2 000 pieds, alors que le restant de la route comporte trois voies. Comme le temps pour parcourir la section de 2000 pi. dépend du flux

de la circulation, Walters fait remarquer que lorsque le flux augmente au-delà d'un seuil limite, alors le nombre de voitures franchissant la section à une voie est plus faible que lorsque la demande pour la route est faible. Il fait également remarquer que lorsque la densité de la circulation dépasse le seuil limite (D_{max}), alors le temps de voyage tend vers l'infini, nous sommes alors en situation d'embouteillage.

Dans son article de 1983, Rotemberg décrit le comportement d'un automobiliste sur une autoroute. Dans ce modèle, Rotemberg fait l'hypothèse que les deux seules choses qui affectent l'utilité des usagers de la route sont : le temps qu'ils passent sur la route et le nombre d'accidents qu'ils causeront. Il fait l'hypothèse que les usagers désirent passer le moins de temps possible sur la route et qu'un accident est un évènement indésirable. Dans son modèle, il utilise la théorie des flux de circulation, une théorie qui soutient que plus la vitesse d'un véhicule augmente, plus la distance séparant ce véhicule de celui qui le précède doit augmenter et, évidemment, lorsque la vitesse du véhicule diminue, la distance les séparant (*headway distance*) diminue. Il se sert également de données du *Highway Capacity Manual* stipulant que plus la distance entre les automobiles est faible, plus la probabilité d'être impliqué dans un accident est importante. Le conducteur pour qui l'utilité diminue avec l'accroissement de la probabilité d'avoir un accident peut « acheter » de la sécurité en augmentant la distance le séparant du véhicule le précédant. L'individu choisit donc l'espacement optimal telle la perte d'utilité générée par un plus grand espacement qui est égale au gain marginal de la prévention des accidents. La fonction d'utilité qu'il utilise est la suivante :

$$U(S, G) = -\left(\frac{1}{S} + \left(\frac{G - G_0}{S}\right)\right) - A(S, G)$$

Dans cette fonction d'utilité, S représente la vitesse des voitures, $(G - G_0)$ l'espacement entre les voitures (gap) et A (S,G) est la fonction représentant la probabilité d'être impliqué dans un accident en fonction de la vitesse et de l'espacement entre les voitures. Lorsque la vitesse diminue, la probabilité d'être impliqué dans un accident s'estompe alors que lorsque c'est la distance entre les voitures qui diminue, cette même probabilité augmente. Rotemberg démontre également que lorsque le conducteur d'une automobile fixe la vitesse à laquelle il choisit de circuler, alors l'espacement entre les voitures est forcément optimal et nous

obtenons un équilibre de Nash pour la quantité d'automobilistes qui vont emprunter le réseau routier. La conclusion de Rotemberg est que si les individus sont contraints de rouler lentement, soit par une limite de vitesse imposée, soit parce que la route les contraint à ralentir (i.e. comme dans le cas où il y a de la construction routière), alors leur bien-être ne peut être qu'inférieur à celui qu'il aurait été si les limites de vitesses avaient été absentes.

Toujours à la poursuite de la définition de la fonction d'utilité des usagers de la route, l'article de Johnson de 1964 nous sera également d'une grande utilité. En effet, Johnson établit que l'utilité des automobilistes dépend à la fois du coût de la période de temps qu'il passe sur la route (*time-price*) et du coût d'opération du véhicule (*money-price*). Selon lui, les coûts d'opération ne sont pas, comme l'avaient imaginé beaucoup d'auteurs avant lui, des coûts fixes mais bien des frais qui dépendent plutôt du temps. Donc, la fonction de coût d'opération serait définie par la relation suivante : $C = C(T)$ où $C'(T) \geq 0$ et que le lien entre les coûts d'opération (C) et le volume du trafic est une relation indirecte, car les coûts d'opération sont une fonction de la valeur du temps et cette dernière variable est elle-même fonction du volume de la circulation. De plus, dans son article, Johnson décrit très bien la relation entre le temps, la densité et l'écoulement du flux de la circulation. Sa description de la relation entre ces variables rejoint de très près les descriptions plus techniques des manuels d'ingénierie. Lorsque la densité de la circulation (représentée par le nombre de véhicule sur une longueur de route donnée) approche de la capacité maximale de la route (ce que les ingénieurs appellent *highway capacity*), alors le flux de voitures diminue progressivement.

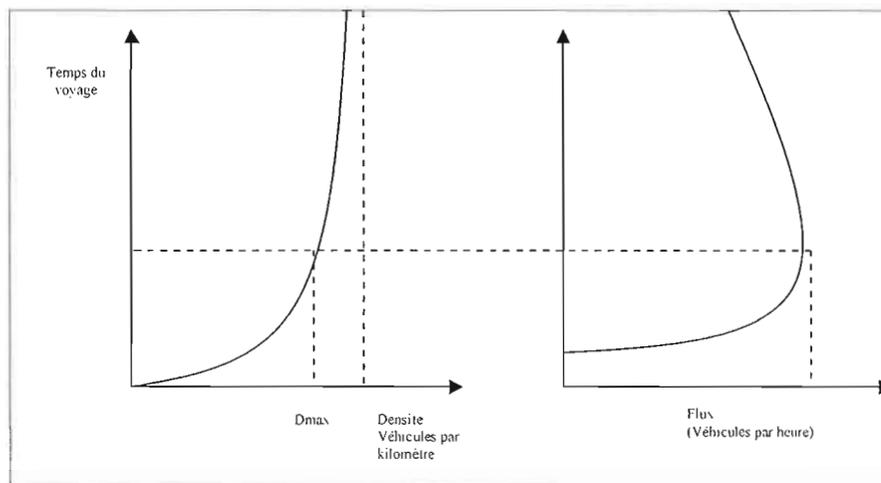


Figure 1 : Relation entre la densité, le flux et le temps du voyage

Comme on peut le voir sur cette figure classique de l'économie du transport et des manuels d'ingénierie du transport, plus la densité de la circulation augmente, plus le flux de circulation augmente jusqu'à ce que la densité atteigne un niveau critique au-delà duquel l'écoulement du trafic ne peut que diminuer. Ce qui signifie qu'à ce niveau, lorsqu'un automobiliste supplémentaire entre dans la circulation, il y a alors une augmentation de la durée du trajet pour l'ensemble des voitures pour franchir la distance donnée. On s'appuiera sur cette idée lorsque l'on discutera des effets de la réfection des routes sur la circulation. Si l'on diminue la capacité de la route en fermant une voie, pour la réparer, c'est exactement comme si l'on augmentait drastiquement la densité de la circulation sur la route, donc le flux de la circulation augmente à un point tel que l'on crée un embouteillage.

Les coûts qui sont engendrés par la congestion routière sont très importants pour l'automobiliste dans son processus décisionnel quant à la quantité de services routiers qu'il demandera ou même la décision plus radicale d'utiliser la route ou non. On semble, dans la plupart des articles sur le sujet, s'être mis d'accord sur le fait que les deux principaux facteurs affectant la demande de services routiers sont le coût d'utilisation du véhicule et le coût en temps que demande un trajet quelconque. Meiburg (1963) nous offre un exemple très détaillé de ce qui affecte la demande du consommateur et pourquoi, malgré les nombreux efforts du gouvernement en matière de transport, les routes sont constamment congestionnées. Dans son

article *An Economic Analysis of Highway Services*, il explique qu'en plus des frais d'utilisation du véhicule, l'ensemble des taxes reliées à l'usage de la route, les coûts de congestion, le prix et la qualité des systèmes de transports alternatifs ainsi que le revenu et les préférences du consommateur jouent un rôle important dans la demande de services. On qualifie de congestion, dans les manuels d'ingénierie de la circulation, lorsque la capacité de la route est atteinte ou dépassée, donc lorsque le flux de circulation est interrompu fréquemment ou lorsqu'il n'est pas continu. Chaque niveau de service, comme on l'explique dans *Highway Engineering* (2004), correspond à un flux de trafic, une vitesse, un temps de parcours et une certaine liberté de manoeuvre. Meiburg, lorsqu'il discute des coûts de congestion, parle des coûts supplémentaires en temps, des coûts supplémentaires d'opération du véhicule et de la désutilité causée à l'utilisateur par la perte de manoeuvrabilité lorsqu'il ne peut plus changer de voies comme il le désire. Il explique que la congestion apparaît lorsque l'ensemble des agents tente de consommer plus de capacité routière que la capacité de la route elle-même, c'est alors que les coûts de la congestion augmentent. La capacité de la route est atteinte lorsque tous les véhicules présents sur le tronçon observé circulent à la même vitesse que le véhicule le plus lent.

Il ne semble pas y avoir de consensus sur la valeur qu'accordent les agents au temps qu'ils passent sur l'autoroute. En effet, selon DeSerpa (1971) et O'Dea (1994), la valeur du temps de voyage pourrait être égale au taux de salaire horaire si l'utilité marginale du temps alloué au travail et l'utilité marginale de temps de voyage associée à la ⁱ^{ème} activité étaient toutes deux égales à zéro. Ce résultat théorique de la valeur du temps donné par DeSerpa est discutable car, comme O'Dea l'explique, il est clair que pour la majorité des usagers, l'utilité marginale du temps passé sur la route est négative. Par contre, dans la plupart des ouvrages d'ingénierie de la route et de la circulation, on s'entend sur une valeur du temps qui serait de 6\$ US l'heure pour les automobiles et d'environ 24.60\$ US l'heure pour les camions.

En 2002-2003, Barnes et Langworthy se sont attaqués à la tâche de déterminer les coûts d'opération des automobiles et des camions. Dans leur rapport *The Per-Mile Cost of Operating Automobiles and Trucks*, ils se sont intéressés à l'apport qu'ont chacun des cinq

grands facteurs déterminant le coût d'utilisation soit : le prix de l'essence, les coûts d'entretien réguliers, le coût de la dégradation des pneus, les réparations imprévues et la dépréciation du véhicule. Ils ont également, dans leur étude, déterminé un facteur d'ajustement pour comparer si les véhicules circulent sur une autoroute ou dans une ville et un facteur d'ajustement pour la qualité de la chaussée. Pour déterminer les frais d'opération des voitures, ils ont choisi 100 véhicules (voitures, camionnettes et véhicules utilitaires) pour lesquels ils ont estimé les coûts des déterminants principaux (essence, entretien, dégradation des pneus, réparations et dépréciation). Ensuite, ils ont multiplié ces coûts par la fraction qu'occupait chaque type de véhicule dans cet échantillon pour obtenir une moyenne pondérée des coûts pour chacun des cinq déterminants principaux. Ils ont ensuite pris les montants de chaque déterminant en les multipliant par des facteurs d'ajustement tels l'état de la chaussée et la quantité de départ et d'arrêt. En multipliant par le nombre de véhicules, ils ont pu obtenir un prix moyen d'utilisation d'une automobile dans diverses conditions. Les auteurs de ce rapport ont procédé de la même manière pour obtenir les coûts d'utilisation pour les camions. À partir de ce modèle, Barnes et Langworthy ont montré que les coûts d'utilisation d'un véhicule se situent entre 9.56 et 11.19 cents US par kilomètre pour une voiture et entre 27.12 et 30.56 cents US par kilomètre pour un camion, le prix pouvant varier selon la qualité de la route. Ces résultats se situent dans un voisinage très proche des chiffres utilisés par la *Federal Highway Administration* mais, comme il existe un grand manque de transparence dans la méthodologie qu'utilise cette agence gouvernementale pour obtenir ces résultats, nous utiliserons surtout les résultats de Barnes et Langworthy.

