

UNIVERSITE MONTPELLIER I

FACULTE DES SCIENCES ECONOMIQUES

Ecole Doctorale « ECONOMIE GESTION »

*Equipe d'accueil : **LASER-CREDEN***

LA TARIFICATION DE LA CONGESTION AUTOMOBILE:
ACCEPTABILITE SOCIALE ET
REDISTRIBUTION DES RECETTES DU PEAGE

THESE POUR LE DOCTORAT

ès Sciences Economiques

Formation Doctorale :

ANALYSE ET POLITIQUE ECONOMIQUE

Groupe des Disciplines du CNU : Sciences Economiques

Section 05

Par

Mathias REYMOND

Jury :

- **Monsieur Yves CROZET**, Professeur à l'Université Lyon II (Rapporteur)
- **Monsieur François MIRABEL**, Maître de Conférence à l'Université Montpellier I
- **Monsieur Jean-Pierre ORFEUIL**, Professeur à l'Université Paris XII
- **Monsieur Jacques PERCEBOIS**, Professeur à l'Université Montpellier I (Directeur)
- **Monsieur Gonzague PILLET**, Professeur aux universités de Fribourg et Genève (Rapporteur)

7 Décembre 2005

"La Faculté n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propre à leur auteur."

"Si je savais une chose utile à ma nation qui fût ruineuse à une autre, je ne la proposerais pas à mon prince, parce que je suis homme avant d'être Français, ou bien parce que je suis nécessairement homme et que je ne suis Français que par hasard. (...) Si je savais quelque chose utile à ma patrie, et qui fût préjudiciable à l'Europe, ou bien qui fût utile à l'Europe et préjudiciable au genre humain, je la regarderais comme un crime."

- MONTESQUIEU (L'Esprit des Lois) -

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à l'Office Fédéral des ROUtes Suisse (OFROU/ASTRA) pour le soutien financier qui m'a été alloué et m'a permis de réaliser ce travail.

Je remercie vivement M. le Professeur Jacques PERCEBOIS pour le suivi et l'encadrement de mon travail, pour ses nombreux conseils et remarques durant la rédaction de la thèse. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour le caractère formateur et constructif de sa direction.

J'adresse mes plus vifs remerciements à M. le Professeur Yves CROZET de l'Université de Lyon II et à M. le Professeur Gonzague PILLET de l'Université de Fribourg et de l'Université de Genève d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse et d'en être les rapporteurs. Je remercie également M. le Maître de Conférence François MIRABEL de l'Université de Montpellier I ainsi que M. Jean-Pierre ORFEUIL, Professeur à l'Université de Paris XII d'avoir bien voulu faire partie du jury.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance pour l'accueil et les conditions de travail dont j'ai bénéficié au Centre de Recherche en Economie et Droit de l'ENergie (LASER – CREDEN). Que tous les membres du laboratoire de recherche soient cordialement remerciés pour le soutien et les encouragements qu'ils m'ont prodigués. Je remercie tout particulièrement François MIRABEL qui a toujours trouvé le temps de prêter une oreille attentive à mes problèmes théoriques. Mes remerciements vont aussi à Fady HAMADE et Thomas CORTADE pour les discussions enrichissantes que nous avons eues.

Je désire également exprimer toute ma gratitude à l'équipe du Centre de Recherche en Urbistique de Martigny (CREM), qui lors de mes nombreux voyages en Suisse a toujours su m'accueillir avec une grande hospitalité. Je remercie tout particulièrement MM. Christophe MATAS et Jean-Marc REVAZ.

Je tiens à remercier les différents correcteurs de cette thèse, ainsi que tous ceux, trop nombreux à citer ici, qui m'ont soutenus moralement durant cette période.

Merci à Nathalie REY pour sa patience et pour la relecture attentive de mon travail...

SOMMAIRE

PARTIE I : DE LA CONGESTION AUTOMOBILE A LA TARIFICATION : LES FONDEMENTS THEORIQUES DU PEAGE URBAIN

Chapitre I : Congestion automobile et externalités négatives : quelles politiques d'internalisation ?

Chapitre II : La tarification de la congestion par le péage : une revue de la littérature

PARTIE II : TARIFICATION DE LA CONGESTION ET REPARTITION MODALE : LA REDISTRIBUTION DES RECETTES DU PEAGE

Chapitre III : La tarification de la congestion et la redistribution des recettes vers les transports collectifs

Chapitre IV : La tarification de la congestion et l'affectation des recettes du péage vers deux programmes

PARTIE III : L' ACCEPTABILITE DU PEAGE DE CONGESTION : EXPERIENCES ET ENQUETES

Chapitre V : Les expériences de péage de congestion dans le monde

Chapitre VI : L'acceptabilité du péage de congestion : résultats et analyse de l'enquête réalisée en Suisse Romande

INTRODUCTION GENERALE

"Se déplacer n'est pas seulement un moyen d'accéder à une activité, à un lieu, à une fonction. C'est aussi un temps et une activité spécifique qui a ses qualités propres." (F. ASCHER, 2000)¹ Si les citoyens utilisent plusieurs modes de transport afin d'assurer leurs déplacements en ville, l'automobile reste de loin le préféré des français (80% des ménages possèdent au moins une voiture). La marche à pied et les véhicules à deux roues motorisés ou non, n'ont qu'une place secondaire dans les déplacements urbains. En parallèle avec ces modes individuels de déplacement, les usagers utilisent également les transports collectifs. En Europe, la croissance de l'offre de transports collectifs dans les années soixante-dix s'est accompagnée d'une croissance à peu près équivalente de l'usage, avec souvent quelques années de décalage liées au temps nécessaire à la réorganisation des habitudes et activités. Parmi les transports collectifs, l'autobus est le mode le plus courant. Circulant en site banal (empruntant la voie publique), il témoigne d'un inconvénient majeur puisque sa vitesse commerciale dépend de la rigidité de la circulation. C'est pour cette raison que sont créés des sites propres (voies réservées). A ce sujet, le transport collectif ferroviaire urbain (métro, trains de banlieue, tramway) est également omniprésent dans les plus grandes agglomérations du monde.

1. L'utilisation croissante de l'automobile

Dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons à la congestion automobile en milieu urbain. Les autres modes de transports présentés ci-dessus – et particulièrement les transports en commun – ne sont évoqués que comme des alternatives à l'automobile. Il est donc considéré ici qu'il n'existe pas de congestion pour ces autres modes de déplacement.

L'accroissement des phénomènes d'encombrement dans les grandes villes est inévitablement lié à l'évolution du parc automobile dans le monde. L'augmentation du nombre de voitures par ménage, accompagnée d'activités diverses nécessitant l'usage d'un véhicule, entraîne une amplification de la circulation automobile. Ainsi le tableau 1 et la

¹ Les bibliographies de chaque partie se trouvent en fin de partie. La bibliographie de l'introduction est située à la fin de la Partie I.

figure 1 reviennent sur l'évolution du nombre de voitures et de véhicules utilitaires pour 1 000 habitants dans différents pays du monde.

| <i>Nombre de voitures et de véhicules utilitaires</i> | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>(de fonction) pour 1000 habitants au 1er</i> | 1985 | 1990 | 1995 | 2001 | 2002 | 2003 |
| <i>janvier</i> | | | | | | |
| Union Européenne² | 380 | 454 | 473 | 551 | 560 | 568 |
| Allemagne | 450 | 512 | 529 | 577 | 580 | 583 |
| Belgique | 363 | 419 | 463 | 513 | 520 | 523 |
| Espagne | 276 | 403 | 430 | 543 | 554 | 562 |
| France | 446 | 495 | 520 | 574 | 585 | 587 |
| Italie | 412 | 507 | 541 | 629 | 638 | 656 |
| Royaume-uni | 379 | 454 | 474 | 526 | 536 | 554 |
| Suède | 400 | 455 | 445 | 495 | 502 | 503 |
| Pologne | 117 | 160 | 229 | 310 | 325 | 344 |
| Turquie | 27 | 37 | 65 | 90 | 89 | 89 |
| Canada | 559 | 617 | 562 | 571 | 572 | 584 |
| Etats-unis | 708 | 752 | 759 | 787 | 785 | 775 |
| Corée du sud | 25 | 71 | 177 | 255 | 273 | 294 |
| Japon | 375 | 456 | 527 | 573 | 576 | 580 |
| Argentine | 173 | 180 | 167 | 180 | 190 | 183 |
| Brésil | 86 | 87 | 89 | 115 | 117 | 118 |
| Chine | 3 | 5 | 8 | 12 | 12 | 14 |
| Inde | 3 | 5 | 6 | 8 | 8 | 8 |

Tableau 1 : Densité automobile par pays (Source : CCFA, Comité des Constructeurs Français d'Automobiles, <http://www.ccfa.fr/tab/mu1.htm>).

En fonction de caractéristiques culturelles, géographiques et politiques, les évolutions des densités automobiles varient significativement d'un pays à l'autre. Dans un premier temps, on constate qu'il existe deux groupes distincts dans les pays riches et industrialisés. Le premier regroupe le Japon et les pays de l'Union Européenne des 15 qui

² A partir de 1995, l'Union Européenne comprend 15 pays.

voient leur densité croître régulièrement depuis 18 ans. Certains comme l'Espagne, dont le niveau de vie était plus faible que dans les autres pays de l'Europe, ont rattrapé leur retard en passant de 276 véhicules pour 1 000 habitants en 1985 à 562 en 2003³. Ceci est dû à l'essor économique du pays dans les années 90. Le cas de la Belgique est différent puisque le pays est plus urbanisé, ainsi la densité automobile est passée de 363 en 1985 à 523 en 2003. D'autres pays, déjà préoccupés par la place prépondérante de l'automobile en ville comme la Suède, ont accru leur densité automobile de façon plus maîtrisée (passant de 400 en 1985 à 503 en 2003). Le deuxième groupe de pays riches concerne les Etats-Unis et le Canada, qui, après avoir connu une densité automobile croissante dans les années 80-90 (avec un point culminant aux Etats-Unis de 787 voitures pour 1000 habitants en 2001), l'ont réduite et stabilisée à partir du milieu des années 2000 pour les Etats-Unis et 90 pour le Canada.

Par ailleurs, la tranche la plus riche des pays en voie de développement et des ex-pays de l'Union Soviétique a fortement accru sa densité automobile. De 1985 à 2003, elle a triplé pour l'Inde, la Pologne et la Turquie, quintuplé pour la Chine et a été multipliée par douze pour la Corée du Sud. D'autres pays, comme en Amérique Latine n'ont que faiblement augmenté leur densité automobile.

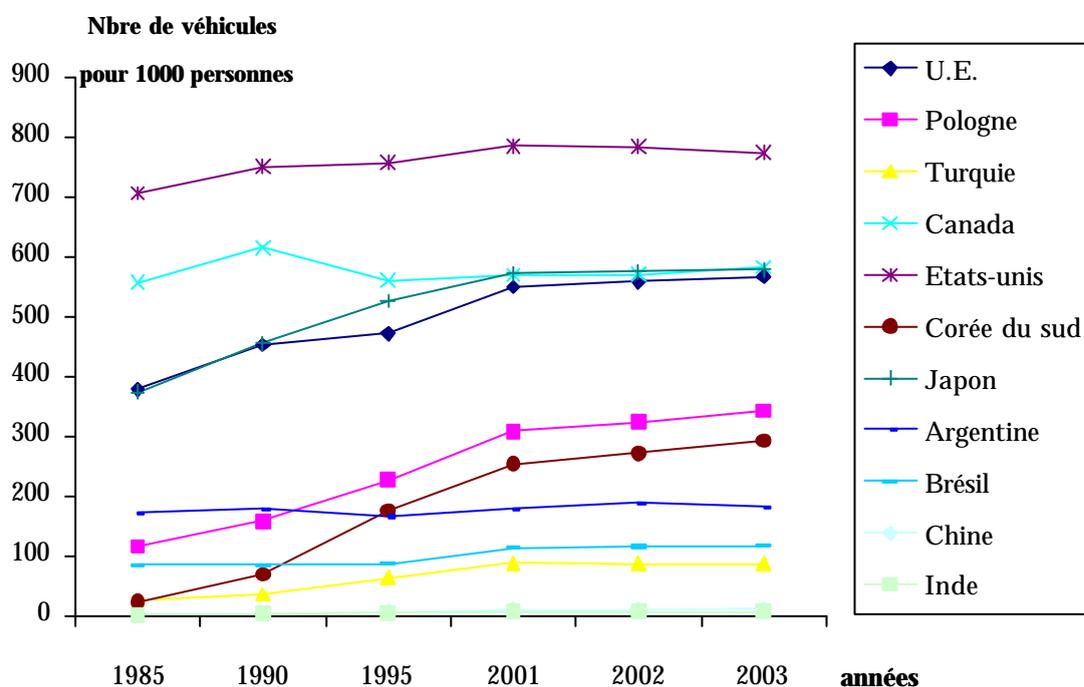


Figure 1 : Evolution des densités automobiles entre 1985 et 2003

³ Comme il est indiqué sur le tableau, la moyenne européenne est de 568 véhicules.

A ce sujet, J. P. ORFEUIL (2001, p. 194) souligne que les modèles de prévision de parc automobile "établissent en effet une relation entre le niveau de richesse des pays et le taux d'équipement : aux niveaux de revenu très faibles, les croissances sont lentes. (...) Au-delà d'un certain niveau, la croissance « s'emballe », le taux de motorisation croît plus vite que la richesse avec l'expansion d'une couche moyenne, avant de ralentir à mesure qu'on s'approche des niveaux de saturation."

2. Le comportement des individus

L'intensification des déplacements dans les villes résulte de transformations sociales, économiques et géographiques : l'apparition des femmes sur le marché du travail, l'essor du temps libre, l'étalement des surfaces urbanisées, une plus grande liberté des citoyens, pour ne citer que quelques exemples. Les mobilités participent alors à la production de nouvelles formes urbaines, de plus en plus étendues et les déplacements urbains s'effectuent dans des zones de moins en moins denses ; ils sont diversifiés, aléatoires, changeants (S. ALLEMAND, 2001)⁴. Concernant les pays occidentaux, la tendance risque d'aller dans le sens du « tout-automobile ». D'ailleurs, comme le précise M. H. MASSOT (2003, p. 20) : "En 2020, le trafic de la mobilité locale va augmenter de 40 à 50 % en termes de distance : aujourd'hui, ce n'est plus tant le nombre de déplacements qui importe mais le nombre de kilomètres parcourus." Et d'ajouter que "la voiture gagnera encore des parts de marché, passant de 86 % actuellement à 90 % en 2020."

V. KAUFMANN (2003, p. 10) le rappelle : "L'automobile est le moyen de transport qui ancre profondément la mobilité dans les modes de vie." En effet, elle est souvent plus efficace que les transports collectifs en terme de gain de temps, elle est plus flexible et offre une accessibilité complète à l'ensemble du territoire. Ainsi, l'usage quotidien de l'automobile dans les grandes villes entraîne des comportements similaires.

Nous distinguons d'une part les *déplacements obligatoires* (domicile-travail ou domicile-étude), qui coïncident avec des horaires fixes, et d'autre part les *déplacements volontaires* (achats, visites, loisirs) dont les horaires sont modulables. Ainsi, du fait des horaires fixes et selon les pays, il existe deux fortes périodes de pointe sur le réseau routier urbain en début de matinée (de 7h à 9h) et en fin d'après-midi (de 16h à 19h) ; et une période de pointe relative entre midi et 14 heures.

⁴ Voir "Les enjeux des mobilités quotidiennes", *Sciences Humaines*, n° 117, pp. 46-51.

Dans une étude (X. CHU, 1999) portant sur 641 voyageurs, on obtient une distribution caractéristique des horaires de commencement du travail (figure 2), influant donc sur les déplacements urbains en général et sur la circulation automobile en particulier.

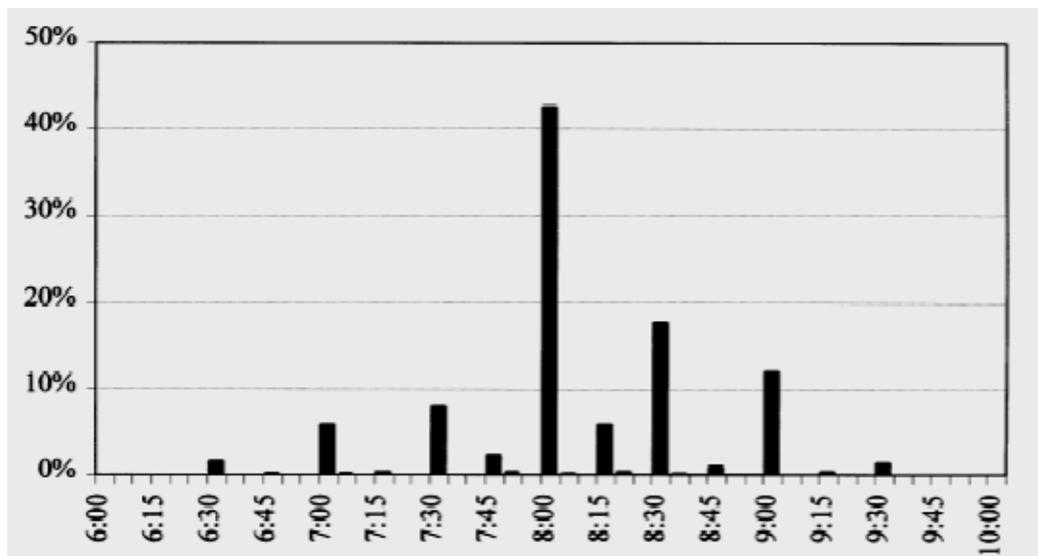


Figure 2 : Distribution des horaires de début du travail (Source : X. CHU, p.702, 1999)

3. Instruments de régulation et choix du péage de congestion

Cette concentration temporelle du trafic génère des gaspillages excessifs dans l'espace urbain : perte de temps, gaspillage de l'énergie, dégradation de l'environnement, usure des infrastructures. Afin de réguler la circulation automobile et de contrôler au mieux la congestion, les pouvoirs publics peuvent utiliser différents instruments de politique publique comme la règle, la norme ou la tarification. Dans notre travail, nous considérons, après avoir évoqué les différents instruments tarifaires, que le péage de congestion (*congestion pricing*)⁵ est, dans un certain contexte et selon plusieurs critères, le meilleur instrument de régulation de la circulation automobile. En effet, la tarification des infrastructures routières au coût marginal social permet d'obtenir l'optimum social en

⁵ La traduction littérale de "*congestion pricing*" est "*tarification de la congestion*". Nous employons le terme de "*péage de congestion*" afin de définir le choix de "*faire payer les responsables de la congestion automobile*". A ce sujet, P. H. DERYCKE préfère utiliser l'appellation "*péage de **dé**congestion*" puisque "*l'objectif poursuivi est d'abaisser le degré de congestion, bref de **dé**congestionner*" (1997, p. 92). Dans le cadre de notre thèse, sauf indication contraire, il s'agit de congestion urbaine. Ainsi, l'expression "*péage urbain*" - traduction littérale de "*urban toll*" - est parfois utilisée.

modifiant les comportements des automobilistes : *"c'est en orientant les choix des agents vers plus d'efficacité pour la collectivité que les ressources rares des espaces urbains (temps, espace, air, carburant...) pourront alors être préservées..."* (F. MIRABEL, 1996, p. 580) Un péage de pointe, variant dans le temps en fonction du niveau de la circulation, permet de répartir de façon optimale les départs du domicile vers le lieu de travail et de réduire les effets externes de la congestion automobile.

4. Cadre théorique et choix méthodologiques

La perspective de ce travail est de mettre en lumière les politiques publiques permettant d'obtenir l'optimum social. Le développement de cette thèse s'inscrit dans le cadre de la théorie de l'économie du bien-être. On peut déterminer que le comportement rationnel des individus (ici, des automobilistes) entraîne un équilibre général concurrentiel synonyme d'équilibre unique et stable vers lequel tend l'économie. L'optimum de Pareto est une situation optimale pour la collectivité lorsque l'on ne peut plus améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'un autre individu au moins. Sous certaines conditions, tout équilibre général concurrentiel est un optimum de Pareto. Ainsi, une *"main invisible"* permettrait d'orienter les comportements des individus vers un point d'équilibre équivalent à l'optimum social. Ce positionnement en faveur de la concurrence pure et parfaite est remis en cause lorsque certaines interdépendances entre les agents économiques ne sont pas prises en considération par le marché. Ainsi, lorsque le comportement rationnel des automobilistes génère des effets externes (ou externalités) négatifs, les coûts privés de déplacement ne représentent pas les coûts sociaux de la collectivité. Ces coûts externes créent des distorsions de marché nécessitant des politiques d'internalisation. De ce fait, ceci justifie l'intervention des pouvoirs publics *"pour corriger les défaillances du marché et restaurer l'optimum social en orientant les choix des individus vers plus d'efficacité pour la société"* (F. MIRABEL, 1996, p. 576). La tarification de la congestion par le péage apparaît donc comme un instrument de politique publique idéal *"dans la mesure où elle peut agir sur toutes les dimensions des comportements de déplacement sur les routes, sans exclusion d'activité ou de technologie particulière."* (A. DE PALMA et R. LINDSEY, 2005, pp. 38-39)

Au niveau des choix méthodologiques, les observations empiriques apparaissent insuffisantes pour statuer sur l'efficacité des politiques publiques mises en place dans les transports urbains. La modélisation et l'appareil mathématique peuvent permettre d'aller plus loin dans la compréhension de l'organisation des transports urbains et dans les choix des politiques publiques mises en place pour réguler la circulation automobile. Dans une

approche microéconomique néoclassique, on suppose que l'on peut remplacer le comportement de tous les individus par le comportement type d'un "*homo-oeconomicus*" qui serait rationnel dans ses déplacements domicile-travail. Cette hypothèse simplificatrice ne tient pas compte des automobilistes qui ont des comportements marginaux et qui influencent peu le niveau du trafic (travailleurs de nuit, chercheurs d'emploi, travailleurs ayants des horaires flexibles...). Ainsi avec des modélisations mathématiques et en s'inspirant des modèles de files d'attente d'ARNOTT et al. (1990a, 1993), nous tentons d'apporter des éléments de réponse aux problématiques énoncées ci-dessous. Dans un cadre empirique, nous procédons également à une enquête et analysons les données à l'aide d'une analyse des correspondances multiples, instrument statistique permettant de regrouper des individus autour de plusieurs modalités.

5. Problématique

Le péage de congestion, appelé communément péage urbain, pâtit de l'hostilité des automobilistes affaiblissant son acceptation collective. Discriminant pour certains, il est perçu comme un instrument excluant de l'usage de l'automobile certaines tranches défavorisées de la population. Il porte également atteinte à la liberté de déplacement des individus, qui ont le sentiment de payer quelque chose qui leur était initialement dû.

Cette faible acceptabilité pose le problème de la mise en place de péages de congestion dans les grandes villes en proie à de phénomènes croissants d'encombrement. Au vu de ce constat, il convient de s'interroger sur les politiques d'accompagnement au péage à mettre en place par les pouvoirs publics. Et si l'on considère que le choix de redistribuer les recettes du péage vers le secteur des transports, et non vers le budget global, rendrait plus acceptable le péage de congestion, quel plan de redistribution des recettes les pouvoirs publics peuvent-ils mettre en œuvre pour justifier ces politiques d'accompagnement ?

Nous allons établir de manière analytique qu'une affectation des recettes du péage vers les transports collectifs et vers le budget de la collectivité permettrait d'accroître l'acceptation publique du péage. Pour ce faire, il convient de fixer le prix du billet des transports en commun au coût moyen. Lorsque les recettes sont orientées vers les automobilistes (développement des infrastructures routières), le coût total de la collectivité s'accroît et le nombre d'automobilistes augmente, générant ainsi une amplification des externalités environnementales. Nous allons voir que le choix politique

d'appuyer le développement des transports collectifs est nettement soutenu par les citoyens – automobilistes ou non.