Newbery (1988), pour sa part, s'intéresse à ce qu'il représente comme étant une nouvelle sorte d'externalité qui serait très importante, voire plus importante que les problèmes qu'apporte la congestion routière. En effet, dans son article *Road Damage Externalities*, Newbery ne veut pas étudier, comme l'ont fait plusieurs auteurs avant lui, les dommages que les véhicules causent à la route lorsqu'ils l'empruntent, devant ainsi la date à laquelle elle doit être réparée. En effet, Newbery décrit plutôt un nouveau type d'externalité, la variation des frais d'opération d'un véhicule que doit subir un automobiliste s'il circule sur une route de mauvaise qualité ou s'il circule sur une route de bonne qualité. Donc, pour Newbery, lorsqu'un véhicule emprunte une route, il l'endommage et celle-ci endommage le véhicule à

son tour augmentant ainsi son coût de fonctionnement. Barnes et Langworthy (2003) ont d'ailleurs estimé la variation des coûts d'utilisation à environ 1.63 cents US de plus par Km pour les automobiles et de 3.44 cents US de plus par Km pour les camions. La conclusion principale de Newbery est qu'il existe un cas particulier où les externalités de l'état de la route (*road damage externalities*) sont exactement de zéro et que, dans ce cas, la taxe forfaitaire que doivent supporter les usagers est égale au coût marginal social de l'utilisation de la route et que ceci est aussi équivalent aux coûts moyens d'entretien de la route. Newbery en arrive à une telle conclusion en travaillant avec les hypothèses suivantes : la circulation est la seule source de dégradation de la route, le flux du trafic est constant dans le temps et la stratégie de réparation de la route est telle que la route est réparée dès que le niveau de rugosité atteint un seuil critique. Comme on peut le voir sur le graphique suivant, la rudesse du revêtement dépend de l'effet cumulatif du trafic ayant emprunté ce tronçon de route.

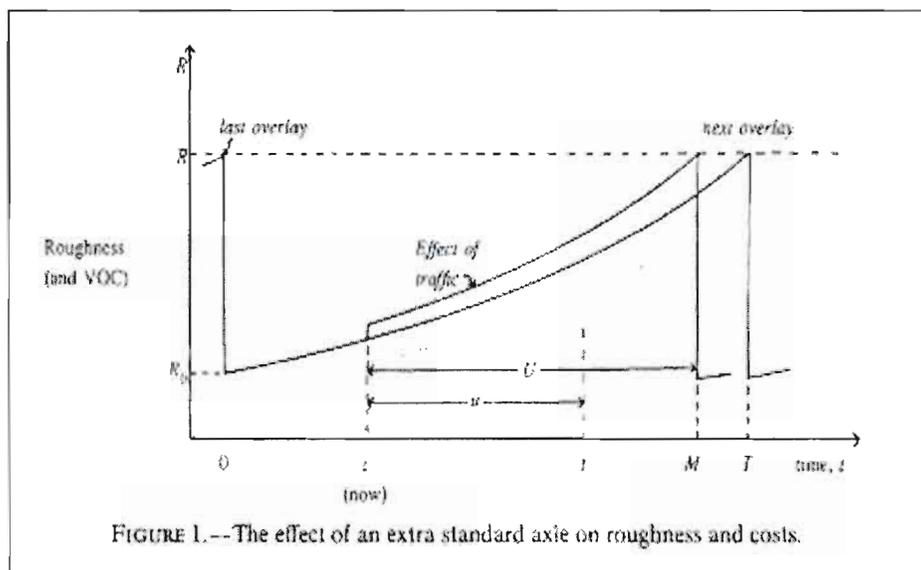


Figure 2 : Relation entre le temps et la rugosité

Tiré de Newbery (1988), *Econometrica*, Vol. 56, No. 2, p. 301

Selon l'article de Newbery (1988), si le seuil critique de rugosité de la route est fixé à R , on voit alors qu'après le temps T , on doit réparer la route pour la ramener à un niveau R_0 qui est un niveau optimal de qualité du revêtement. Les résultats qui nous proviennent de cet

article seront particulièrement importants, car nous tentons justement de prouver qu'avec une décision optimale du gouvernement quant au choix du type de revêtement, les externalités pour les usagers seront minimisées. La décision optimale du gouvernement quant au moment de réparer la route se produira lorsque les coûts supplémentaires pour devancer la date de réfection de la route seront égaux à la diminution des coûts d'opération des utilisateurs, laquelle est engendrée par la réfection de la route. Bien que certaines hypothèses de Newbery soient plutôt audacieuses, par exemple celle que la croissance de la circulation routière est nulle, alors que l'on observe une croissance marquée depuis la fin de la seconde guerre mondiale, les résultats sont fort évocateurs dans le sens qu'une stratégie de maintenance de la route doit faire l'objet de multiples considérations aussi bien budgétaires que techniques et même temporelles si l'on veut que les externalités supportées par les usagers soient minimisées et pour que les investissements du gouvernement soient maximisés.

1.1 Littérature technique de l'ingénierie routière

Il faut également, pour bien répondre à la question que nous posons, comprendre les aspects plus techniques du design des routes, les caractéristiques de la circulations ainsi que les estimations quant à la réhabilitation des routes qui sont utilisées par les ingénieurs pour construire les infrastructures. L'autorité en matière d'analyse de la capacité des routes est le *Highway Capacity Manual* qui est publié par le *Transportation Research Board*. Il nous résume les résultats de plus de cinquante années de recherches de différentes agences américaines en matière de transport. Selon ce manuel, les facteurs qui affectent la capacité de la route, le débit de la route (le nombre de véhicules passant par un certain point en un temps donné) et le niveau de services (de A à F, A étant le meilleur et F représentant le pire) sont : la largeur des voies, la largeur de l'accotement, le type de véhicule dans la circulation, le type de conducteur, le nombre de voies, la distance entre les sorties d'autoroute et la dénivellation de la route. Ce manuel nous donne également les facteurs d'ajustement permettant d'ajuster la vitesse du débit sans entrave (*free-flow speed*). On peut donc, à l'aide d'un facteur d'ajustement, connaître cette vitesse selon la modification de la largeur de la voie ou selon le nombre de voies disponibles. Le *Highway Capacity Manual* nous donne également la procédure à appliquer afin de calculer l'équivalent automobile de la présence de camions, ce

qui nous permet de calculer les effets qu'ont les véhicules lourds sur le débit de la route. Finalement, on y explique de quelle façon la probabilité qu'un accident survienne augmente lorsque la densité (le nombre de véhicules sur une certaine longueur de tronçon) augmente.

Ce dernier point rejoint les hypothèses de travail de Rotemberg (1985) lorsqu'il définit l'utilité d'un conducteur comme une fonction dépendant à la fois du temps passé sur la route et de la probabilité d'avoir un accident. La probabilité de subir un accident dans l'article de Rotemberg, *The Efficiency of Equilibrium Traffic Flow*, dépend quant à elle du temps passé sur la route. Plus le temps passé sur la route augmente, plus la probabilité d'avoir un accident augmente, donc plus la désutilité de l'agent augmente. On présente dans le *Highway Capacity Manual*, un modèle simple proposé par Greenshields pour illustrer la relation entre la vitesse, le volume de trafic et la densité de la circulation. En faisant l'hypothèse qu'il existe une relation linéaire entre la vitesse et la densité de la circulation on peut obtenir les résultats suivants :

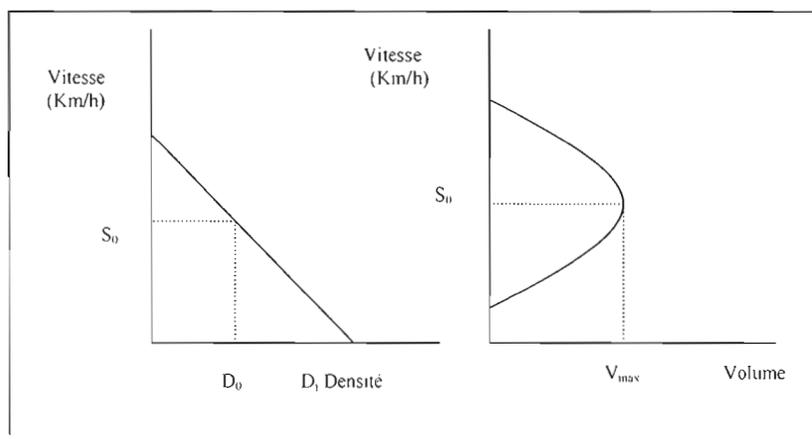


Figure 3 : Relation entre la densité, le volume et la vitesse

On peut voir que, selon le modèle de Greenshields, on obtient une densité optimale si la vitesse de la circulation est de S_0 . Par contre, si on dépasse cette vitesse optimale, comme nous l'avons vu dans l'article de Rotemberg, la densité sur la route se doit de diminuer car la distance entre les voitures augmente avec la vitesse.

Dans le livre de Richard C. Porter, *Economics at the Wheel : The Costs of Cars and Drivers*, on explique très bien comment est structurée la demande à court terme et à long terme pour les services routiers. On y explique que la demande à court terme est surtout fonction de trois coûts : le coût du carburant qui, comme on le sait, fluctue beaucoup, la valeur que l'agent accorde au temps qu'il passe sur la route et, finalement, la valeur que l'automobiliste accorde à sa vie, c'est-à-dire le risque de subir un accident. On y explique que l'élasticité-prix de la demande de services routiers par rapport au prix de l'essence est relativement faible à court terme. On peut expliquer ce phénomène par le fait que certains déplacements, comme les déplacements pour ce rendre au lieu de travail, sont obligatoires et par le fait que les gens ne peuvent changer leur véhicule rapidement, même lorsque le prix du carburant augmente. On voit par contre qu'à long terme, la réaction des consommateurs à un changement prolongé du prix de l'essence est plus importante. En effet, comme l'explique Porter, lorsque le prix de l'essence augmente pendant une longue période, on voit que la consommation des gens diminue. Ceci est très important pour notre étude car nous analysons comment le gouvernement peut minimiser ses dépenses tout en maximisant l'utilité des usagers de la route.

On sait que, selon Barnes et Langworthy, les coûts d'utilisation d'un véhicule sont plus importants lorsque ce véhicule circule sur une route à la surface plus endommagée que lorsqu'il circule sur une voie de meilleure qualité. Donc, la demande de service routier diminuera lorsque la qualité de la route sera faible.

CHAPITRE II

LE MODÈLE THÉORIQUE

2. La théorie

Pour bien comprendre les enjeux auxquels nous ferons face pour résoudre le problème auquel fait face le gouvernement, il faut nous rappeler quelques notions de théorie économique. La théorie économique nous dit qu'une économie de marché atteindra un niveau Pareto optimal si les conditions du *Premier théorème du bien-être* sont respectées. Si on prend la définition de Varian (2000), « Le Premier Théorème de l'Économie du Bien-être garantit qu'un marché concurrentiel exploite tous les gains découlant de l'échange : une allocation d'équilibre réalisée grâce à un ensemble de marchés concurrentiels est nécessairement efficace au sens de Pareto ». Donc, s'il n'y a aucun bien public, pas d'externalités, pas de rendement d'échelle croissant et qu'il y a des informations symétriques et un marché complet, un marché compétitif nous mène alors vers une allocation Pareto efficace. Dans le cas étudié ici, comme nous sommes en présence d'un bien public, le Premier Théorème de l'Économie du Bien-être ne peut s'appliquer et c'est pour cette raison que c'est au gouvernement de fournir les services routiers. Les services routiers sont en effet un bien rival de congestion. Lorsqu'une personne utilise une partie de service routier, elle empêche un autre agent de l'utiliser pleinement.

La théorie économique nous dit également que les biens publics sont accablés par de nombreux problèmes. Comme avec les biens publics, il est impossible d'empêcher quelqu'un d'en consommer et il est difficile de trouver quelqu'un qui voudra les produire. De plus, comme l'efficacité implique que le prix d'un service soit égal au coût marginal ($P = C_m$), le coût marginal est donc égal à zéro et le prix sera forcément de zéro, ce qui est impossible. C'est pourquoi il incombe au gouvernement de construire et d'entretenir les routes.