6. Structure de la thèse et présentation du plan

Afin de construire une réponse claire aux questions posées, nous avons articulé notre thèse en trois parties, chacune scindée en deux chapitres. Si la partie I est plutôt introductive, elle permet surtout de poser le cadre théorique sur lequel nous allons nous appuyer. Dans la partie II, à l'aide de modélisations mathématiques et dans un cadre de choix de mode de transport différencié (automobile *versus* transports collectifs publics), nous déterminons les politiques optimales de redistribution des recettes du péage. La partie III propose des résultats concrets à nos avancées théoriques.

La partie I revient dans un premier temps sur les fondements théoriques de l'externalité et sur les différentes politiques d'internalisation de la congestion (Chapitre I). La définition de la congestion automobile demeure à l'heure actuelle problématique et il semble nécessaire de revenir sur les différents débats qui animent cette notion afin de bien préciser le cadre de notre recherche. Si le péage de congestion est la politique de régulation choisie ici pour infléchir le niveau de congestion, nous ne souhaitons pas faire l'impasse sur les nombreux autres instruments qui s'offrent aux pouvoirs publics. Dans le cadre d'une revue de la littérature (Chapitre II), nous faisons ensuite le point sur les différents modèles fondateurs de la tarification de la congestion en insistant sur les modèles de files d'attente, pierre angulaire de notre partie II. Ce chapitre a pour but de présenter différentes approches de la tarification de la congestion par le péage. Notre revue de la littérature s'étend des travaux initiaux de A. PIGOU sur le péage jusqu'aux récents modèles de tarification de second rang avec voiries alternatives.

Dans la seconde partie, nous pénétrons au cœur de la problématique qui anime notre thèse. Nous présentons, d'une part, un modèle simple de péage urbain avec répartition modale où les recettes du péage sont intégralement reversées vers les transports collectifs (Chapitre III). Dans ce cas les autorités publiques peuvent décider de plusieurs formes de tarification de la route (péage de pointe, péage uniforme) et des transports en commun (prix du billet au coût marginal ou au coût moyen). Nous affinons ensuite le modèle (Chapitre IV) en considérant que les recettes peuvent être affectées vers deux programmes : les transports collectifs et le budget général (section 1) et vers les automobilistes et le budget général (section 2). Dans ce chapitre nous comparons également les différentes modalités de redistribution des recettes et déterminons celle qui permettrait d'obtenir la meilleure acceptabilité. D'après nos résultats, lorsque le prix du

billet des transports en commun est fixé au coût moyen, il existe une affectation optimale des recettes vers les transports collectifs et vers le budget global.

La Partie III est une partie empirique, accompagnant concrètement les travaux théoriques développés au cours de la thèse. Nous revenons dans un premier temps (Chapitre V) sur quatre expériences majeures de tarification des déplacements. Les choix se sont portés vers l'expérience trentenaire de Singapour, considérée comme un modèle de réussite ; vers le récent péage de Londres, articulant deux objectifs de politiques de déplacement : la réduction de la congestion automobile et le développement du réseau des transports collectifs ; vers les "routes de première classe" californiennes ; et vers la tarification kilométrique helvétiques des poids lourds (RPLP). Enfin, le dernier chapitre de la thèse (Chapitre VI), qui s'inscrit dans le cadre d'un travail réalisé en collaboration avec l'Office Fédéral des Routes Suisse et le Centre de Recherche en Urbistique de Martigny (Suisse), présente les résultats d'une enquête effectuée sur la ville de Lausanne et ses environs. Cette enquête porte sur la question de l'acceptabilité du péage et sur les politiques d'accompagnement du péage.

PARTIE I

**DE LA CONGESTION AUTOMOBILE
A LA TARIFICATION :
LES FONDEMENTS THEORIQUES
DU PEAGE URBAIN**

CHAPITRE I

CONGESTION AUTOMOBILE ET EXTERNALITES NEGATIVES : QUELLES POLITIQUES D'INTERNALISATION ?

CHAPITRE I. DE LA CONGESTION AUTOMOBILE A LA TARIFICATION

Introduction

"Longtemps symbole de la chaîne de production, puis de la société de consommation et de sa critique, l'automobile est aussi un symbole de liberté individuelle." (IFEN, 2004, p. 22)

Pour l'usager privé, l'automobile apparaît comme le mode de transport urbain le plus flexible, offrant un service de déplacement "porte à porte", fiable et généralement plus rapide que les transports collectifs. De plus, elle est confortable et assure l'autonomie des usagers. En France, le taux d'occupation des voitures lors des déplacements domicile-travail est généralement faible : 1,2 passagers par voiture, le covoiturage demeure donc une exception.

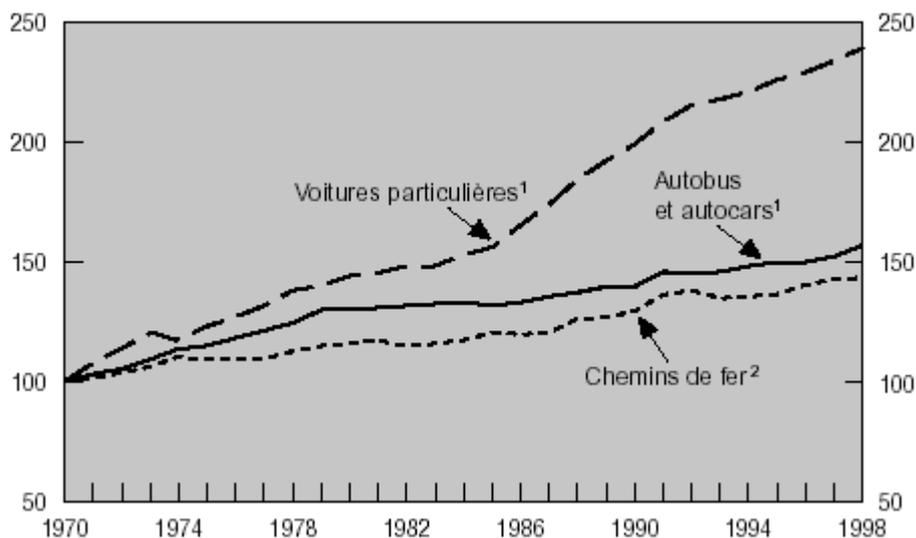
La demande de déplacement automobile tend à s'élever avec la hausse des niveaux de vie ; or la capacité des infrastructures n'a pas été et ne peut pas être ajustée en conséquence.

A titre indicatif, la proportion de ménages possédant au moins une voiture est passée, en France, entre 1975 et 2000, de 64,1 % à 80,3 % (CCFA, 2001). Le volume du parc automobile français est passé de 21 791 000 voitures en 1980 à 35 386 000 en 2003, soit une augmentation de 62% (CCFA, 2004). De plus la voiture familiale a laissé la place à la voiture individuelle : en France, près d'un ménage sur deux est multimotorisé (IFEN, 2004).

Chaque jour, 168 millions de déplacements urbains sont réalisés, dont 107 millions en voiture (soit 64 % des moyens de transport) et 15 millions en transports en commun (soit 9 %). Par ailleurs, près de 70 % des Français ont recours à la voiture tous les jours ou presque, et plus de 90 % au moins une fois par semaine (CCFA, 2001).

Cette omniprésence de l'automobile amène à nous interroger sur les effets externes qu'elle engendre et sur les instruments économiques permettant d'y faire face. Au cours de ce chapitre introductif nous allons revenir sur les définitions théoriques de la congestion, ainsi que sur les débats portant sur les estimations des coûts de congestion (section 1). Dans une seconde section, nous présenterons de façon exhaustive les instruments tarifaires de régulation de la circulation automobile urbaine mis à la disposition des décideurs politiques. Nous mettrons en avant le rôle des pouvoirs publics face aux contraintes de mise en œuvre à prendre en compte (équité, acceptabilité...).

Voyageurs/kilomètre (base 1970 = 100)



1. **16 pays** : Allemagne, Belgique, Suisse, Autriche, Danemark, Espagne, France, Finlande, Grèce, Italie, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Suède, Turquie, Royaume-Uni.

2. **16 pays** : Allemagne, Belgique, Suisse, Autriche, Danemark, Espagne, France, Finlande, Grèce, Italie, Norvège, Pays-Bas, Suède, Turquie, Royaume-Uni, Luxembourg.

Figure 1 : L'évolution des modes de déplacement en Europe sur la période 1970-1998 (CEMT, 2000)

Section 1. Déplacements urbains et congestion automobile

Avant d'introduire les phénomènes de congestion routière automobile et d'aborder les modèles théoriques portant sur la question, il convient d'évoquer les coûts sociaux que fait subir l'automobile à la collectivité (pollution, bruit, accidents...) à partir des données récentes en revenant sur la littérature théorique des externalités.

1.1. Les coûts sociaux de l'automobile

Avant de présenter les différents coûts sociaux engendrés par l'automobile, nous reviendrons sur le concept d'externalité, ainsi que sur certaines définitions proposées dans la littérature économique.

1.1.1. Le concept théorique d'effet externe (ou externalité)

Dans la théorie économique, on parle d'effet externe (ou externalité) lorsque la consommation (ou la production) d'un bien ou d'un service effectuée par un agent économique modifie la fonction d'utilité ou la fonction de production d'un ou de plusieurs agents. D'un point de vue plus global, cette notion d'externalité, mise en évidence par A. MARSHALL⁶, peut se définir comme "*étant une interdépendance entre les agents économiques affectant les fonctions-objectifs respectives de ces derniers, sans être régulées par l'échange volontaire dans lequel un bien n'est cédé qu'en contrepartie d'un paiement réputé représenter sa valeur*" (S. FAUCHEUX et J.F. NOËL, 1995, p. 63).

L'ensemble des coûts imposés par une activité économique à la collectivité correspond au coût social, dont une partie est compensée par les coûts privés de l'agent (ce sont les coûts de matières premières ou ceux du facteur travail). D'autres coûts, sans contreparties pécuniaires, peuvent être imposés à la collectivité. Ainsi, la pollution

⁶ A. MARSHALL prenait alors l'exemple d'un pêcheur qui, fixant sa production à un niveau tel que son coût marginal soit égal au prix de marché du poisson, accroît la rareté du poisson dans sa zone de pêche. Ceci entraîne inéluctablement une diminution des coûts marginaux des autres pêcheurs. Cette externalité négative – la baisse des coûts marginaux des autres pêcheurs – est une défaillance du marché.

engendrée par une voiture ou le bruit réalisé par une usine à proximité des habitations, sont des *externalités négatives*⁷.

Le concept d'externalité correspond, pour A. PIGOU, à une situation où "une personne A, alors qu'elle est en train de rendre un certain service, contre paiement, à une personne B affecte incidemment, en bien ou en mal, d'autres personnes (non productrices de services similaires), et cela de telle manière qu'un paiement ne puisse être imposé à ceux qui en bénéficient, ni une compensation prélevée au profit de ceux qui en souffrent" (A. PIGOU, 1920, cité dans F. LEVEQUE, 1998, p. 27). La relation émetteur-récepteur de la nuisance s'établissant en dehors du marché, l'externalité entraîne donc un coût externe se traduisant chez A. PIGOU par une différence entre le coût marginal privé et le coût marginal social⁸. Le graphique ci-dessous revient sur la question du point d'équilibre optimal.

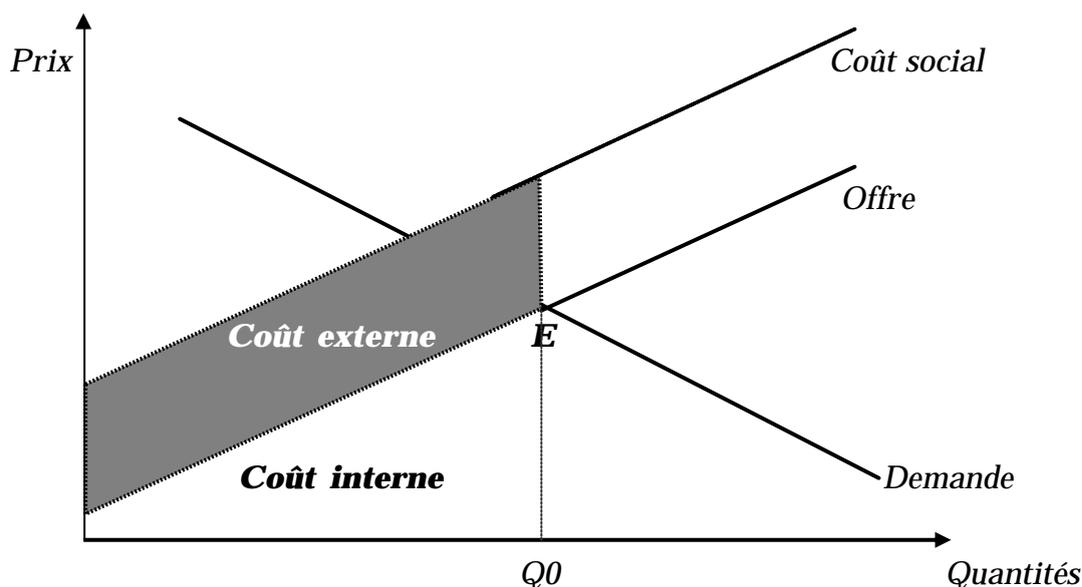


Figure 2 : Externalité et coût social (Source : Y. CROZET, 1997, p. 98)

Le point d'équilibre *E* (intersection de l'offre et de la demande) obtenu sur le marché à partir des coûts privés, n'est pas l'équilibre optimal. *Il ne permet pas une*

⁷ Il existe également des externalités positives comme la création d'une autoroute pour les entreprises d'une région. Evidemment, dans le cadre de cette thèse, la congestion, la perte de temps des usagers, la pollution, le bruit, sont des externalités négatives. De ce fait, lorsque nous emploierons le terme d'externalité (ou d'effet externe), celle-ci sera considérée comme négative.

⁸ Pour d'autres définitions de l'externalité, le lecteur intéressé pourra se référer à F. LEVEQUE (1998).

bonne affectation des ressources et une intervention s'impose pour que les quantités échangées du bien fauteur de nuisances se modifient de façon à réduire le coût social" (Y. CROZET, 1997, p. 98). Dans le graphique ci-dessus le point d'équilibre optimal se situe sur la droite du coût social, et non sur la droite d'offre.

Plusieurs types de classifications des externalités ont été réalisés par les économistes. Outre les distinctions externalités négatives/positives et externalités pécuniaires/technologiques⁹, Alain BONNAFOUS a établi les différents niveaux d'analyse d'après lesquels sont déterminées les externalités. Il propose ainsi une "*typologie des effets externes*" (A. BONNAFOUS, 1992) relevant de quatre catégories d'effets externes :

- les **externalités marshalliennes**, au coeur de la sphère marchande, en amont ou en aval de la firme (perte financière liée à un retard dû aux encombrements) ;
- les **externalités** qui obligent à une **intervention publique** suite à la dégradation d'un bien collectif (route dégradée) ;
- les **externalités inter-individuelles** comme la perte de temps dans les encombrements ou l'insécurité routière ;
- les **effets sur l'environnement** et sur la biosphère au sens large (pollution des véhicules).

Chacune de ces externalités a des conséquences diverses sur la collectivité et s'avère être difficilement mesurable en terme de perte (ou gain) de bien-être collectif. Avant de proposer des instruments d'internalisation des externalités, il semble nécessaire de quantifier, ou du moins d'estimer, les coûts sociaux engendrés par l'automobile.

1.1.2. Les coûts sociaux de l'automobile

Lorsqu'un automobiliste fait le choix d'effectuer un déplacement, il prend en considération les coûts privés qu'il subit et les compare à la satisfaction que lui procure ce déplacement. Il peut également comparer ses coûts privés avec le prix de déplacement d'un autre mode de transport. Les coûts privés sont par extension des coûts internes (par opposition aux coûts externes) et incluent le carburant, l'entretien du véhicule, l'assurance, les taxes et l'amortissement du véhicule. Les coûts externes, non pris en compte dans les coûts internes et se situant en dehors du marché, peuvent être regroupés en trois sous-ensembles dans le domaine des transports :

⁹ Sur ce point précis, voir la distinction présentée par Y. CROZET (1997, p. 36).

- les coûts « environnementaux » : regroupant la pollution atmosphérique, les effets sur le climat, le bruit et la dégradation des infrastructures et des paysages (faune et flore) ;
- les accidents ;
- les coûts de congestion.

1.1.2.1. Coûts « environnementaux » et coûts des accidents¹⁰

Dans la grande majorité des pays industrialisés, le secteur des transports est celui qui représente la part la plus importante en terme de consommation énergétique. En effet, si l'efficacité énergétique s'est accrue dans la plupart des secteurs d'activité, elle n'a pas cessé de diminuer dans celui des transports (qui représente aujourd'hui 32% de la consommation énergétique). Depuis le début des années 70, l'activité de transports a plus que doublé dans l'Union Européenne, avec une augmentation de 185% pour le transport de marchandises et une augmentation de 145% pour celui des personnes (COMMISSION EUROPEENNE, 2004). Un citoyen européen parcourait 17 kilomètres par jour en 1970, et il en parcourt 35 aujourd'hui. L'accroissement des déplacements entraîne une augmentation des consommations d'énergie et une hausse des émissions de CO₂. Les transports étaient responsables de 28% des émissions de gaz à effet de serre en 1998 et "*cette part devrait augmenter de 50% entre 1990 et 2010*" (Op. Cit., p. 8). Le rapport de la Commission Européenne met en avant que le secteur routier est le principal responsable de cette pollution, avec 84% des émissions imputables aux transports. Les émissions de gaz devraient augmenter dans les 30 prochaines années si rien n'est fait pour y obvier. "*Des mesures volontaristes doivent donc impérativement être prises pour inverser les tendances*" (Ibid.).

Les coûts externes totaux (hors congestion) s'élèvent à 650 millions d'euros dans les pays de l'UE 17¹¹, soit 7,3% du PIB (INFRAS/IWW, 2004, p.6). Le changement

¹⁰ Nous ne développerons pas ces deux coûts car le champ de notre analyse se limite à la congestion automobile en milieu urbain. Toutefois, quelques données doivent être présentées afin de bien montrer les impacts que pourrait avoir une meilleure gestion du trafic automobile sur l'environnement et sur la sécurité routière. Le lecteur intéressé peut se reporter au rapport BOITEUX (2001) et se rendre sur le site de l'Union Européenne (http://www.europa.eu.int/pol/trans/index_fr.htm). Concernant la sécurité routière, on peut se reporter aux travaux de l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité) : <http://www.inrets.fr>.

¹¹ Les 15 Etats-membres de l'UE plus la Suisse et la Norvège.

climatique qui se traduit par des émissions de gaz à effet de serre¹² (CO₂ principalement) représente 30% des coûts totaux en considérant une valeur de 140 € par tonne de CO₂. Les coûts de pollution atmosphérique se traduisant par l'émission de particules¹³ (monoxyde de carbone, plomb, oxydes d'azote, composés organiques volatils et dioxyde de soufre) représentent 27 % des coûts totaux, les accidents 24 % et le bruit 7 %. Près de la moitié de l'ensemble de ces coûts est produite par l'automobile. A propos des accidents de la route, les experts soulignent que le nombre de morts sur les routes a été divisé par deux depuis 1972, alors que le niveau de circulation a doublé (J. P. ORFEUIL, 2001, p. 199).

Les émissions de CO₂ (liées à la circulation routière) devraient connaître une forte croissance durant les vingt prochaines années, contrairement aux émissions de particules qui devraient diminuer (C.E.R.T.U., 2001).

1.1.2.2. Les coûts de congestion

Les coûts de la congestion routière sont difficilement mesurables puisqu'ils incorporent les coûts des retards et les pertes de temps imposés à des tiers. La détermination de ces "pertes de temps" étant floue, il convient d'adopter une définition claire de la congestion.

La congestion routière est essentiellement une externalité négative, non prise en compte par le marché, née de la surutilisation d'un réseau routier à un moment donné et entraînant une diminution de la vitesse de circulation. De cette subjectivité des termes, émanent plusieurs approches.

a. Tout d'abord, une lecture **macroéconomique** souvent reprise dans les rapports « officiels » de l'Union Européenne ou des différents pays intéressés est proposée par les experts. Le rapport BOITEUX (2001, p.53) esquisse une définition : *"la congestion se définit comme la gêne que les véhicules s'imposent les uns aux autres en raison de la relation qui existe entre la densité de circulation sur un itinéraire ou sur un réseau et la vitesse d'écoulement des trafics, compte tenu de la capacité "*. En pratique, cela se traduit par la différence entre *"la vitesse mesurée des véhicules sur une infrastructure pendant*

¹² Ces émissions ont un effet à long terme sur le climat de la planète (désertification, dégâts sur l'agriculture élévation du niveau des océans...) mais ne sont pas impliquées dans la pollution locale.

¹³ Ces émissions nuisent à la santé des individus, à l'environnement naturel et aux bâtiments.

une période déterminée (heure de pointe, notamment) et une certaine vitesse de référence". Pour certains, la vitesse de référence doit être celle, extrême, de circulation fluide. On obtient ainsi, un coût pour la collectivité de l'ordre de 2% du PIB dans les pays de l'UE (CEE, 1995).

R. PRUD'HOMME qualifie cette approche de "**naïve**", car, dit-il, elle fait référence exclusivement à des routes vides, qui n'ont pas été construites pour cela. Il serait alors sous-optimal qu'elles soient inutilisées. Toutefois, P. H. DERYCKE (1999) nuance cette vision. D'après lui, PRUD'HOMME amalgame "vide" avec "fluide" et rappelle que personne n'utilise cette définition de la congestion. La situation de référence est en fait "*la route où aucun automobiliste n'est gêné par un autre et peut encore circuler à la vitesse de base*" (Id., p. 444), donc sans être nécessairement "vide".

R. PRUD'HOMME (1999, pp. 430-432) propose quatre approches supplémentaires sur lesquelles nous allons revenir brièvement :

- l'approche **arbitraire** prend en compte une vitesse de référence « acceptable ». Quand la vitesse est inférieure à celle-ci, on parle alors de congestion. Les coûts de congestion sont donc égaux à la valeur du temps effectivement passé moins la valeur du temps avec vitesse de référence ;

- l'approche **technique** est celle de l'ingénierie où l'on prend en compte la vitesse associée au flux maximal sur la route, comme vitesse de référence. Lorsque la vitesse effective est inférieure à cette vitesse, la voirie est congestionnée. Les coûts de congestion sont ici égaux à la valeur du temps effectivement passé moins la valeur du temps de la vitesse de référence¹⁴ ;

- l'approche **semi-économique** prend en compte la situation économiquement optimale c'est-à-dire la demande d'utilisation de la route. "*La différence entre le niveau optimal d'utilisation de la route et le niveau effectif d'utilisation peut être considérée comme un indicateur de congestion*" (id. p. 431). Dans ce cas les coûts de congestion sont équivalents au produit de l'éventuelle taxe internalisante ;

- l'approche **économique** se base sur la même situation de référence. Elle ne correspond cependant pas à la taxe internalisante mais à la perte de surplus (plus faible).

De ces définitions et des calculs qu'elles engendrent, R. PRUD'HOMME conclut que "*lorsque les coûts de congestion sont définis d'une façon significative (...) les coûts de*

¹⁴ Les ingénieurs effectuent des mesures empiriques et privilégient l'offre sans prendre en compte la demande de déplacement.

congestion apparaissent relativement modestes, quelque chose comme dix fois plus faibles que les fameux 2% du PIB mis en avant par la Commission Economique Européenne " (id. p. 439).

Mais pour beaucoup, le point de vue macroéconomique n'apporte pas grand-chose "*sur les comportements des citoyens exposés à la congestion, puisqu'il se borne à constater les pertes de temps, à les agréger et à les valoriser selon des hypothèses toujours plus ou moins discutables, et à les traduire finalement en pertes de production potentielle.*" (P. H. DERYCKE, 1997, p. 56) C'est pour cela que nous allons nous orienter vers une approche microéconomique de la congestion.

b. Dans une approche **microéconomique**, W.S. VICKREY (1969) distingue plusieurs types de congestion que nous pouvons récapituler comme suit.