Pour résoudre notre problème, le gouvernement devra maximiser le bien-être de la collectivité. Pour ce faire, nous devons décider qu'elle forme prendra la fonction de bien-être

social du gouvernement. Nous allons utiliser comme fonction d'utilité pour le gouvernement une fonction de bien-être social dite utilitarienne (aussi appelée fonction benthamienne). Une fonction de bien-être social est une fonction qui reflète les préférences bien particulières d'une société. Cette fonction, popularisée par Bentham et Mills au 19^{ième} siècle, stipule que les politiques publiques devraient être conçues en suivant le principe suivant : « ...the greatest good for the greatest number » (Rosen, Boothe 2003). On peut interpréter ce principe de la manière suivante : la fonction de bien-être social de type utilitarienne est simplement la somme algébrique de l'utilité de chaque individu. Donc, le but du gouvernement dans cette situation est d'augmenter la somme totale de l'utilité des agents et non l'utilité d'un d'agent en particulier. La forme générale d'une fonction utilitarienne est la suivante :

$$W(u_1, u_2, \dots, u_i) = \sum_i u_i$$

Pour ce qui est de la redistribution, la fonction de bien-être utilitarienne stipule que l'on doit redistribuer tant que le bien-être (W) augmente. Comme nous l'avons vu précédemment, puisque les services de construction et d'entretien des infrastructures routières sont des biens publics, il revient au gouvernement de les fournir.

2.1 Les hypothèses

Avant de décrire les moyens que nous prendrons pour répondre à notre question, il est important de rappeler quelles seront les hypothèses que nous formulerons. Tout d'abord, examinons les hypothèses que nous faisons en ce qui concerne les usagers de la route. La première hypothèse qui dictera le comportement des usagers est la suivante : tous les usagers sont semblables dans leurs comportements et dans leurs préférences. Par contre, comme nous allons le constater, le type attribué à chaque agent affectera sa décision d'utiliser ou non la route. Nous ferons également l'hypothèse que tous les véhicules empruntant la route sont semblables. Bien que le nombre de véhicules de plus de 4,5 tonnes (camions) soit de 685 924 (Enquête sur les véhicules au Canada 2004), soit environ 3,6 % des véhicules immatriculés au Canada en 2004, et que les effets de tels véhicules sur le revêtement de la route ainsi que sur le flux de la circulation soient importants, la distinction entre les types de véhicules ne sera pas faite dans le but d'alléger le modèle. Dans un même ordre d'idée, l'hypothèse que tous

les agents utilisant la route font face à des coûts d'utilisation identiques sera utilisée. Finalement, la dernière hypothèse sur l'utilité des usagers est la suivante : les usagers ont tous une préférence marquée pour une route dont la qualité moyenne du revêtement est bonne et ils n'apprécient pas une route dont la qualité moyenne est médiocre. Cette dernière simplification est faite pour éviter d'avoir une qualité de la route qui prendrait la forme présentée à la figure 2. La présence d'autres utilisateurs sur la route est également une nuisance pour les agents. En effet, comme une route est un bien public dit de congestion, lorsqu'une personne l'utilise, elle retire la possibilité de l'utiliser à son plein potentiel, donc lorsqu'un nouvel usager pénètre sur la route, l'utilité de chacun des usagers est diminuée.

Nous ferons également deux hypothèses en ce qui concerne la route et le flux de circulation. Il est à noter que, dans le modèle présenté ici, la circulation est homogène et le flux de circulation est continu. Il est également important de noter que, comme dans l'article de Newbery, seule la circulation peut-être blâmée pour la dégradation de la route et que le climat, ici, n'a pas d'incidence sur la qualité du revêtement.

Le gouvernement, dans notre modèle, agira d'une manière similaire aux gouvernements fédéraux et provinciaux canadiens, c'est-à-dire que toutes les infrastructures routières présentes sur le territoire sont payées à l'aide d'une taxe que tous les individus de la population, qu'ils utilisent la route ou non, paient. La valeur de la qualité de la route ou des infrastructures sera donc égale au montant recueilli par la taxe. Finalement, la dernière hypothèse concernant le gouvernement est l'hypothèse quant à la forme de la fonction d'utilité du gouvernement. Comme nous l'avons expliqué précédemment, la forme de la fonction d'utilité du gouvernement sera une fonction utilitarienne. Cette dernière hypothèse est loin d'être irréaliste car on peut facilement s'imaginer que les objectifs du gouvernement en ce qui concerne les routes sont d'augmenter l'utilité de tous les agents et non pas d'un groupe d'agents en particulier.

2.2 La méthodologie utilisée

Pour répondre à la question : « Comment le gouvernement peut-il maximiser la qualité des routes ? », il est important de comprendre la méthode qui sera utilisée pour répondre à cette question. Le gouvernement doit maximiser le bien-être de la collectivité tout en respectant son budget. Il nous faudra d'abord déterminer le nombre d'automobilistes et de camionneurs qui décideront d'emprunter les infrastructures routières. Pour déterminer le nombre d'automobilistes qui utiliseront les infrastructures, nous devons égaliser l'utilité de ceux qui utilisent la route à celle de ceux qui ne l'utilisent pas pour déterminer quel est le type d'agent qui est indifférent entre le fait d'utiliser la route ou non. Suite à cette opération, nous obtiendrons le nombre optimal d'automobilistes et de camionneurs désirant utiliser la route, que nous appellerons n^* . Le nombre optimal d'automobilistes et de camionneurs représente en fait la demande marshallienne (ou demande non compensée) pour le réseau routier.

La seconde étape pour répondre à la question sera d'introduire les résultats trouvés précédemment dans la fonction d'utilité du gouvernement. En effet, le gouvernement anticipant n^* tentera de maximiser l'utilité de tous les citoyens. Le gouvernement maximisera donc la fonction de bien-être social sous la contrainte de respecter l'enveloppe budgétaire qui est mise à sa disposition. Pour ce qui est de la dégradation de la route, nous sommes conscients que la dégradation suit la forme présentée dans la figure 2. Comme cette forme est complexe et présente des caractéristiques difficilement identifiables, telles que l'amplitude et la longueur d'onde pour différents types de matériaux, nous utiliserons la qualité moyenne de la surface comme variable. Cette simplification, bien qu'importante, ne modifiera pas de façon substantielle le comportement de l'utilisateur car, pour celui-ci, c'est plutôt l'état moyen de la route qui l'intéresse pour ses coûts d'utilisation et non pour l'état de la chaussée à des moments bien spécifiques qui pourrait s'avérer à la fois excellent ou exécrable. Il serait toutefois intéressant, dans un travail subséquent, de comparer les résultats obtenus avec la qualité moyenne de la route avec un modèle plus compliqué où la route se détériore en suivant le modèle présenté à la figure 2.

2.3 La population, les types d'agents et les particularités du modèle

Avant de décrire les fonctions d'utilité des agents, il nous faut tout d'abord décrire le modèle que nous utiliserons ainsi que ses particularités. Tout d'abord, notons que, dans notre modèle, ce ne sont pas tous les agents qui utilisent les routes. En effet, comme dans la réalité, certains agents préfèrent utiliser d'autres moyens de locomotion plutôt que d'utiliser le réseau routier. Pour déterminer qui utilise et qui n'utilise pas le système routier dans notre modèle, nous avons décidé qu'à la naissance, un type était aléatoirement attribué à chaque individu. Ce type caractérise chaque individu et nous permet de savoir si cet individu préférera utiliser la route ou si, plutôt, il préférera rester chez lui. Le type de l'agent sera représenté par le symbole γ .

2.4 La fonction d'utilité des usagers de la route

Pour répondre à la question posée dans ce mémoire, il nous faudra tout d'abord élaborer une fonction d'utilité relativement simple mais décrivant le plus fidèlement possible l'utilité des usagers. C'est ici que la littérature sur l'économie du transport entre en jeu. Dans la majorité des ouvrages consultés, la même liste de facteurs affectant l'utilité des usagers est présente. Elle comprend :

- Le coût du carburant;
- Le confort de l'agent;
- L'entretien de la route;
- La probabilité d'être impliqué dans un accident;
- La largeur de la route;
- La qualité du revêtement; et
- Le temps.

Pour les fins de ce travail, toutes les variables ci-haut citées ne seront pas toutes utilisées car certaines d'entre elles sont interdépendantes. En effet, la probabilité d'accident dépend

de n^* et il existe déjà une autre relation qui dépend de n^* et qui s'exprime par le même canal, c'est-à-dire le temps passé sur la route. En effet, lorsque le nombre d'automobilistes et de camionneurs augmente, la densité de la circulation augmente et comme les nombreuses études sur la sécurité routière résumées dans le *Highway Capacity Manual* le démontrent, lorsque la distance entre les voitures (*headway distance*) diminue, alors la probabilité d'être impliqué dans un accident augmente. Donc, lorsque le nombre de véhicules augmente sur la route, les individus doivent prendre une décision quant aux compromis à faire entre l'espacement séparant les voitures, donc un choix de vitesse, et leur sécurité, soit la probabilité d'être impliqué dans un accident de la route. Il existe également un autre canal par lequel le nombre de véhicules s'exprime. Il s'agit du temps que prend un usager pour parcourir une certaine distance. Il existe une relation entre le nombre de véhicules sur la route et la vitesse à laquelle les usagers peuvent rouler. Plus le nombre d'usagers augmente, plus le temps de voyage de tous les usagers augmente et ce, jusqu'à ce que le nombre d'usagers présents sur la route soit égal à la capacité de la route. À partir de ce point, la vitesse des véhicules sur la route tend vers zéro et le temps de voyage tend quant à lui vers l'infini. Cette relation est représentée dans la figure suivante :

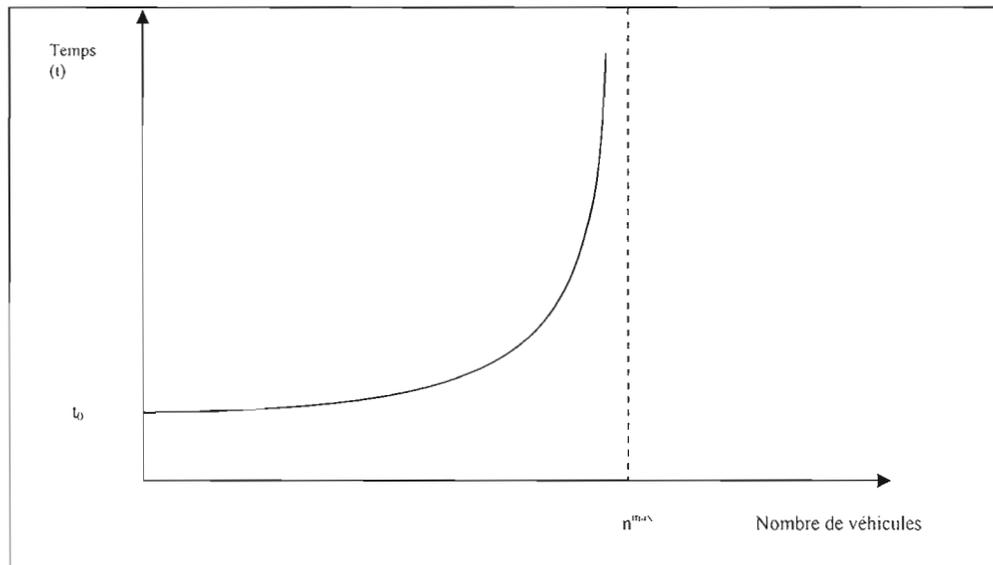


Figure 4 : Relation entre le temps de transit et le nombre de véhicules

Nous utiliserons donc une variable que nous appellerons « nombre d'usagers » pour décrire les effets du temps, du nombre de véhicules et de la largeur de la route sur l'utilité des usagers. La largeur est comprise dans la variable « nombre d'usagers » car elle a un impact direct sur le temps qu'un usager passe sur la route. Une route plus large, donc comportant plusieurs voies, permet d'accueillir plus de véhicules et permet à chacun de ceux-ci de rouler à une vitesse supérieure.