Tout d'abord, **l'interaction simple** est un type de congestion basique où, sur une route homogène, un véhicule, ralenti par un autre, ne peut pas doubler. L'allongement du temps de déplacement est une fonction du volume du trafic.

$$V = f(x)$$

Où V est la vitesse de déplacement et x le débit du trafic.

De la même façon, il est impossible de doubler dans le cas de **l'interaction multiple**. La vitesse moyenne diminue avec l'augmentation de l'intensité de la circulation, ainsi :

$$z = t - t_0 = ax^k$$

Où z correspond au retard moyen par véhicule, t au temps requis pour effectuer le trajet souhaité compte tenu des conditions actuelles du trafic, t_0 au temps requis pour effectuer le trajet en situation de circulation fluide, et a et k des paramètres constants.

W.S. VICKREY présente ensuite la situation de **file d'attente** ("*bottleneck situation*"), où plusieurs véhicules sont ralentis par un rétrécissement de la chaussée. Dans ce cas, s'il n'y a pas d'itinéraire alternatif, la demande de trafic excède l'offre (le rapport du débit sur la capacité est supérieur à 1). La littérature regorge de travaux théoriques inspirés de ce cas. Le plus célèbre étant le modèle de files d'attente de R. ARNOTT, A. DE PALMA ET R. LINDSEY (1990a, 1993), sur lequel nous reviendrons (Chapitre II). Ici, le comportement des usagers est pris en compte, ils arbitrent entre leur temps de trajet et leur temps d'avance (ou de retard) à l'arrivée.

Dans des circonstances similaires, on évoque le cas du **goulot d'étranglement en cascade** ou du **bouchon en rafale** ("*triggerneck congestion*"), lorsqu'un rétrécissement entraîne une file d'attente de telle sorte qu'elle crée une queue sur un autre itinéraire, qui, à son tour, génère un embouteillage sur une autre voie, et ainsi de suite.

On peut noter également une congestion due à une politique urbaine des transports : une **congestion propre à la régulation du réseau**. Ici, les automobilistes ne sont pas responsables des phénomènes d'encombrement de la voirie (feux rouges, stops, sens uniques...).

Enfin, il existe une situation de congestion, plus complexe à étudier, liée à la morphologie du réseau, lequel coordonne plusieurs types de transport en interactions permanentes (**congestion de réseau**).

Face à cette présentation plutôt littéraire de la congestion, il importe d'en proposer une lecture plus technique.

1.2. Les phénomènes de congestion : les fondements théoriques

Les recherches menées sur la congestion de la circulation sont vastes, et peuvent se scinder en deux groupes : d'une part les travaux d'économistes (l'approche économique de PRUD'HOMME) et d'autre part les travaux d'ingénieurs (l'approche technique de PRUD'HOMME). Pour les ingénieurs, la meilleure solution pour lutter contre la congestion est de développer et d'améliorer le réseau routier afin de déployer les automobilistes. Pour les économistes cette solution n'est pas viable, car si l'on augmente l'offre de voiries, alors la demande de déplacement va s'accroître et le problème de la congestion ne sera pas résolu. De fait, ils proposent de réguler le débit de la circulation, via la tarification.

L'objectif de ce paragraphe est d'analyser la congestion en tant que concept théorique, afin de mieux percevoir ses conséquences sur la collectivité.

1.2.1. Détermination graphique de la congestion

A partir d'un modèle « classique » et statique de congestion, inspiré des travaux d'ingénierie, E. VERHOEF (2001) détermine, dans un **diagramme fondamental** les trois variables qui définissent les flux de circulation :

- la *densité* D de la circulation, exprimée en véhicules par rue et par kilomètre ;
- la *vitesse* V de la circulation, exprimée en kilomètres par heure ;

- le *débit* q de la circulation, exprimé en véhicules par rue et par heure.

Ces variables sont définies dans des conditions stationnaires à chaque point dans le temps et dans l'espace :

$$q = D.V \tag{1}$$

De plus, cette relation technique entre les trois variables peut être représentée graphiquement dans un diagramme issu des données de l'ingénierie :

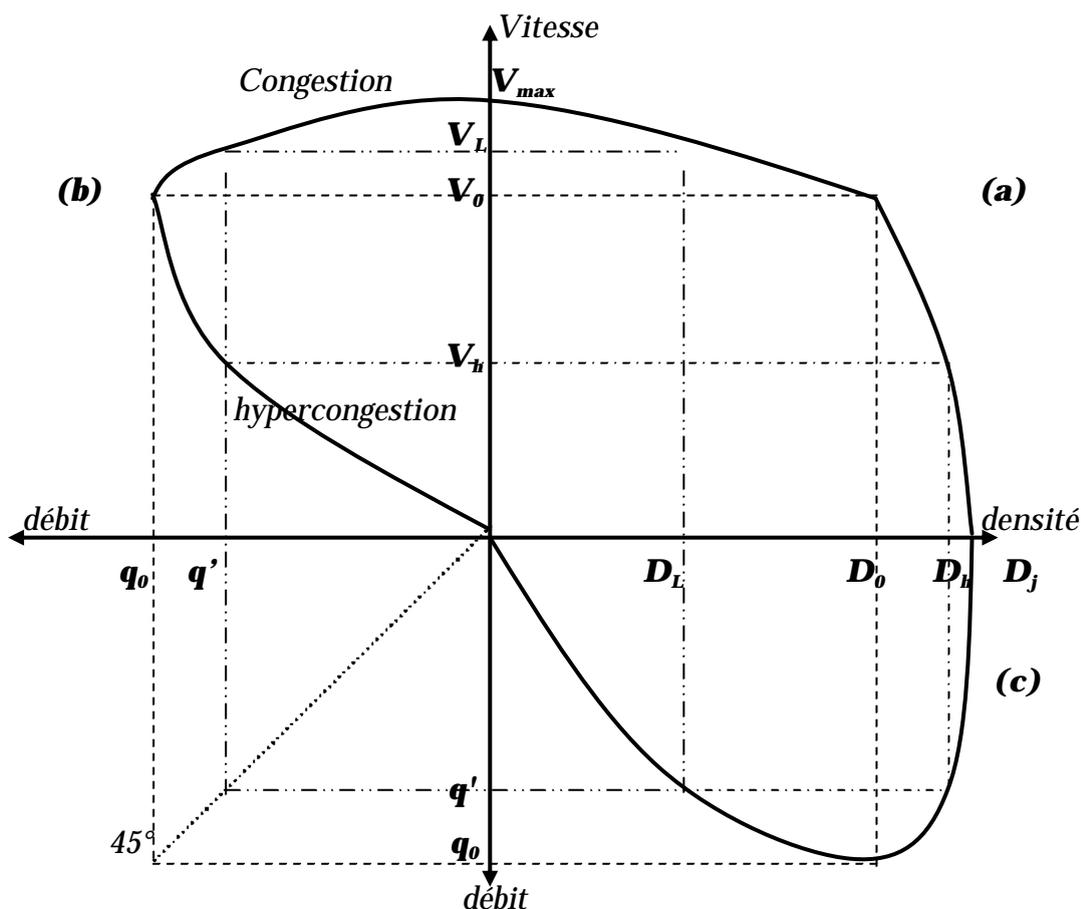


Figure 3: (a) courbe vitesse-densité, (b) courbe vitesse-débit, (c) courbe débit-densité (Source : E. VERHOEF, 2001)

Concernant la courbe vitesse-densité, la forme a évolué au cours des recherches et change encore. En effet, il faut tenir compte d'un certain nombre de facteurs non négligeables : nombre et largeur des rues, courbure de la voie, limitation des vitesses, types de véhicules, proportion des usagers connaissant la rue...

Logiquement, lorsque la densité augmente la vitesse diminue. Néanmoins, les vitesses sur les grandes routes (autoroutes urbaines) ont tendance à demeurer proches de la vitesse de circulation fluide, V_{max} jusqu'à ce que les flux atteignent 1000-1300 véhicules/rue/heure. Quand la densité devient plus élevée, la courbe vitesse-densité diminue plus rapidement en passant du point (D_0, V_0) , où le débit est maximum ($q_0 = D_0 \cdot V_0$), au point de vitesse nulle $(D_j, 0)$, c'est à dire en situation d'embouteillage maximum, et de fait $q_0 = 0$.

A propos des courbes vitesse-débit¹⁵ et débit-densité, nous remarquons qu'un débit $q' < q_0$ peut exister quand il y a : soit une faible densité et une grande vitesse (D_L, V_L) , soit quand il y a une forte densité et une vitesse réduite (D_H, V_H) ¹⁶. La courbe vitesse-débit (b) suscite un certain nombre de questions et a pour objectif de définir le seuil à partir duquel la voirie est congestionnée.

Le débat entre économistes et ingénieurs continue à propos de la définition de la congestion, en effet "*les économistes définissent la partie supérieure de la courbe vitesse-débit comme congestionnée et la partie inférieure comme hypercongestionnée. Les ingénieurs mentionnent la première partie de la courbe comme étant en circulation fluide (uncongested) et la partie basse comme étant congestionnée*" (R. LINDSEY et E. VERHOEF, 1999, p.3).

En fait, la congestion se produit dans la partie supérieure de la courbe quand la vitesse de circulation est inférieure à la vitesse de circulation fluide.

1.2.2. Le coût de déplacement

Chaque usager encourt un coût moyen de déplacement¹⁷, pour une distance et une valeur du temps donnée, qu'il cherche à minimiser. Ainsi, en prenant en compte les coûts internes et externes de l'usager, nous pouvons déduire l'équation de la courbe du coût de déplacement :

¹⁵ Pour A. A. WALTERS (1961), la courbe vitesse-débit permet d'analyser les flux de véhicules comme étant la quantité de voyages offerts par route et par unité de temps.

¹⁶ Voir également la figure 4, qui indique deux coûts différents pour un même débit q' .

¹⁷ La courbe de coût de déplacement correspond à la relation temps-débit (où le temps évolue comme l'inverse de la vitesse) et mesure la qualité du service offert : c'est une courbe d'offre.

$$C(q) = C_0 + aL/V(q) \tag{2}$$

Où a est le coût unitaire du temps de déplacement, L est la distance du voyage, $V(q)$ est la vitesse exprimée en terme de flux et C_0 est le coût privé de déplacement (qui ne dépend pas de la congestion) tel que le coût du carburant, le temps de marche pour accéder au véhicule...