Les coûts que doit assumer un utilisateur lorsqu'il circule sur la route dépendent grandement de la qualité de celle-ci. En effet, lorsque la qualité de la route se détériore ou lorsque la rugosité de la route augmente, les coûts d'utilisation augmentent, que se soit dû à une plus grande consommation d'essence, la dégradation accélérée des pneus ou à la dégradation générale du véhicule. Le coût d'utilisation d'une voiture circulant sur une route de bonne qualité est, selon le Département des transport du Minnesota, d'environ 9.56 cents US par kilomètre alors que s'il circule sur une route de mauvaise qualité, l'utilisateur devra défrayer un montant d'environ 11.19 cents US par kilomètre. On peut donc voir que le fait de rouler sur une route de mauvaise qualité engendre des coûts supplémentaires de 1.63 cent US par kilomètre, par usager. Donc, les variables de coût d'utilisation et de qualité du revêtement sont intégrées dans la même variable que nous appellerons « qualité de la route ».

La dernière variable que nous utiliserons pour décrire le comportement des usagers de la route sera la variable « taxe ». La taxe, que chacun des usagers de la route paie, est dédiée exclusivement à la construction et à l'entretien des infrastructures routières. C'est sans grandes surprises que, dans le modèle présenté ici, la taxe affectera de manière négative l'utilité des automobilistes et des camionneurs.

En prenant en considération les relations énumérées plus haut, il est maintenant possible d'écrire la fonction d'utilité décrivant l'utilité des usagers. La forme réduite de cette fonction d'utilité est la suivante :

$$V_{usagers} = V(Q, t, n) \quad (1)$$

La variable Q représente la qualité de la route, la variable t la taxe et n le nombre d'usagers, soit le nombre de véhicules présents sur la route. L'effet marginal de ces différentes variables sur l'utilité des usagers est le suivant :

$$\frac{\partial V_{usagers}}{\partial Q} > 0;$$

$$\frac{\partial V_{usagers}}{\partial t} < 0;$$

$$\frac{\partial V_{usagers}}{\partial n} < 0.$$

2.5 Les arguments de la fonction d'utilité des usagers

2.5.1 Le nombre d'usagers

Comme nous l'avons vu précédemment, un des facteurs principaux déterminant le choix des automobilistes est le nombre d'autres automobilistes présents sur la route. On doit noter que, lorsque le nombre de véhicules sur la route est nul, ce qui signifie que la route est déserte, la durée du trajet pour un usager sera tout de même positive. La relation entre le temps et le nombre de voitures est présentée à la figure 4. Comme nous pouvons le remarquer dans cette figure, lorsque le nombre d'automobilistes augmente, le temps passé sur la route augmente et ce, de manière de plus en plus rapide. Lorsque l'on dépasse la capacité maximale de la route, le temps du transit tend vers l'infini, nous sommes donc en présence d'un bouchon de circulation. Pour le cas étudié par ce mémoire, nous ferons l'hypothèse que n^{\max} n'est jamais atteint et que l'on reste dans la portion linéaire de la droite présentée à la figure 4.

2.5.2 La qualité

Le deuxième facteur que les agents, qu'ils soient automobilistes ou camionneurs, prennent en considération pour déterminer leur niveau d'utilisation des infrastructures routières, est la qualité du revêtement routier. En effet, plus le revêtement sera de bonne qualité, plus le confort de l'utilisateur sera grand. Une route qui se détériore rapidement et qui présente de nombreuses irrégularités à sa surface sera inconfortable tant pour les automobilistes que pour les camionneurs. Une route de mauvaise qualité produit également des coûts plus importants pour les usagers. Nous faisons l'hypothèse que la dégradation de la route est causée seulement par la circulation et que lorsque cette dernière augmente, la dégradation se fait plus rapidement. L'effet de la qualité de la route sur l'utilité des agents peut être représentée graphiquement par :

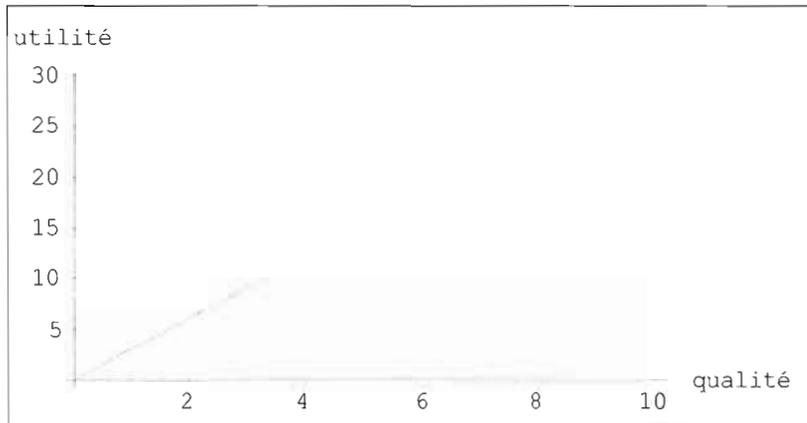


Figure 5: Relation entre l'utilité et la qualité

Une autre hypothèse sera faite quant à la capacité des usagers de discerner différents niveaux de confort. L'hypothèse qui sera faite est que les automobilistes et les camionneurs ne sont pas intéressés à connaître le niveau de confort que la chaussée leur procurera à des instants bien précis dans le temps mais ils seront plutôt intéressés à connaître l'état moyen de la route. Cette hypothèse est fort réaliste et nous permet d'éviter l'utilisation d'une variable décrivant l'inconfort à un moment précis qui prendrait une forme difficilement utilisable, tel que présenté à la figure 2, et nous permet, autrement, d'utiliser la variable du confort moyen.

On peut maintenant écrire la fonction d'utilité décrivant l'utilité des usagers, elle prendra la forme suivante :

$$V_{usagers} = \alpha \cdot Q - \frac{\beta}{2} \cdot t^2 - \sigma \cdot n \quad (2)$$

Les variables α , β et σ représentent des paramètres affectant nos variables et où $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $\sigma > 0$. La qualité est représentée par la lettre Q , la taxe par t et le nombre d'usagers sur la route par n . Nous remarquons alors que nos hypothèses quant à l'effet des différentes variables sur l'utilité des usagers sont respectées car :

$$\frac{\partial V_{usagers}}{\partial Q} = \alpha > 0;$$

$$\frac{\partial V_{usagers}}{\partial t} = -\beta \cdot t < 0;$$

$$\frac{\partial V_{usagers}}{\partial n} = -\sigma < 0$$

2.6 La fonction d'utilité des gens n'utilisant pas la route

Maintenant que nous avons obtenu la fonction d'utilité décrivant le comportement de ceux qui utilisent la route, il ne nous reste plus qu'à décrire la fonction d'utilité décrivant le comportement de ceux qui ne l'utilisent pas. Comme nous l'avons vu précédemment, ceux qui n'utilisent pas le système routier sont les individus possédant un type élevé. Nous avons également défini dans ce modèle, que ce sont tous les individus de la population qui paient pour les infrastructures routières. On peut donc faire l'hypothèse que les agents n'utilisant pas la route sont affectés de la même manière par la taxe que les individus utilisant la route. Par contre, contrairement aux usagers de la route, les « non-utilisateurs » ne retirent aucune utilité d'une certaine qualité de la route. Les « non-utilisateurs » n'ont que leur type comme utilité et une utilité de réserve qui est constante. La fonction d'utilité des agents n'utilisant pas la route est donc la suivante :

$$V_{non-usagers} = M + \gamma - \frac{\beta}{2} \cdot t^2 \quad (3)$$

Gamma est le type de l'usager, t la taxe et M la composante commune à l'utilité de réserve pour tous les individus. En effet l'utilité de réserve est composée de M, la composante commune, et de γ , la composante de l'utilité de réserve qui varie selon l'individu. Nous allons émettre l'hypothèse que M est négatif et nous verrons subséquemment pourquoi.

Nous pouvons constater que nos hypothèses quant à l'effet des différentes variables sur l'utilité sont vérifiées :

$$\frac{\partial V_{non-usagers}}{\partial t} = -\beta \cdot t < 0.$$

2.7 La contrainte budgétaire du gouvernement et sa fonction d'utilité

Maintenant que nous connaissons la fonction d'utilité des gens n'utilisant pas la route et celle des gens l'utilisant, nous pouvons décrire la fonction de bien-être que le gouvernement voudra maximiser ainsi que la contrainte à laquelle il fait face. Comme il fut expliqué précédemment, la fonction de bien-être du gouvernement est une fonction de bien-être utilitarienne, c'est donc une somme des utilités de tous les agents. Il existe un type, que nous appellerons $\hat{\gamma}$, qui illustre que l'agent est indifférent entre utiliser la route ou non. L'agent possédant ce type nous permettra de déterminer qui utilise la route et qui ne l'utilise pas. Nous pourrons ainsi faire la somme des utilités des agents utilisant la route à laquelle nous ajouterons l'utilité des agents n'utilisant pas la route et nous pourrons alors maximiser cette fonction.

Pour ce qui est de la contrainte budgétaire, comme il fut mentionné précédemment, tous les agents paient la taxe et cette taxe est la seule source de revenu qui sera à la disposition du gouvernement pour aménager et entretenir les infrastructures routières². La fonction décrivant les dépenses du gouvernement est relativement simple. Nous ferons l'hypothèse que l'on peut accorder un prix à la qualité de la route et les dépenses seront tout simplement le produit du prix de la qualité et de la quantité de qualité achetée. La contrainte budgétaire du gouvernement prendra donc la forme suivante :

$$\bar{\gamma} \cdot t = P \cdot Q$$

² On suppose qu'il n'y a aucun « coût des fonds publics » reflétant les distorsions associées à la taxation. Le cas où les « coûts des fonds publics » sont supérieurs à un (>1) signifie que le gouvernement ne peut utiliser une taxe forfaitaire. Un exemple de cette situation est le cas où seuls les usagers de la route sont taxés. Nous avons supposé que tous étaient taxés car la présence de « coût des fonds publics » complexifierait le modèle au-delà des objectifs de ce mémoire.

$\bar{\gamma}$ est le nombre d'agent dans notre population et P le prix de la qualité. Comme notre population est uniformément distribuée entre 0 et 1 ($\gamma \sim U[0,1]$), on peut alors simplifier la contrainte budgétaire en l'écrivant de la façon suivante :

$$t = P \cdot Q \tag{4}$$

CHAPITRE III

LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DES USAGERS

3. Le nombre d'usagers de la route

Avant de maximiser la fonction de bien-être social du gouvernement, il est nécessaire de déterminer quel sera le nombre d'agents qui utilisera la route. C'est uniquement après avoir calculé le nombre de véhicules, que le gouvernement pourra maximiser sa fonction. On sait que l'utilité des utilisateurs de la route est illustrée par l'équation (2) et que celle des non utilisateurs de la route est représentée par l'équation (3). On sait également, qu'il existe un type d'agent qui est indifférent entre utiliser la route ou non. Dans ce cas, l'utilité de cet agent est telle que nous avons :

$$\begin{aligned} V_{usager} &= V_{non-usagers} \\ \rightarrow \alpha \cdot Q - \frac{\beta}{2} \cdot t^2 - \sigma \cdot n &= M + \gamma - \frac{\beta}{2} \cdot t^2 \\ \rightarrow \alpha \cdot Q - \sigma \cdot n &= M + \gamma \\ \rightarrow \alpha \cdot Q - \sigma \cdot n - M &= \gamma \end{aligned} \tag{5}$$

Le type, qui est représenté par le symbole γ , est distribué de manière uniforme entre $\underline{\gamma} = 0$ et $\bar{\gamma} = 1$. Une des particularités importantes de ce modèle est que, contrairement à ce qui est généralement vu dans la littérature, c'est le type faible qui utilise la route alors que le type fort ne l'utilise pas.