E. VERHOEF a déterminé graphiquement la courbe de coût de déplacement en introduisant une courbe de demande de voyage $p(q)$ décroissante et monotone afin d'obtenir un graphique d'offre-demande :

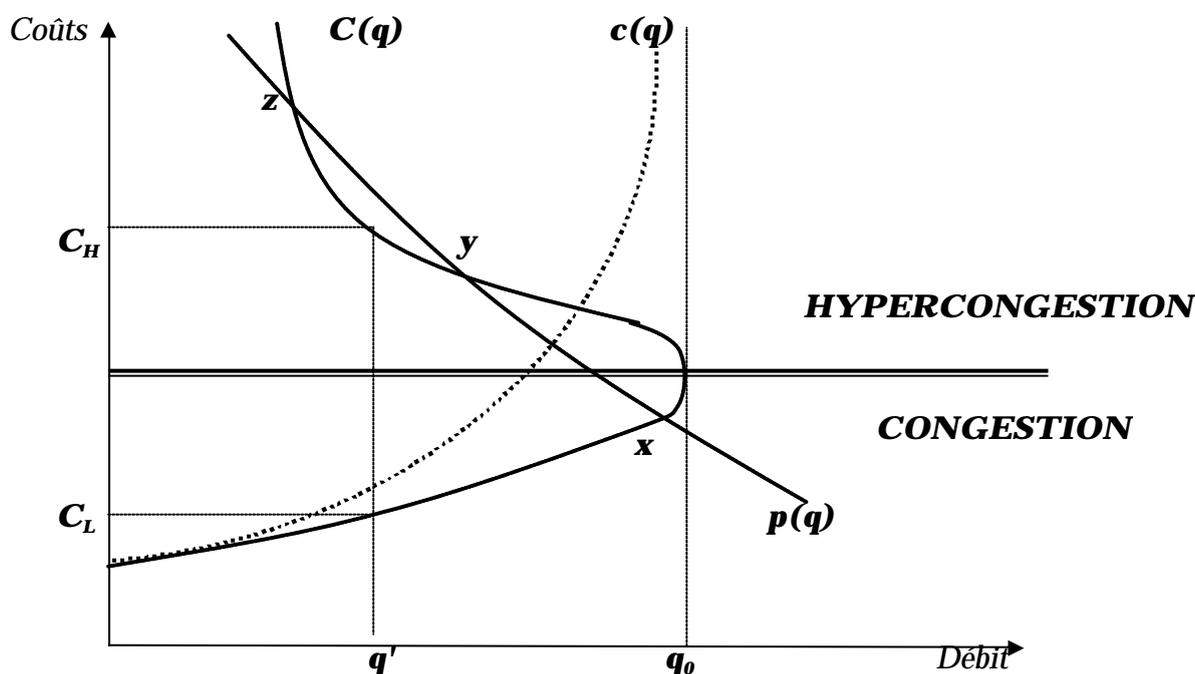


Figure 4 : Courbe de coût moyen de déplacement $C(q)$, la courbe de coût marginal $c(q)$ et courbe de demande de déplacement $p(q)$ (Source : E. VERHOEF, 2001)

Dans la figure 4, il y a trois points d'intersection entre $C(q)$ et $p(q)$: x représentant une situation de débit congestionné (régime laminaire), puis, y et z représentant une situation d'hypercongestion (régime forcé). Certains économistes ignorent la partie de l'hypercongestion pour ne s'intéresser qu'à la partie congestionnée.

Les ingénieurs emploient le terme « laminaire » en référence à l'hydraulique¹⁸. Dans ce graphique, la pente de la courbe du coût moyen de déplacement dans la zone inférieure est liée à un double effet : l'augmentation du nombre d'automobilistes entraîne une diminution de la vitesse, mais aussi une augmentation du débit. Le régime « forcé » fait référence à une situation d'instabilité du réseau où la vitesse et le débit peuvent diminuer en même temps. Sur la figure ci-dessus, le temps de déplacement augmente avec l'occurrence de la congestion : *"égal au temps de base lorsque le véhicule circule seul ou sans gêne aucune, il tend vers l'infini lorsque la vitesse tend vers zéro, c'est à dire lorsque le trafic est totalement immobilisé avec un flux d'écoulement nul."* (P. H. DERYCKE, 1999, p. 445) Les coûts s'accroissent alors de façon "exponentielle".

La troisième courbe ajoutée dans ce graphique est celle du coût marginal $c(q)$. La différence entre celle-ci et la courbe du coût moyen représente le coût marginal externe de congestion, *"c'est-à-dire la part des coûts de congestion imposés par un usager aux autres automobilistes."* (Y. CROZET et G. MARLOT, 2001, p. 84) En effet, lorsque l'usager décide d'emprunter une voirie, il le fait en fonction de son coût moyen de déplacement, ce qui entraîne une « surutilisation » du réseau dans la mesure où les coûts qu'il supporte ne correspondent pas à l'ensemble des coûts qu'il engendre.

Avant d'aborder les différentes formes de politique publique de régulation de la circulation, et le cas du péage de congestion en particulier, il convient de préciser que la situation d'hypercongestion ne peut être entièrement résolue à l'aide d'un péage de congestion. Certains auteurs préconisent notamment que la régulation du trafic dans ce cas précis doit se faire par un développement du réseau urbain et un investissement dans de nouvelles infrastructures. Toutefois, une congestion plus superficielle (régime laminaire) peut faire appel à des politiques d'internalisation de la congestion telles que le péage.

¹⁸ Cette analogie comporte des limites comme le souligne justement R. ARNOTT (1985, p. 24) : *"Je pense qu'il est impossible de construire un modèle de trafic de pointe compatible à la fois avec les lois physiques et un comportement individuel de maximisation qui aboutisse à un trafic de pointe stationnaire. En l'état actuel des choses, les flux de trafic réels sont loin d'être uniformes à l'heure de pointe. Le problème est de savoir dans quelle mesure l'hypothèse d'uniformité constitue une bonne approximation."*

Section 2. Les différentes politiques d'internalisation de la congestion

L'accroissement constant du nombre de voitures en ville entraîne une augmentation permanente de la congestion routière notamment aux heures de pointe et dans cette situation l'usager est retardé et ralentit les autres. Ces retards représentent des pertes économiques, car le temps compte et la consommation énergétique augmente. Lorsqu'un usager prend la décision d'effectuer un trajet, il le fait en fonction simplement de son coût marginal privé ($CMP =$ temps de trajet + dépense en carburant et autres coûts privés ressentis) plutôt que du coût marginal social ($CMS = CMP +$ congestion - éventuelles taxes) imposé à l'ensemble des automobilistes.

Sans contrainte tarifaire, l'usager égalisera le CMP avec sa demande de déplacement ($D(p)$) et le débit sera de $F1$ (Figure 5). L'objectif d'un instrument tarifaire d'internalisation de la congestion est de faire prendre conscience à l'automobiliste de l'ensemble des coûts de congestion associés à son déplacement.

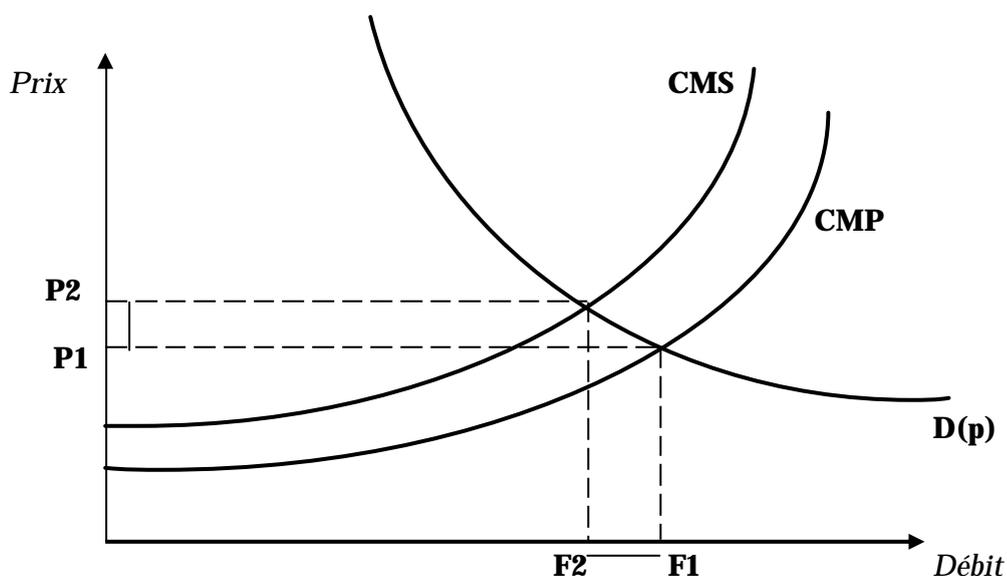


Figure 5 : La tarification de la congestion (Source : K. J. BUTTON, 1998, p.118)

Ainsi avec une taxe de valeur $P1P2$, le débit va passer de $F1$ à $F2$, et le niveau de congestion sera optimal (sans toutefois supprimer les encombrements) dans le sens où "le

bénéfice marginal obtenu par les automobilistes sera égal aux coûts subis " (K. J. BUTTON, 1998, p. 118)¹⁹.

Il importe maintenant de rendre compte des différents instruments tarifaires permettant d'obtenir cette « congestion optimale » en éclairant ceci de quelques exemples (sous-section 2.1.). Dans une seconde sous-section nous nous interrogerons sur le choix délicat du décideur qui devra tenir compte des objectifs fixés (réduction de la congestion, gain de temps, réduction du trafic global, internalisation des effets externes environnementaux) ainsi que des problèmes d'équité et d'acceptabilité de ces différentes mesures.

2.1. Les instruments tarifaires permettant de contrôler la congestion

Le décideur politique peut user de plusieurs instruments afin de réguler la circulation automobile en ville et de diminuer la congestion ainsi que les externalités environnementales. Sous diverses formes, les mesures réglementaires permettent de modifier le comportement des automobilistes : *l'interdiction* partielle ou totale de l'usage de l'automobile en ville²⁰ ; *l'organisation spatiale*, en instaurant des *itinéraires indiqués*, permettrait aux pouvoirs publics d'influer sur le comportement des usagers, à l'aide de panneaux directionnels, en les incitant à éviter les routes congestionnées pour aller dans tel ou tel quartier de la ville ; ou *la norme* (d'émission, de produit, de qualité d'environnement...) qui est un instrument spécifiquement environnementaliste. Mais ces politiques réglementaires ont de multiples effets pervers : elles peuvent "*entraîner des changements brutaux et rapides en ce qui concerne les comportements des agents* " (F. MIRABEL, 1999, p.3) ; elles induisent également des actions de "*contournement* " ou même de rejet total de la population²¹. Pour ces raisons, la plupart des économistes s'accordent à reconnaître la supériorité des instruments tarifaires, "*d'autant plus marquée que les coûts et les préférences [des usagers] sont hétérogènes* " (F. LEVEQUE, 1999, p.7). Cette remarque doit toutefois rester nuancée car dans le cas de la pollution il peut être

¹⁹ Une présentation approfondie de ce type de graphique sera proposée dans la première section du chapitre suivant.

²⁰ Dans de nombreuses villes européennes, le centre historique est en partie réservé aux piétons et aux cyclistes. Certaines de ces zones ne sont accessibles en automobile qu'aux résidents.

²¹ Les instruments non tarifaires sont présentés et développés par F. MIRABEL, 1999.

préférable d'utiliser une norme plutôt qu'un compteur de pollution embarqué dans chaque véhicule.

2.1.1. La tarification de la congestion par le péage

Le péage de congestion ("*congestion pricing*") a pour but de tarifier la congestion, de lui donner une valeur monétaire et ainsi de faire payer aux usagers le prix de leur présence sur le réseau. Le principe de ce péage est directement inspiré de la taxe de A. PIGOU (1920) que nous développerons dans le prochain chapitre. Dans la figure 5, le péage correspond à $P1P2$. De fait, l'automobiliste responsable de la congestion prendra conscience de la nuisance qu'il fait supporter à la collectivité et sera incité à réduire ses déplacements selon le principe du *pollueur-payeur*.

valeur du péage

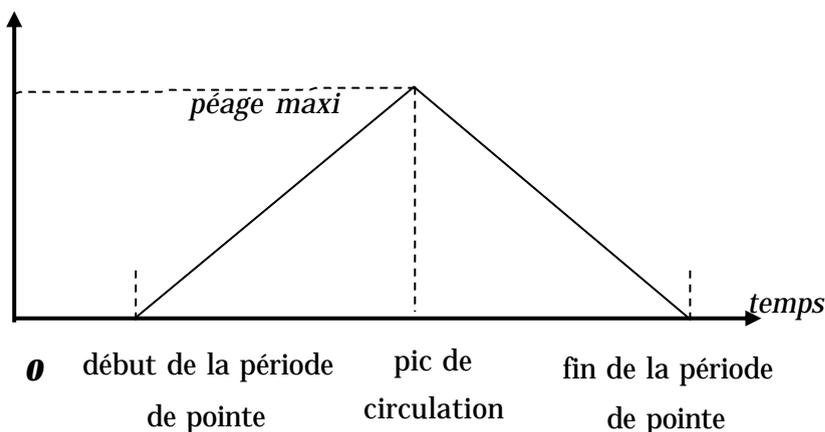


Figure 6 : Le péage modulable en fonction du temps (avec les automobilistes qui se rendent au même endroit en même temps)

Un péage variable dans le temps (appelé péage de pointe) peut permettre de réguler au mieux les flux de circulation²², ainsi plus la circulation est dense, et plus le prix du péage devra être élevé (Figure 6).