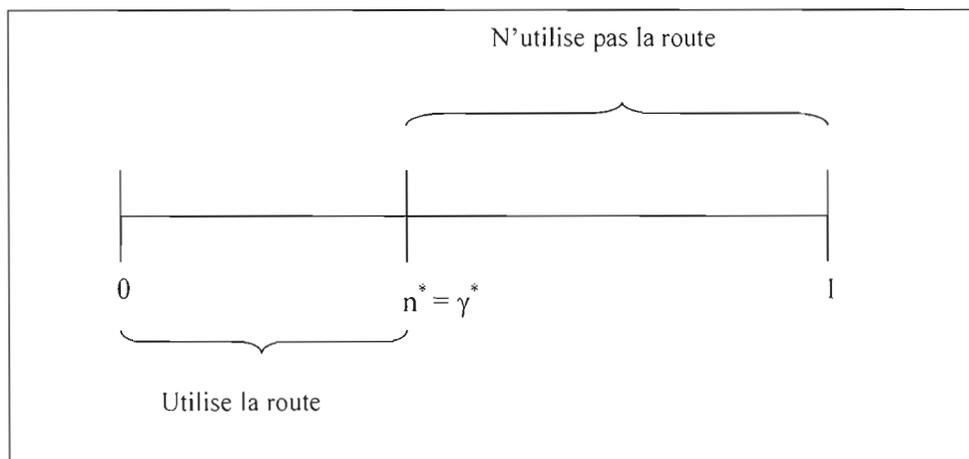


Figure 6 : Distribution de la population

Comme notre population est distribuée uniformément entre 0 et 1 et que ce sont les types faibles qui utilisent la route, alors le nombre d'utilisateurs utilisant la route (n^*) est égal au type pour qui l'utilisateur est indifférent entre utiliser la route ou non, que nous appellerons ($\hat{\gamma}$).

Donc, comme $n^* = \hat{\gamma}$ on peut remplacer gamma par n^* dans l'équation (5). On obtient alors :

$$\begin{aligned}
 \alpha \cdot Q - \sigma \cdot n - M &= n \\
 \rightarrow \alpha \cdot Q - M &= n + \sigma \cdot n \\
 \rightarrow \alpha \cdot Q - M &= (1 + \sigma) \cdot n \\
 n^* &= \frac{\alpha \cdot Q - M}{(1 + \sigma)} = \hat{\gamma} \tag{6}
 \end{aligned}$$

Nous obtenons donc, avec l'équation (6), la fonction décrivant le nombre d'utilisateurs qui utilisera la route et la fonction décrivant le type qui est indifférent entre l'utiliser ou non.

Comme nous avons la fonction décrivant le nombre d'utilisateurs empruntant la route, nous pouvons maintenant déterminer l'utilité que les usagers retireront à utiliser la route. En substituant l'équation (6) dans l'équation (2) on obtient :

$$\begin{aligned}
V(n^*) &= \alpha \cdot Q - \frac{\beta}{2} \cdot t^2 - \sigma \cdot \overbrace{\left(\frac{\alpha \cdot Q - M}{1 + \sigma} \right)}^{n^*} \\
\rightarrow V(n^*) &= \frac{\alpha \cdot Q \cdot (1 + \sigma)}{1 + \sigma} - \frac{\beta}{2} \cdot t^2 - \left(\frac{\alpha \cdot Q \cdot \sigma - M \cdot \sigma}{1 + \sigma} \right) \\
\rightarrow V(n^*) &= \frac{\alpha \cdot Q}{1 + \sigma} + \frac{\alpha \cdot Q \cdot \sigma}{1 + \sigma} - \frac{\beta}{2} \cdot t^2 - \frac{\alpha \cdot Q \cdot \sigma}{1 + \sigma} + \frac{M \cdot \sigma}{1 + \sigma} \\
\rightarrow V(n^*) &= \frac{\alpha \cdot Q}{1 + \sigma} - \frac{\beta}{2} \cdot t^2 + \frac{M \cdot \sigma}{1 + \sigma} \tag{7}
\end{aligned}$$

CHAPITRE IV

RÉSOLUTION DU PROBLÈME DU GOUVERNEMENT

4.1 La maximisation

Nous avons maintenant tous les éléments nécessaires pour construire la fonction de bien-être social du gouvernement afin de la maximiser. Le problème du gouvernement est le suivant :

$$\max_{Q, t} W = \int_0^{\hat{\gamma}} \left(\frac{\alpha \cdot Q}{1+\sigma} - \frac{\beta}{2} \cdot t^2 + \frac{\sigma \cdot M}{1+\sigma} \right) d\gamma + \int_{\hat{\gamma}}^1 \left(M + \gamma - \frac{\beta}{2} \cdot t^2 \right) d\gamma$$

sujet à la contrainte $t = PQ$ (8)

On peut réécrire l'équation (8) de la façon suivante :

$$\max_{Q, t} W = \int_0^{\hat{\gamma}} \left(\frac{\alpha \cdot Q + \sigma \cdot M}{1+\sigma} \right) d\gamma + \int_{\hat{\gamma}}^1 (M + \gamma) d\gamma - \int_0^1 \left(\frac{\beta \cdot t^2}{2} \right) d\gamma \quad (8.1)$$

sujet à la contrainte $t = P \cdot Q$.

Avant d'effectuer la maximisation, on peut simplifier la fonction objectif en effectuant l'intégration. Nous obtenons :

$$W = \left(\frac{\alpha \cdot Q + \sigma \cdot M}{1+\sigma} \right) \cdot \hat{\gamma} + M - M \cdot \hat{\gamma} + \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \hat{\gamma}^2 - \left(\frac{\beta \cdot t^2}{2} \right)$$

sujet à la contrainte $t = P \cdot Q$.

On peut substituer, dans la dernière équation, l'équation (6) et on obtient :

$$W = \left(\frac{\alpha \cdot Q + \sigma \cdot M}{1 + \sigma} \right) \cdot \left(\frac{\alpha \cdot Q - M}{1 + \sigma} \right) + M + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot Q - M}{1 + \sigma} \right) \cdot M - \frac{\left(\left(\frac{\alpha \cdot Q - M}{1 + \sigma} \right) \right)^2}{2} - \frac{\beta \cdot t^2}{2} \quad (9)$$

Finalement, on peut substituer dans l'équation (9) t par PQ et on obtient :

$$W = \left(\frac{\alpha \cdot Q + \sigma \cdot M}{1 + \sigma} \right) \cdot \left(\frac{\alpha \cdot Q - M}{1 + \sigma} \right) + M + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot Q - M}{1 + \sigma} \right) \cdot M - \frac{\left(\left(\frac{\alpha \cdot Q - M}{1 + \sigma} \right) \right)^2}{2} - \frac{\beta \cdot (P \cdot Q)^2}{2}$$

On peut simplifier cette équation et on obtient la fonction objectif suivante :

$$W = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + 2 \cdot M - P^2 \cdot Q^2 \cdot \beta + \frac{(M - \alpha \cdot Q)^2}{(1 + \sigma)^2} \right] \quad (10)$$

Les conditions du premier ordre peuvent maintenant être calculées à l'aide de l'équation (10).

Nous obtenons la C.P.O. suivante :

$$\frac{\partial W}{\partial Q} = \left[\left(\frac{\alpha}{1 + \sigma} \right)^2 - \beta \cdot P^2 \right] \cdot Q - \frac{\alpha \cdot M}{(1 + \sigma)^2} = 0 \quad (11)$$

À l'aide de l'équation (11), nous pouvons isoler la variable de la qualité de la route (Q) et nous obtiendrons ainsi la valeur de la qualité de la route optimale en fonction des paramètres α , β et σ , et des paramètres exogènes que sont le prix de la qualité et l'utilité de réserve M . Nous obtenons donc la valeur suivante pour la qualité optimale :

$$Q^* = \frac{\alpha \cdot M}{\alpha^2 - P^2 \cdot \beta \cdot (1 + \sigma)^2} \quad (12)$$

On se rappelle que selon l'équation (4), la contrainte budgétaire stipule que le revenu de la taxe est égal au produit de la qualité et du prix de la qualité (P). Il est de ce fait possible de déterminer la taxe optimale :

$$i^* = \frac{\alpha \cdot P \cdot M}{\alpha^2 - P^2 \cdot \beta \cdot (1 + \sigma)^2} \quad (13)$$

Il est indispensable de vérifier si la qualité optimale trouvée est belle et bien un maximum. Il sera utile de vérifier si la condition de second ordre (C.S.O.) est respectée. Les conditions du second ordre nous permettront, dans notre cas, d'identifier les maxima au sein de l'ensemble des points candidats satisfaisant la condition du premier ordre. Les conditions du second ordre joueront également un rôle important lors de l'étude de statique comparative que nous traiterons plus loin. Comme on l'explique dans Simon et Blume (2002),

« On est alors amené à calculer les différentielles totales des conditions du premier ordre et à travailler avec un système d'équations linéaires dont la matrice des coefficients correspond précisément à la matrice sur laquelle portent les conditions du second ordre du problème d'optimisation initial. »

C'est le signe du déterminant de cette matrice qui nous intéresse. Dans notre cas, nous voulons que le signe de ce déterminant de la matrice hessienne soit défini négatif. Pour être plus précis, les conditions nécessaires stipulent que la matrice jacobienne évaluée à un point stationnaire, doit être nulle et que la matrice hessienne, évaluée au même point stationnaire, soit semi-définie négative pour garantir un maximum. Maintenant que cette explication est donnée, nous pouvons vérifier si la condition de second ordre tient. La condition du second ordre est :

$$\frac{\partial^2 W}{\partial Q^2} = \frac{\alpha^2}{(1 + \sigma)^2} - \beta \cdot P^2 < 0 \quad (14)$$

Il est indispensable d'émettre comme hypothèse que l'équation (14) est satisfaite. Cette hypothèse implique que le dénominateur des équations (12) et (13) soit négatif. Donc, pour

que nos équations (12) et (13) soient valides, il faut absolument faire l'hypothèse que M (la composante commune de l'utilité de réserve) est négative. Dans notre modèle, M ne sera jamais positif car dans le cas où M serait positif, la meilleure qualité de la route que l'on pourrait obtenir est une qualité nulle. L'explication que l'on peut donner pour expliquer que M est strictement négatif est la suivante : si $M > 0$, les gens sont si confortables à leur domicile qu'ils ne voudront jamais emprunter les infrastructures routières.

4.2 Exemple numérique

Maintenant que nous connaissons les valeurs optimales de la qualité, de la taxe et la dérivée seconde, nous pouvons fixer les paramètres exogènes du modèle pour faire les vérifications nécessaires. Les vérifications qui seront nécessaires à effectuer sont les suivantes : il faut vérifier si le $\hat{\gamma}$ et le n^* sont bien compris entre 0 et 1. Ensuite, il faudra vérifier que les valeurs optimales de la qualité et de la taxe sont positives et que la dérivée seconde est négative.

La première vérification que nous allons effectuer est de vérifier le $\hat{\gamma}$ et le n^* sont bien compris entre 0 et 1. Pour ce faire, les valeurs de α , β , σ , P et M ont été fixées à :

- $\alpha = 0.3$;
- $\beta = 0.1$;
- $\sigma = 0.1$;
- $P = 2$;
- $M = -0.5$.

Avec ces valeurs, nous obtenons une quantité de gens qui utilisent la route de 0.558376, soit environ 56 % de la population. Le type d'agent qui est indifférent entre utiliser la route ou non est également de 0.558376. Comme ces deux valeurs sont comprises entre 0 et 1, la première condition est vérifiée.

Le seconde vérification que l'on doit faire pour valider notre modèle et notre exemple numérique est de vérifier si Q^* et t^* sont positifs et si la condition de second ordre est vérifiée. Si l'on attribue les mêmes valeurs aux paramètres exogènes qu'à la vérification précédente, on trouve que la qualité optimale est de 0.380711. La valeur optimale de la taxe, quant à elle, est de 0.761421. On arrive au résultat que la dérivée seconde de la fonction de bien-être par rapport à la qualité nous donne -0.32562. Finalement, on s'attend théoriquement à ce que lorsque le prix de la qualité augmente, que la quantité demandée par les autorités responsable des infrastructures routières diminue. Nous trouvons avec notre modèle, et avec les valeurs que nous avons assignées aux paramètres exogènes, que la dérivée de la qualité optimale par rapport au prix de la qualité nous donne :

$$\frac{\partial Q^*}{\partial P} = -0.467675$$

On peut également penser que lorsque l'utilité de réserve que tous les individus retirent à ne pas utiliser la route (M) augmente, la taxe devrait diminuer. En effet, si les non utilisateurs de la route retirent plus de bien-être en restant à la maison plutôt qu'en utilisant la route, il faudra que le gouvernement diminue la taxation pour les persuader d'utiliser les routes. Il se peut également qu'à la suite de l'augmentation de M, le gouvernement décide qu'il ne peut augmenter les taxes, mais qu'il doit plutôt les diminuer. Nous trouvons, à l'aide des poids que nous donnons aux paramètres exogènes, que :

$$\frac{\partial t}{\partial M} = -1.52284$$

On peut s'attendre également à ce que lorsque l'on augmente le prix de la qualité des routes, que les gouvernements augmentent la taxe pour financer leurs projets. Par contre, dans notre modèle, nous obtenons le résultat contraire, c'est-à-dire que lorsque le prix de la qualité des routes augmente, donc lorsque le prix des matériaux de construction et de la main-d'œuvre augmentent, alors la taxe diminue. En effet, nous obtenons la dérivée de la taxe optimale par rapport au prix de la qualité égale à -0.554639. La source de cette anomalie nous vient du fait que lorsque le prix de la qualité augmente, on s'attend à ce que le gouvernement

augmente la taxe pour pallier à la hausse. Par contre, comme la qualité de la route est un bien normal, lorsque le prix de la qualité de la route augmente, la qualité demandée par le gouvernement diminue. C'est pourquoi nous retrouvons cette anomalie, lorsque le prix de la qualité augmente, l'effet sur la qualité demandée étant plus important que l'effet de l'augmentation du prix sur la taxe.

On peut résumer tous les derniers résultats dans le tableau suivant :

$\alpha = 0,3$	$Q^* = 0,380711$
$\beta = 0,1$	$t^* = 0,761421$
$\sigma = 0,1$	$\frac{\partial^2 W}{\partial Q^2} = -0,32562$
$P = 2$	$\frac{\partial Q^*}{\partial P} = -0,467675$
$M = -0,5$	$\frac{\partial t^*}{\partial M} = -1,52284$
$\hat{\gamma} = 0,558376$	$\frac{\partial t^*}{\partial P} = -0,554639$
$n^* = 0,558376$	

Tableau 1 : Tableau résumé

CHAPITRE V

STATIQUE COMPARÉE

Nous avons maintenant toutes les données nécessaires pour évaluer l'effet de la variation des variables exogènes sur la qualité optimale, sur la taxe optimale et sur le nombre d'utilisateurs qui utilisera la route. Nous allons tout d'abord examiner les effets de la variation des prix de la qualité, nous évaluerons ensuite les effets de la variation du paramètre affectant la qualité de la route et ceux des paramètres affectant la taxe et le nombre d'automobilistes sur la route.

5.1 Effets de la variation du prix de la qualité

On remarque, en examinant le tableau 1 de l'annexe, que lorsque le prix de la qualité de la route augmente, la qualité de la route demandée par le gouvernement diminue. On remarque, dans ce même tableau, que l'effet de l'augmentation du prix de la qualité de la route de 1% a comme effet de diminuer la qualité optimale que le gouvernement doit fournir de 2,41%. Si on examine l'indice des prix pour l'industrie de la construction, entre le mois de janvier 2000 et le mois de mai 2005, on remarque que les prix du ciment, du béton et des produits du béton ont, en moyenne, augmentés de 10,53% (Statistique Canada 2005). Si on applique la même augmentation au prix de la qualité de la route, on remarque que la qualité de la route, durant cette période, aurait dû diminuer de 21,4%.

Dans le même tableau, on remarque qu'à la suite de l'augmentation du prix de la qualité de la route, que le nombre d'utilisateurs de la route a diminué. À la suite d'une augmentation de 1% du prix de la qualité de la route, le nombre d'utilisateurs diminue de 0,45%. Si on applique ce résultat au prix de la qualité de la route, le même taux d'inflation des prix de la construction a été observé entre 2000 et 2005, donc le nombre d'utilisateurs de la route aurait dû diminuer d'environ 3,98%. On peut se demander pourquoi la quantité d'utilisateurs utilisant la route diminue aussi lentement alors que la qualité de la route diminue à un taux relativement rapide. La réponse serait-elle dans l'effet de la diminution de la taxe?

Lorsque le prix de la qualité de la route augmente, on remarque que la taxe que doivent assumer tous les citoyens tend à diminuer. En effet, lorsque le prix de la qualité de la route augmente de 1%, la taxe que tous les agents doivent assumer diminue de 1,43%. La taxe que les canadiens paient et qui est assignée à l'entretien et la construction des routes aurait donc dû diminuer de 13,13% entre 2000 et 2005 alors que les prix de la construction augmentaient d'environ 10,53%.

5.2 Effets de la variation du paramètre α

On peut maintenant examiner les effets de la variation du paramètre affectant la qualité de la route. En faisant varier ce paramètre, on fait augmenter ou diminuer l'importance que les individus utilisant la route accordent à la qualité de la route. On constate, dans le tableau 2 de l'annexe, que lorsque le poids que l'on accorde à la qualité de route augmente, que la qualité de la route que le gouvernement doit entretenir augmente. En effet, on remarque qu'à la suite d'une augmentation de 1% du paramètre alpha par rapport à son niveau initial, la qualité optimale de la route doit augmenter de 1,47%. Si on augmente ce même poids de 10%, la qualité de la route doit augmenter de 15,54%.

En augmentant l'importance qu'occupe la qualité de la route dans l'utilité des usagers, on remarque que le nombre d'usagers de la route augmente. Suite à une augmentation de 1% du paramètre alpha par rapport à son niveau initial, le nombre d'usagers n'augmente que de 0,46%. Si on augmente le paramètre alpha de 10%, le nombre d'usagers augmente de 5,04%. On peut se demander pourquoi le nombre d'usagers augmente moins rapidement que la qualité de la route elle-même.

La raison pouvant expliquer la faible augmentation du nombre d'usagers compte tenu de l'augmentation importante de la qualité de la route, peut être expliquée par l'effet sur la taxe. Quand le paramètre alpha augmente de 1%, alors la taxe que toute la population doit supporter augmente de 1,47%. On remarque donc que la taxe augmente dans les mêmes proportions que la qualité lorsque le paramètre alpha augmente.

5.3 Effets de la variation du paramètre β

Le paramètre bêta est le paramètre décrivant le poids qu'accordent les usagers à la taxe finançant les routes. On peut s'attendre à ce que lorsque ce paramètre augmente, la qualité de la route et le nombre d'usagers de la route diminuent. En effet, plus les gens accorderont une grande importance à la taxe, plus les recettes de celle-ci seront faibles et plus la qualité de la route sera faible. Dans la même perspective, plus la qualité de la route est faible, plus le nombre d'agents décidant d'utiliser la route sera faible.

On remarque, dans le tableau 3 de l'annexe, que l'on obtient des résultats qui concordent avec ce que l'on vient de décrire. En effet, on remarque que lorsque le paramètre bêta augmente de 1 %, la qualité de la route diminue de 1,21 %. On remarque également que plus le paramètre bêta augmente, plus la diminution de la qualité est faible. La qualité diminue de 10,94% lorsque le paramètre bêta augmente de 10 %, puis la qualité diminue de 38,05 % lorsque le paramètre bêta augmente de 50 % et, finalement, la qualité optimale doit diminuer de 55,13 % lorsque le paramètre bêta augmente de 100 %.

La quantité de gens empruntant la route diminue également lorsque le paramètre bêta augmente. Quand le paramètre bêta augmente de 1 %, on peut constater que la quantité de véhicules sur la route devrait diminuer de 0,23 %. Si bêta augmente de 10 %, alors le nombre de véhicules devrait diminuer de 2,03 %. On peut expliquer le fait que le nombre de gens diminue moins rapidement que la qualité de la route par le fait que, dans le tableau 3, la taxe diminue au même rythme que la qualité. Donc, bien que la qualité diminue, le fait que la taxe diminue dans les mêmes proportions ralentit le rythme auquel les gens décident de ne pas utiliser la route.

5.4 Effets de la variation du paramètre σ

Sigma est le paramètre affectant la variable du nombre d'usagers sur la route. Plus la valeur du paramètre sigma augmente, plus l'utilité des gens est affectée par la présence d'autres automobilistes et camionneurs. Selon la littérature consultée, plus le nombre de véhicules sur la route augmente, plus le temps de transit d'un véhicule vers sa destination augmente, donc l'utilité des gens diminue. Nous pouvons donc nous attendre à ce que lorsque le poids que l'on accorde à la variable « nombre de véhicules sur la route » augmente, la qualité de la route diminue également.

On réalise, à l'examen du tableau 4 de l'annexe, qu'à l'instar du paramètre bêta, lorsque l'on fait varier sigma, la qualité de la route et la taxe varient dans les mêmes proportions. En effet, on voit que dans les deux cas, lorsque le paramètre sigma augmente de 1 %, la qualité et la taxe doit diminuer de 0,22 %. Lorsque sigma augmente de 10 %, la qualité et la taxe optimale diminue de 2,19 %. Par contre, le nombre d'usagers ne diminue pas dans les mêmes proportions. On voit que lorsque sigma augmente de 1 % et de 10 %, que le nombre d'usagers diminue de 0,13 % et de 1,31 %.

CONCLUSION ET COMMENTAIRES

Ce mémoire avait pour but de déterminer comment le gouvernement devrait fournir une qualité d'infrastructures routières pour que celles-ci soient optimales du point de vue des consommateurs des services routiers. Le second but de ce projet était, quant à lui, de déterminer quelle serait la taxe optimale que le gouvernement devait mettre en place pour implanter la qualité de la route optimale. Le modèle présenté dans le présent mémoire répond adéquatement à la théorie et confirme la littérature de l'économie du transport sur de nombreux points mais il comporte également des lacunes.

En effet, le modèle que nous avons étudié démontre que, comme on s'y attend, lorsque le prix de la qualité de la route augmente, la quantité demandée par le gouvernement diminue. Les effets qu'ont les paramètres α et β sont également conformes à ce qui était attendu. En effet, nous nous attendions à ce que lorsque le poids de la qualité augmente, que la qualité augmente pour continuer de satisfaire les usagers. On s'attendait également à ce que la qualité de la route diminue lorsque le poids sur le nombre d'usagers et le poids sur la taxe augmentent. Pour ce qui est de la constante M , les résultats obtenus sont sensés. Si la constante M augmente, donc si l'utilité qu'ont les agents à rester à la maison plutôt qu'à utiliser les infrastructures augmente, il faudra absolument que la qualité des infrastructures augmente pour que les agents qui utilisent déjà le réseau continuent de l'utiliser.

Le modèle que nous avons présenté possède par contre quelques faiblesses. On peut tout d'abord citer la simplicité de la fonction d'utilité que nous utilisons. La fonction a dû être simplifiée à sa plus simple expression dû à de la grande difficulté à trouver une fonction d'utilité représentant la réalité et qui était relativement simple à résoudre. De plus, nous avons dû réduire, dans la fonction d'utilité, les éléments augmentant l'utilité des usagers. En effet, nous avons tenté de résoudre le même problème avec l'entretien des routes, la largeur des voies et la qualité du revêtement, mais le problème devenait trop complexe à résoudre. Nous aurions cependant pu utiliser un système de taxation où seulement les utilisateurs de services routiers paient la taxe, mais la lourdeur d'une telle procédure, jumelée au fait que la plupart

des autoroutes nord-américaines sont en fait payées par toute la société, nous ont fait opter pour la solution ici utilisée.

Il serait par contre intéressant, dans de futures recherches, de réintroduire de telles variables pour voir leurs effets dans ce modèle. Il pourrait également être intéressant, dans des recherches prochaines, d'aborder le problème d'un point de vue dynamique, en faisant varier la qualité de la route dans le temps.