Il existe plusieurs types de péage de congestion :

²² Voir les travaux de ARNOTT et al. (1990, 1993) que nous aborderons dans le chapitre II.

- le péage d'axe ou d'ouvrage²³ (les autorités décident d'instaurer un péage sur une route régulièrement encombrée, afin de diminuer le niveau de circulation durant les périodes de pointe) ;
- le péage de zone (la circulation dans une zone de la ville devient payante pour les entrants ainsi que les déplacements restant à l'intérieur. Le péage est ici assimilable à un forfait.) ;
- le péage de cordon (qui est un cas particulier du péage de zone, ici les automobilistes paient à chaque passage à différents points d'entrée d'une zone encombrée. Une fois dans la zone, la circulation n'est plus payante).

2.1.2. Le stationnement, autre support de péage

Les péages de stationnement ont pour vocation d'allouer "*une ressource rare (le sol) en faisant payer à l'utilisateur le coût de la consommation de l'espace de stationnement*" (F. MIRABEL, 1996)²⁴. Les raisons de mise en place de cette politique sont multiples : réduire le trafic dans une zone – péage de congestion en aval ; réduire les difficultés de stationnement dans un secteur et inciter les automobilistes à changer de mode de transport ou d'horaire de déplacement ; engendrer des recettes. Lorsque l'objectif est de réduire le trafic dans une zone de la ville (c'est ce qui nous intéresse), afin d'être efficace "*le prix du parking doit être équivalent au tarif du péage de congestion*" (K. J. BUTTON, p.120, 1998), c'est-à-dire équivalent à *PIP2* sur la figure 5.

Ce type de tarification affecte la demande de déplacements et certaines études (R. PRATT, 1999) estiment qu'une hausse de 10% du prix de stationnement entraîne une réduction des déplacements en voiture de 1 à 3%, soit une élasticité-prix comprise entre – 0,1 et – 0,3. Concernant la congestion, pour produire un changement de comportement dans le choix des horaires de déplacement, le tarif du péage doit être élevé pendant la période de pointe de recherche de stationnement et faible en dehors de cette période (ce type de tarification est assimilable à ce qui est présenté dans la figure 6, mais avec un décalage dans le temps : la pointe de demande de stationnement n'est pas la même que

²³ A distinguer des péages d'infrastructure dont l'objectif est le financement d'une autoroute ou d'un pont par le biais d'un péage lors de l'accès à la voie. Dans ce cas, l'objectif recherché est la maximisation des revenus et la dissuasion de créer des voiries alternatives.

²⁴ Notons qu'il existe deux types de péage de stationnement : stationnement sur voirie et stationnement en espace privé.

celle de la circulation). Un péage de stationnement a également un effet bénéfique sur le transfert modal.

Toutefois, il découle plusieurs effets pervers de ce type de politique :

- les voitures à l'arrêt sont pénalisées et cela entraîne un comportement de rotation de la part des automobilistes (et donc de déplacement) ;
- les automobilistes arrivant dans le lieu de parking peuvent perdre du temps afin de trouver une place disponible (coût de recherche) si le tarif n'est pas assez élevé ;
- certaines entreprises privées situées au centre-ville mettent à disposition de leurs salariés des places de parking gratuites, rendant ainsi inefficace la politique d'internalisation de la congestion par le péage de stationnement.

Les expériences s'inscrivant dans cette mesure d'internalisation sont nombreuses, mais la plupart ont pour objectif d'augmenter les recettes de la collectivité. En analysant par exemple le cas de la taxation des parkings commerciaux de San Fransisco, où la ville impose une taxe de 25% sur tous les parkings de centres commerciaux, nous constatons que les recettes d'environ 50 millions de dollars sont réparties entre les transports publics, les fonds pour les personnes âgées et les revenus de la ville. En France, les péages de stationnement sur voirie ont pour objectif de favoriser la rotation des véhicules afin de combattre les « voitures ventouses » et de favoriser l'activité commerciale des centres-villes. Par ailleurs, le type de tarification « courte durée » doit inciter les pendulaires à se garer dans des parkings affectés à cet effet (sous-terrain, hors centre-ville...) et de ce fait à ne pas encombrer les rues et les stationnements du centre (C.E.R.T.U., 2000a).

2.1.3. Taxation sur les carburants

Les dépenses en carburants sont les coûts directs les plus élevés encourus par les automobilistes. Ces charges peuvent se traduire par une mise en place d'un certain taux de taxation sur les carburants ou d'une taxe sur l'émission de carbone. A titre indicatif, nous pouvons remarquer les disparités de taxation entre les différents pays : en France, la part moyenne de prélèvement sur le prix final du carburant est de 64%, celle du Royaume-Unis est de 80%, celle de l'Italie est de 22% et celle des Etats-Unis de 27% (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY).

Cependant, il subsiste une certaine corrélation entre l'usage de l'essence et le niveau de circulation. P. B. GOODWIN (1992) montre en effet qu'une augmentation du

prix des carburants de 10% réduirait ainsi, en quelques années, le trafic de 3%. Dans cette étude analysant le niveau des élasticités-prix des carburants, il révèle que le volume du trafic a une élasticité-prix des carburants de -0,16 à court terme et de -0,33 à long terme. La consommation de carburant a, quant à elle, une élasticité-prix de -0,27 à court terme et d'environ -0,70 à long terme. La réduction de la consommation est imputable aux effets exercés sur le volume du trafic, d'une part, et à l'amélioration des consommations spécifiques des véhicules, d'autre part. L'élasticité de la taille et de la composition du parc automobile par rapport au coût du carburant semble osciller autour de -0,2. Ces chiffres laissent entendre que les modifications du prix des carburants induisent des changements, à long et à court terme, du comportement des usagers dont les répercussions sont plus fortes sur la consommation que sur le volume du trafic. Toutefois GOODWIN néglige le coût économique de la fiscalité des carburants en dehors des zones congestionnées (R. DARBERA, 2001).

Les effets de ce type de mesure seront tels qu'à long terme les usagers seront incités à utiliser des véhicules dont les carburants seront moins taxés²⁵. Concernant la congestion urbaine proprement dite, K. J. BUTTON (1998) souligne que la pollution est plus forte lorsqu'il y a des arrêts et des démarrages fréquents. Une augmentation de ces taxes entraîne irrémédiablement une hausse du prix de circulation en ville, et donc une baisse de la congestion. Mais cet instrument est très efficace au niveau budgétaire et les pouvoirs publics ont tendance à taxer les carburants à des fins budgétaires et non pour inciter les automobilistes à minimiser leur consommation de carburant et leurs déplacements.

2.1.4. Taxation sur les véhicules

Cette mesure a un effet sur le nombre de véhicules achetés par an, mais n'a aucun impact sur le volume de trafic et donc sur la congestion urbaine. Par contre, pour avoir un impact direct sur les externalités, cette taxe peut être déterminée selon le niveau de pollution ou le niveau sonore produit par l'automobile (âge, puissance,...) (B. DE BORGER, J. PEIRSON et R. VICKERMAN, 2001).

²⁵ Il existe également un autre effet dû à la hausse des taxes sur le carburant : la baisse de la consommation de pétrole et l'augmentation de son prix. Ceci devrait transférer l'activité énergétique vers d'autres ressources « vertes » telles que le gaz ou l'électricité.

2.1.5. Tarification kilométrique

La taxation kilométrique ("*Pay-As-You-Drive*") a pour objectif d'instaurer une charge sur le véhicule en fonction de la distance parcourue, ainsi "*plus on circule et plus on dépense, et moins on circule et moins on dépense*".²⁶ Ce type d'instrument tarifaire peut prendre la forme d'une assurance en transformant celle payée chaque année par une assurance-kilométrique. Cette option aurait deux objectifs : réduire la circulation globale (et par extension la congestion urbaine) et réduire les accidents. Mais ce choix ne réduirait que partiellement les encombrements dans les cités et il serait plus ambitieux de créer une taxe kilométrique spatiale et temporelle. Spatiale pour réduire la congestion dans un lieu donné (le centre-ville par exemple) et temporelle pour répartir les automobilistes dans le temps (taxation plus élevée en période de pointe). De fait, on se rapproche de la tarification de la congestion par le péage de zone avec un élément supplémentaire : les usagers ne payent pas simplement à leur entrée dans la zone ou pour une durée donnée, mais ils payent en fonction du nombre de kilomètres qu'ils parcourent dans cette zone. L'inconvénient majeur du péage de Londres, que nous présenterons dans le Chapitre V de la thèse, est que l'automobiliste souhaitant effectuer un simple aller-retour dans le centre-ville va déboursier la même somme que celui passant une journée à circuler dans toute la zone. La taxation kilométrique zonale et temporelle permet de résoudre ce problème et de "*décongestionner*" du mieux que possible les villes saturées.

Même si elle n'est pas urbaine, la redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations (RPLP) en Suisse, est fortement pertinente. Mise en place en janvier 2001 sur l'ensemble du territoire, cette tarification est proportionnelle au poids total en charge et au kilométrage parcouru. Le prix payé par les poids lourds est égal au coût d'usure des routes, occasionné par les poids lourds, additionné du coût de la pollution. L'objectif de cette mesure est clairement de ralentir la croissance du transport de marchandises sur route (réduire de 30% les tonnes-kilomètres d'ici 2015) et de diminuer les atteintes à l'environnement. Ainsi, les recettes sont affectées aux 2/3 à l'amélioration des chemins de fer et à 1/3 aux cantons qui l'utilisent à des fins routières.²⁷

²⁶ Voir les travaux développés par *Victoria Transport Policy Institute* (2004) : www.vtpi.org.

²⁷ Voir le rapport A.R.E. (2004). Nous développerons ce point dans le Chapitre V consacré aux expériences de tarification des déplacements.

2.1.6. Subvention des transports collectifs

Ce type de politique, que l'on peut considérer comme étant une politique tarifaire, a pour perspective d'offrir un mode de transport alternatif aux automobilistes. Cela entraîne une diminution de l'usage de la voiture en ville en transférant une part de la demande vers les transports collectifs publics. Des subventions publiques élevées permettront de réduire le prix du billet et de rendre le mode de transport collectif plus attractif.

En France, "*les élections municipales de 1983 ont fait perdre les maires qui avaient des projets de transports publics. Celles de 1989, et surtout de 1995, ont fait élire ou réélire des maires sur ce même thème*", constate Mme Pécheur, secrétaire générale du Groupement des autorités responsables des transports (GART) (I. BOURBOULON, 1997). Pour garantir aux citoyens une offre de transports collectifs attrayante, susceptible de leur faire abandonner la voiture privée, il convient de créer des conditions de facilité, de confort et de rapidité capables de rivaliser avec l'automobile. Les mesures allant dans ce sens sont nombreuses : cadencement et coordination des horaires de plusieurs modes, intégration tarifaire destinée à favoriser l'usager des transports publics, création de parking-relais à la périphérie des villes, etc. Mais les autorités peuvent aussi orienter le choix des usagers en agissant sur le coût de déplacement en automobile (en instaurant différents types de péages ou de taxes). Il en résulte que les subventions des transports collectifs peuvent être une mesure d'accompagnement aux divers instruments tarifaires présentés ci-dessus et permettent de compenser le "*coût de dérangement*" (T. LITMAN, 1999, p.2) subi par ceux qui ont changé de mode de déplacement.