ANNEXE

Tableau 2 : Effets de la variation du prix de la qualité

Variation du prix de la qualité (P)				Nombre d'utilisateurs	Variation du nombre d'utilisateurs	Taxe	Variation de la taxe
Prix	Variation du prix	Qualité	Variation de la qualité				
2		0,380711		0,558376		0,761421	
2,02	1,00%	0,371537	-2,41%	0,555874	-0,45%	0,75051	-1,43%
2,1	5,00%	0,338135	-11,18%	0,546764	-2,08%	0,710083	-6,74%
2,2	10,00%	0,302639	-20,51%	0,537083	-3,81%	0,665806	-12,56%
2,2106	10,53%	0,299224	-21,40%	0,536152	-3,98%	0,66146	-13,13%
2,4	20,00%	0,247133	-35,09%	0,521945	-6,52%	0,59312	-22,10%
2,6	30,00%	0,206055	-45,88%	0,510742	-8,53%	0,535744	-29,64%
2,8	40,00%	0,174695	-54,11%	0,50219	-10,06%	0,489146	-35,76%
3	50,00%	0,15015	-60,56%	0,495495	-11,26%	0,45045	-40,84%
3,2	60,00%	0,130544	-65,71%	0,490148	-12,22%	0,41774	-45,14%
3,4	70,00%	0,114612	-69,90%	0,485803	-13,00%	0,389682	-48,82%
3,6	80,00%	0,101478	-73,35%	0,482221	-13,64%	0,365319	-52,02%
3,8	90,00%	0,0905119	-76,23%	0,479231	-14,17%	0,343945	-54,83%
4	100,00%	0,0812568	-78,66%	0,476706	-14,63%	0,325027	-57,31%

Effets de la variation du prix des matériaux de construction

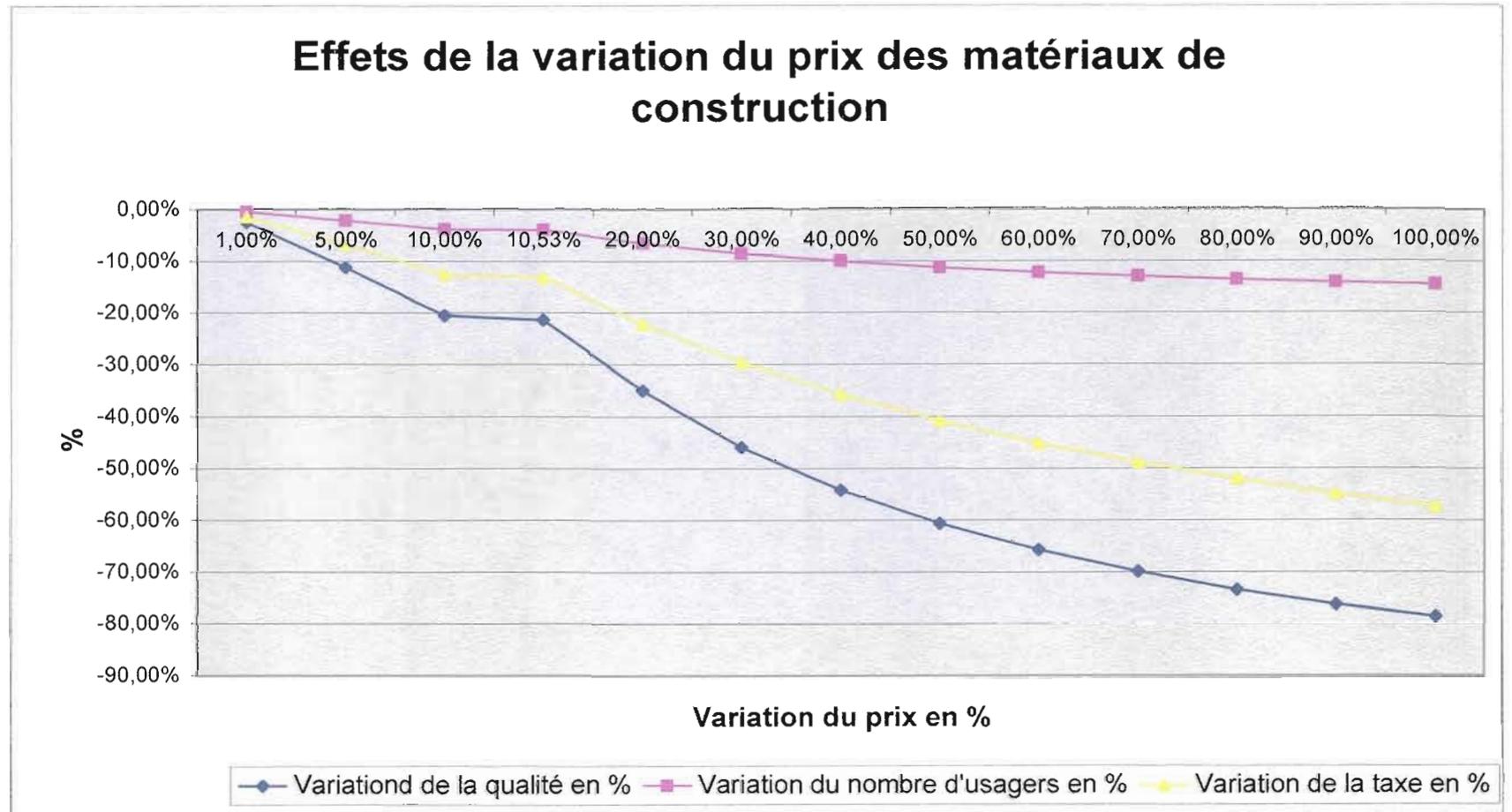


Figure 7 : Effets de la variation du prix de la qualité

Tableau 3 : Effets de la variation du paramètre α

Variation du paramètre α							
α	Variation de α	Qualité	Variation de la qualité	Nombre d'utilisateurs	Variation du nombre d'utilisateurs	Taxe	Variation de la taxe
0,3		0,380711		0,558376		0,761421	
0,303	1,00%	0,386291	1,47%	0,560951	0,46%	0,77258	1,47%
0,315	5,00%	0,40933	7,52%	0,571763	2,40%	0,81866	7,52%
0,33	10,00%	0,439883	15,54%	0,58651	5,04%	0,879765	15,54%
0,36	20,00%	0,507901	33,41%	0,620767	11,17%	1,0158	33,41%
0,39	30,00%	0,587526	54,32%	0,66285	18,71%	1,17505	54,32%
0,42	40,00%	0,682705	79,32%	0,715215	28,09%	1,36541	79,32%
0,45	50,00%	0,79929	109,95%	0,781528	39,96%	1,59858	109,95%
0,48	60,00%	0,946372	148,58%	0,867508	55,36%	1,89274	148,58%
0,51	70,00%	1,1389	199,15%	0,982582	75,97%	2,2778	199,15%

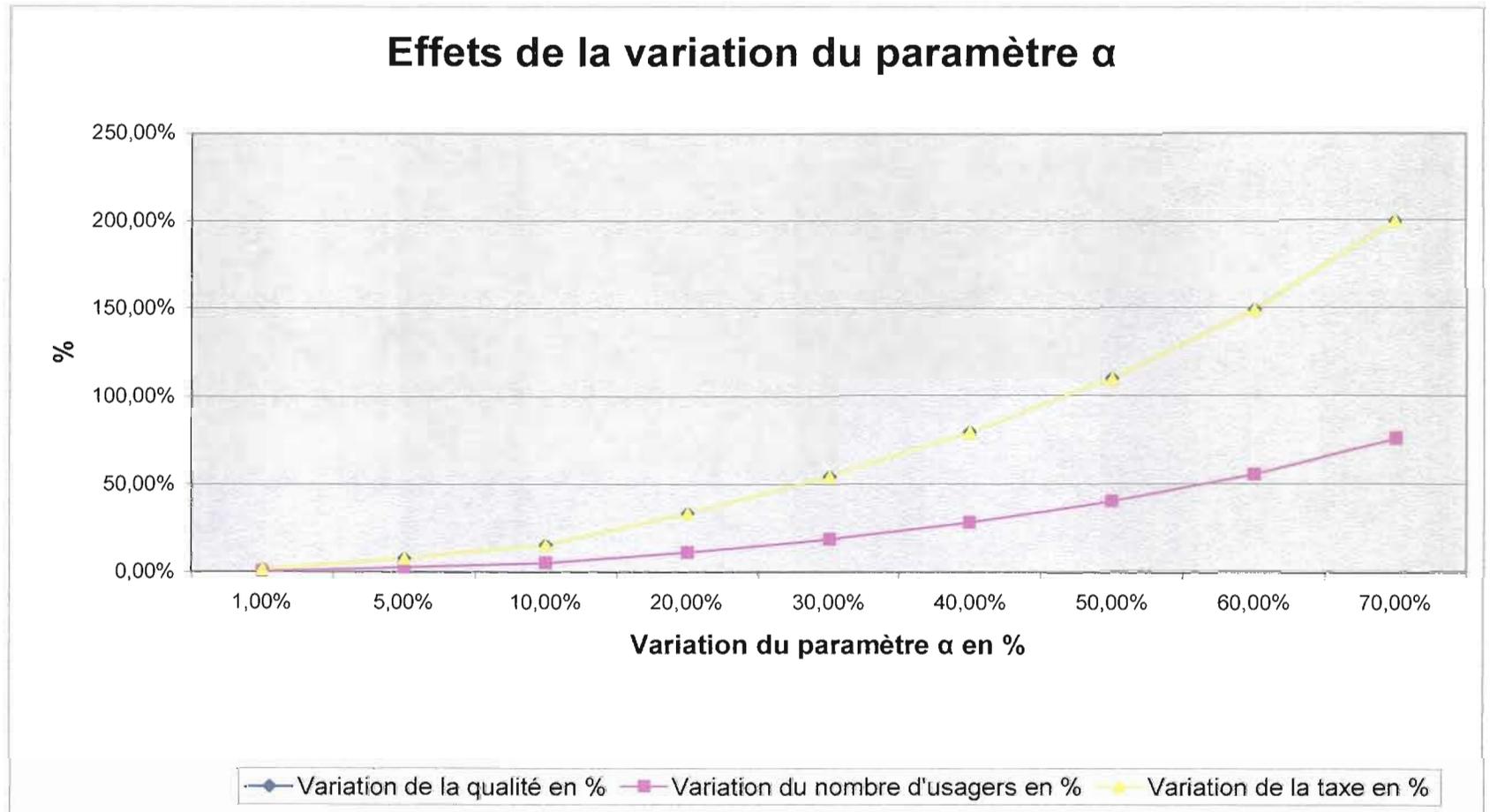


Figure 8 : Effets de la variation du paramètre α

Tableau 4 : Effets de la variation du paramètre β

<u>Variation du paramètre β</u>			Variation de la	Nombre	Variation du nombre	Taxe	Variation de la
β	Variation de β	Qualité	qualité	d'utilisateurs	d'utilisateurs		taxe
0,1		0,380711		0,558376		0,761421	
0,101	1,00%	0,376091	-1,21%	0,557116	-0,23%	0,75218	-1,21%
0,105	5,00%	0,35868	-5,79%	0,552367	-1,08%	0,71736	-5,79%
0,11	10,00%	0,33906	-10,94%	0,547016	-2,03%	0,678119	-10,94%
0,12	20,00%	0,305623	-19,72%	0,537897	-3,67%	0,611247	-19,72%
0,13	30,00%	0,27819	-26,93%	0,530415	-5,01%	0,55638	-26,93%
0,14	40,00%	0,255276	-32,95%	0,524166	-6,13%	0,510551	-32,95%
0,15	50,00%	0,235849	-38,05%	0,518868	-7,08%	0,471698	-38,05%
0,16	60,00%	0,21917	-42,43%	0,514319	-7,89%	0,43834	-42,43%
0,17	70,00%	0,204694	-46,23%	0,510371	-8,60%	0,409389	-46,23%
0,18	80,00%	0,192012	-49,56%	0,506912	-9,22%	0,384025	-49,56%
0,19	90,00%	0,18081	-52,51%	0,503857	-9,76%	0,36162	-52,51%
0,2	100,00%	0,170843	-55,13%	0,501139	-10,25%	0,341686	-55,13%

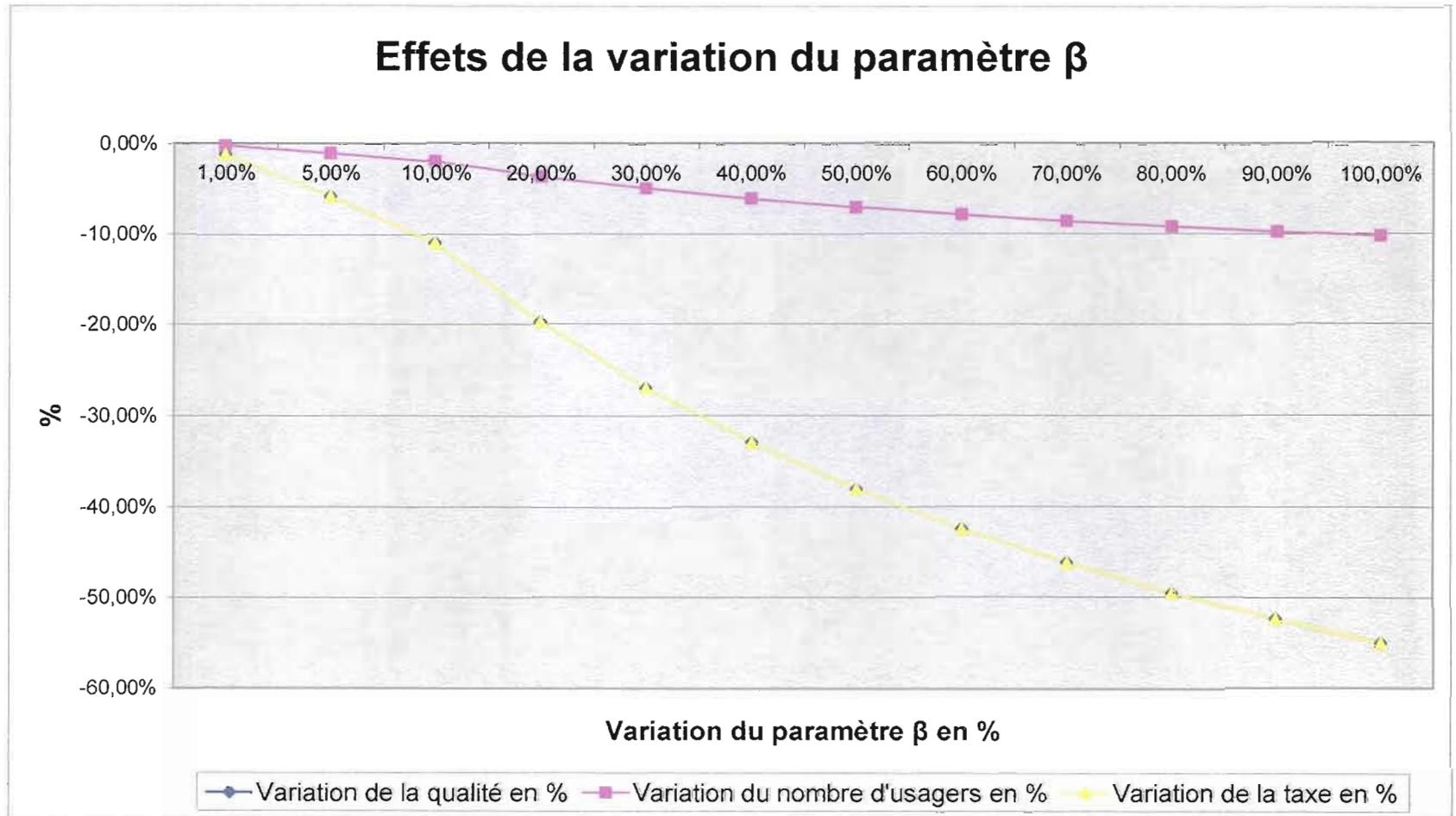


Figure 9 : Effets de la variation du paramètre β

Tableau 5 : Effets de la variation du paramètre σ

Variation du paramètre σ							
σ	Variation de σ	Qualité	Variation de la qualité	Nombre d'utilisateurs	Variation du nombre d'utilisateurs	Taxe	Variation de la taxe
0,1		0,380711		0,558376		0,761421	
0,101	1,00%	0,379862	-0,22%	0,557637	-0,13%	0,75972	-0,22%
0,105	5,00%	0,376497	-1,11%	0,554705	-0,66%	0,752993	-1,11%
0,11	10,00%	0,372356	-2,19%	0,551087	-1,31%	0,744713	-2,19%
0,12	20,00%	0,36429	-4,31%	0,544006	-2,57%	0,72858	-4,31%
0,13	30,00%	0,356498	-6,36%	0,537123	-3,81%	0,712996	-6,36%
0,14	40,00%	0,348967	-8,34%	0,53043	-5,00%	0,697934	-8,34%
0,15	50,00%	0,341686	-10,25%	0,523918	-6,17%	0,683371	-10,25%
0,16	60,00%	0,334642	-12,10%	0,51758	-7,31%	0,669284	-12,10%
0,17	70,00%	0,327826	-13,89%	0,511408	-8,41%	0,655652	-13,89%
0,18	80,00%	0,321227	-15,62%	0,505397	-9,49%	0,642453	-15,62%
0,19	90,00%	0,314835	-17,30%	0,499538	-10,54%	0,62967	-17,30%
0,2	100,00%	0,308642	-18,93%	0,493827	-11,56%	0,617284	-18,93%

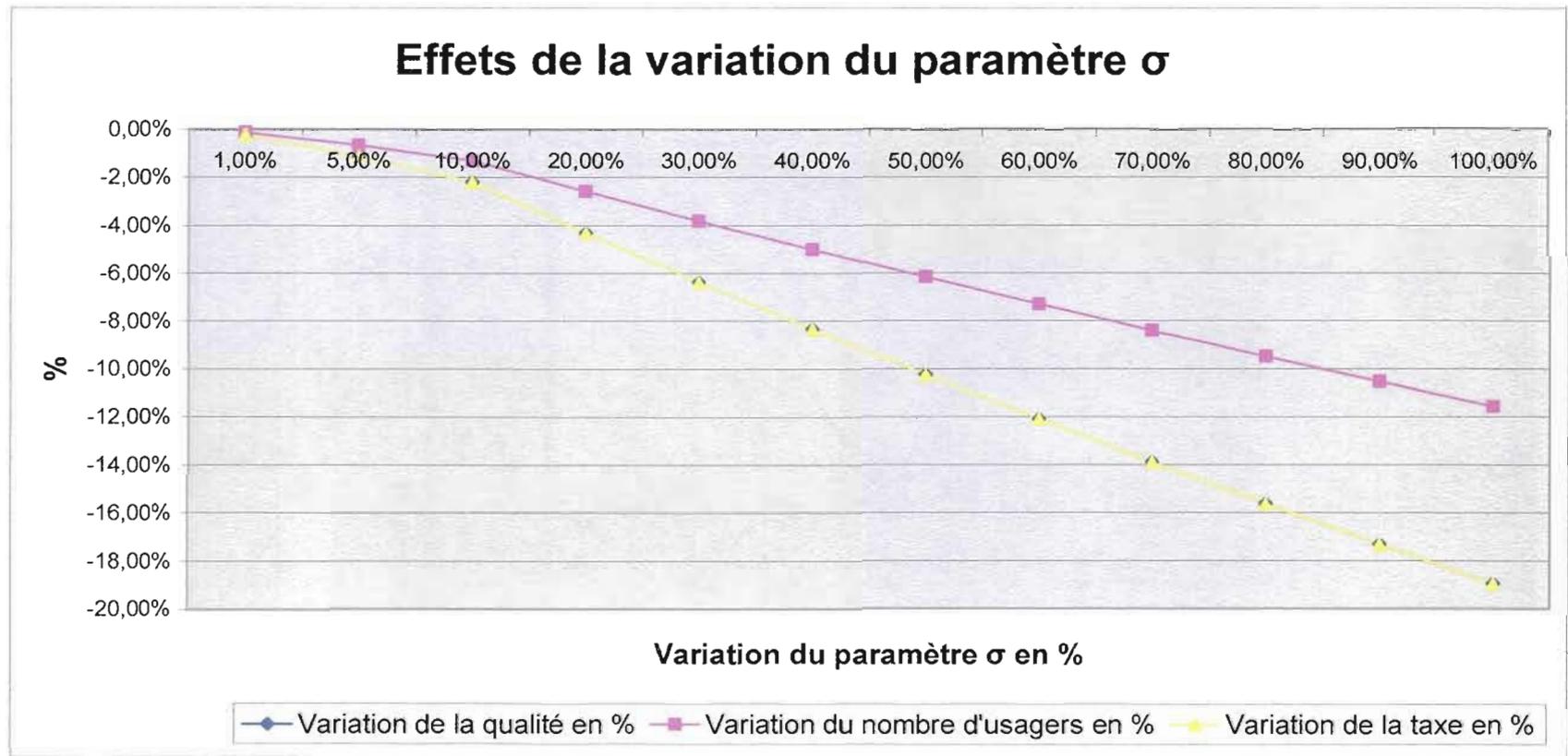


Figure 10 : Effets de la variation du paramètre σ

BIBLIOGRAPHIE

Barnes, Langworthy (2003). « The Per-Mile Cost of Operating Automobiles and Trucks ». Minnesota Department of Transportation.

DeSerpa, A.C. (1971). «A Theory of the Economics of Time». Economic Journal, Vol. 81, p. 828-846.

Haider, Murtaza; Mirza, Saeed (2003). «L'état des infrastructures au Canada : Répercussions sur la planification et la politique en matière d'infrastructures». Infrastructures Canada. P. 2

Johnson, Bruce (1964). «On the Economics of Road Congestion». Econometrica, Vol. 32, No. 1. p.137-150.

Mas-Collel, Andreu; Whinston, Micheal; Green, Jerry (2004). «Microeconomic Theory». Oxford University Press, New York. P. 827

Meiburg, Charles (1963). «An Economic Analysis of Highway Services». The Quaterly Journal of Economics, Vol. 77, No. 4, p. 648-656.

National Research Concil (U.S) Transportation Research Board. Committee on Highway Capacity (1965). «Highway Capacity Manual». 411 pages.

Newbery, David (1988). «Road Damage Externalities and Road User Charges». Econometrica, Vol. 56, No. 2, p.295-316.

O'Dea, W.P. (1994). «The Value of a Travel Time Saving to an Individual». International Journal of Transport Economics, Vol. 21, No. 3, p.256-267.

Pline, James (1992). «Traffic Engineering Handbook». Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 481 pages.

Porter, Richard (1999). «Economics at the Wheel : The Costs of Cars and Drivers». Academic Press, San Diego. 258 pages.

Rotemberg, Julio (1985). «The Efficiency of Equilibrium Traffic Flows». Journal of Public Economics, Vol. 26, p. 192-205.

Rosen, Dahlby, Smith, Boothe (2003). «Public Finance in Canada». McGraw-Hill Ryerson. Toronto. P.93.

Simon, Carl; Blume, Lawrence (2002). «Mathématiques pour économistes»; troisième édition, Collection Ouvertures Économiques; Paris; De Boeck Université; p. 703-704.

Transports Canada; 2004; *Enquête sur les véhicules au Canada*; No de catalogue 53-223-XIF; Statistique Canada; page 21.

Transports Canada; 2000; *Enquête sur les véhicules au Canada*; No de catalogue 53-223-XIF; Statistique Canada; page 1-4.

Varian, Hal (2000). «Introduction à la microéconomie». De Boeck, Paris. P. 566.

Walters, A.A. (1961). «The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion». *Econometrica*, Vol. 29, No 4, p.676-699.

Winston, Clifford (1985). « Conceptual Developments in the Economics of Transportation : An Interpretive Survey ». *Journal of Economic Literature*, Vol.23, No 1, p. 57-94.

Wright, Paul; Dixon, Karen (2004). «Highway Engineering». John Wiley, Hoboken, New Jersey. 677 pages.