Dans la même idée, on peut évoquer le cas de la "*congestion charge*" à Londres qui concilie péage de congestion et développement des transports collectifs urbains. Les recettes du péage sont affectées directement au développement des transports collectifs publics de la ville. On sait d'ores et déjà que les portées du péage ont dépassé l'effet escompté puisque il a réduit la congestion dans la zone centrale. De plus, en 2004, par rapport à la même période de l'année 2002, la vitesse moyenne a augmenté. Enfin, les transports en commun ont accru leur clientèle (TfL, 2003).²⁸

2.1.7. Création de voiries payantes (HOT lanes)

L'objectif visé ici est clairement le gain de temps et non pas la réduction directe de la congestion. En France, il est interdit d'instaurer un péage sur une voirie urbaine

²⁸ Les résultats de l'expérience londonienne seront étayés dans le Chapitre V.

existante²⁹ ; aussi l'option choisie (à Marseille ou à Lyon) est-elle de créer une voie parallèle alternative mais payante, une "route de première classe" (F. PAPON, 1992). De ce fait, les usagers pressés pourront utiliser cette voie moyennant paiement. Cette solution, généralement bien acceptée par les usagers, reste difficilement applicable dans les villes de France où la capacité des infrastructures n'a pas été et ne peut pas être ajustée en conséquence. Il faut en effet prendre en compte la taille même de la ville ainsi que la disponibilité de l'espace constructible pour la route alternative. Aux Etats-Unis, ce plan de péage est appelé "value pricing" (tarification de la valeur) car les usagers sont prêts à payer *plus* pour bénéficier d'un service de valeur supérieure. Dans certains cas (en Californie notamment), ces tarifications ont été créées en réaction à la sous-utilisation des « *HOV lanes* » (High Occupancy Vehicles) qui sont des voies réservées aux véhicules avec un ou plusieurs passagers³⁰.

Il convient enfin de signaler que dans les expériences existantes, les voiries à péages sont utilisées simplement comme alternative ; c'est à dire que les automobilistes ne projettent pas d'utiliser quotidiennement ces routes. Mais on note également un accroissement permanent du nombre d'usagers sur les voies rapides car celles-ci proposent en permanence un temps de trajet plus faible, un maximum de confort et un moindre taux d'accident. Par ailleurs, on remarque un changement de comportement chez les usagers pressés ayant une forte valeur de temps, qui partaient plus tôt ou plus tard de leur domicile (afin d'éviter l'encombrement de la période de pointe) avant que les voies alternatives payantes aient été mises en place. Maintenant, ils circulent en période de pointe en utilisant les routes à péage et effectuent ainsi le trajet domicile-travail en autant de temps qu'avant. Le nombre global d'usagers par jour n'a pas été modifié, il a simplement augmenté en période de pointe et diminué en période creuse ce qui nous permet de souligner que l'objectif premier de cette route à péage est de "*proposer un bien différent à des usagers pressés, [et que] le but visé ici n'est donc pas la réduction de la congestion, ni l'internalisation des externalités environnementales*" (M. REYMOND, 2003a, p. 39).

2.1.8. Les permis négociables : un droit à circuler ?

A l'heure des marchés de permis d'émissions sur les gaz à effet de serre, la question des droits à circuler est posée par quelques économistes. Notamment par Y. CROZET et G.

²⁹ Cf. les articles L153-1 à 6 du code de la voirie routière en annexe.

³⁰ Nous développerons ces expériences californiennes dans le Chapitre V.

MARLOT (2001), qui se fondent sur le principe de "*la protection du patrimoine collectif urbain*". Le principe est le suivant : les pouvoirs publics créent des permis à circuler en quantité égale à l'objectif recherché et alloue ces permis à chaque automobiliste. Ensuite les usagers peuvent se les vendre. Un permis correspondant à un trajet, "*les échanges entre usagers garantissent l'égalisation des coûts marginaux de réduction du nombre de déplacements entre les deux usagers*" (Id., p. 106).³¹

Dans leur travail, les auteurs soulignent que les permis seraient plus efficaces que le péage en terme de réduction de la congestion mais la difficulté principale résiderait dans les coûts de mise en œuvre.

2.2. Le choix du décideur face à l'acceptabilité publique

*2.2.1. Analyse comparative des différentes politiques d'internalisation*³²

Afin de mettre en valeur les différentes mesures présentées dans la première partie de cette section, nous allons présenter le degré d'importance qu'elles ont sur les effets escomptés (réduction de la congestion de pointe, réduction du trafic global, gain de temps en ville et accessoirement internalisation des externalités environnementales globales).

Concernant les impacts sur la congestion de « pointe », dans la mesure où ils sont variables dans le temps, le péage de congestion et la taxation kilométrique semblent être les meilleurs instruments, devant la politique de subvention des transports collectifs (qui génèrera un changement de mode de déplacement) et devant le péage de stationnement (qui même s'il est variable peut ne pas être optimal en raison des points évoqués au 2.1.2.). Les taxes sur les carburants et sur les véhicules n'ont qu'une influence minimale voire nulle, puisqu'elles ont un impact direct sur la vente de carburant et de véhicule. Enfin, la voirie payante (même si elle transfère une part de la demande de voirie) n'est pas une solution viable à long terme.

Le meilleur moyen de réaliser un gain de temps en ville est incontestablement la création de voiries payantes de première classe avec péage variable dans le temps garantissant la fluidité de la circulation. En résolvant efficacement les problèmes de

³¹ Sur ce sujet voir également la thèse de Grégoire MARLOT (2002).

³² En raison de la difficulté de mise en œuvre des permis négociables dans le milieu urbain et du peu de données sur la question, cet instrument n'a pas été pris en compte dans les comparaisons suivantes.

congestion, le péage de congestion (et à un moindre degré celui de stationnement) et la taxe kilométrique sont aussi très efficaces dans l'accroissement de la vitesse dans les zones concernées. En dehors des subventions pour les transports collectifs qui permettent de réduire le nombre d'automobilistes, les autres politiques n'ont pas d'effet sur le gain de temps en ville.

Pour avoir un impact important sur le trafic global, il est nécessaire que l'instrument tarifaire choisi soit étendu sur l'ensemble du territoire. C'est ainsi qu'une taxation kilométrique généralisée telle que la RPLP (cf. 2.1.5.) pourrait avoir un effet bénéfique sur la réduction de la circulation. Même si les péages urbains (de congestion et de stationnement) peuvent avoir un impact sur le trafic global en ville, il demeure faible dans le cas où ceux-ci sont variables et que le transfert opéré par les automobilistes n'est que temporel. A contrario, si le péage est uniforme dans le temps, l'effet escompté sera supérieur, le transfert ne sera plus temporel mais modal. Les autres taxes (sur carburants et sur les véhicules) ont pour leur part un impact indirect, mais non négligeable, quant à la réduction du trafic global.

A des niveaux différents, toutes les mesures présentées (en dehors des voiries payantes) ont un impact positif sur l'environnement mais il semble que les taxes sur les carburants et la taxe kilométrique (telle que la RPLP) respectent directement le principe du "pollueur-payeur". L'effet des taxes sur le carburant est fonction des modalités de dépendance de ces taxes au regard de la pollution effective de chaque véhicule. Dans ce cas les taxes sur les véhicules peuvent être très efficaces si elles dépendent des nuisances réelles produites par le véhicule. Les autres instruments ont des effets restrictifs sur le niveau de congestion ou de circulation sur des zones limitées, et sont donc des mesures indirectes d'internalisation des externalités environnementales.

A l'aide des travaux présentés par l'encyclopédie *Transportation Demand Management* (Victoria Transport Policy Institute, 2004) et par B. DE BORGER et al. (2001), le tableau 1 récapitule ce qui vient d'être présenté en notant de 0 à 5 l'efficacité des différents instruments sur chaque impact :

| Instruments tarifaires | Impacts sur la congestion de pointe | Gain de temps en ville | Impacts sur le trafic global | Impacts sur l'environnement |
|---------------------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| <i>Péage de congestion</i> | 5 | 4 | 2 (suivant l'étendue) | 2 (suivant l'étendue) |
| <i>Péage de stationnement</i> | 3 | 2 | 2 (suivant l'étendue) | 2 |
| <i>Taxes sur carburants</i> | 1 | 0 | 3 | 4 |
| <i>Taxes sur véhicules</i> | 0 | 0 | 2 | 2 |
| <i>Taxe kilométrique³³</i> | 5 | 4 | 4 (suivant l'étendue) | 4 (suivant l'étendue) |
| <i>Subvention des TC</i> | 4 | 2 | 2 | 3 |
| <i>Voies payantes</i> | 0 | 5 | 0 | 0 |

Tableau 1 : Les différents impacts des instruments tarifaires

2.2.2. Les impacts sur l'équité

Aussi efficaces soient-elles dans leurs objectifs recherchés, il n'en demeure pas moins que ces mesures sont perçues par les lobbies automobiles comme des atteintes à la liberté de se déplacer, et certaines politiques sont plus indolores que d'autres, mais parfois aussi plus « injustes ». Quatre questions peuvent se poser aux décideurs et aux usagers en terme d'équité allocative et redistributive :

- 1) L'auteur de la congestion est-il le payeur ? (principe du *pollueur-payeur* ou de l'*usager-payeur*)
- 2) Le payeur bénéficie-t-il des avantages de la politique d'internalisation ? (principe du *bénéficiaire-payeur*)

³³ La taxation kilométrique n'est pas la même si l'on souhaite réguler la circulation en ville (et gagner du temps), et si l'objectif est de réduire le trafic global (et les externalités environnementales). La première doit être zonale la seconde globale.

- 3) Ces instruments tarifaires traitent-ils de la même manière tous les citoyens ?
- 4) La taxation est-elle progressive avec le revenu ?

Concernant la première question, une tarification optimale de la congestion telle que les péages ou la taxe kilométrique respectent pleinement le principe du pollueur-payeur si les tarifs sont variables dans le temps. Les taxes sur les carburants s'inscrivent également dans cette logique d'internalisation des externalités environnementales, mais pas de la congestion. Les autres instruments n'ont pas de lien direct avec le principe du pollueur-payeur.

Dans toutes ces mesures le payeur apparaît plus ou moins bénéficiaire de la réforme mise en place (question 2). Il l'est directement et individuellement lorsqu'il jouit des voiries alternatives payantes (c'est un bien supérieur). Lorsqu'il s'acquitte d'un péage ou d'une taxe kilométrique, le payeur est directement et collectivement le bénéficiaire : quand la congestion diminue la circulation devient plus fluide et les résidents « profitent » d'une ville plus aérée. Enfin dans le cadre d'une taxation sur les carburants et sur les véhicules, le payeur apparaît comme bénéficiaire indirectement et collectivement. La réduction du trafic global entraîne une baisse de la pollution automobile, ce qui rend bénéficiaire toute la collectivité d'une telle politique.

Ensuite les instruments tarifaires ne traitent pas tous les usagers de la même façon (question 3) dans la mesure où ceux-ci ne sont pas égaux. Les employés ne pouvant pas modifier l'heure de départ de leur domicile seront plus affectés par un péage (de congestion ou de stationnement) de pointe que les automobilistes ayant des horaires flexibles et circulant en dehors de la période de pointe. Les taxes sur les carburants et sur les véhicules dépendent justement du carburant et du véhicule utilisés, donc les automobilistes ne sont pas traités de la même façon suivant les augmentations de telle ou telle taxe.

Enfin, les taxations sur les véhicules (telle que l'était la vignette par exemple) sont a priori progressives avec le revenu puisqu'elles taxent en fonction de la cylindrée du véhicule. Mais les taxes sur les carburants ne le sont pas forcément car certains vieux véhicules - détenus par les ménages les plus pauvres - consomment plus d'énergie. Concernant les autres instruments, cela dépend nécessairement des redistributions des recettes, il est donc difficile de tirer des conclusions sur ce point. De prime abord, le péage est socialement régressif car plus le revenu est bas et plus les automobilistes auront des chances d'être exclus financièrement (M. GLACHANT et B. BUREAU, 2004).

Le tableau 2 récapitule les réponses à ces questions en fonction de l'instrument choisi³⁴ :

| Instruments tarifaires | Principe du pollueur-payeur | Principe de bénéficiaire-payeur | Traitement égal des usagers | Taxation progressive avec le revenu |
|-------------------------------|---|--|------------------------------------|--|
| <i>Péage de congestion</i> | oui | oui et partagé | Oui et non | Non |
| <i>Péage de stationnement</i> | oui | oui et partagé | Oui et non | Non |
| <i>Taxes sur carburants</i> | non pour la congestion, oui pour la pollution | indirectement | Oui et non | oui et non |
| <i>Taxes sur véhicules</i> | - | indirectement | Oui et non | oui |
| <i>Taxe kilométrique</i> | oui | oui et partagé | Oui et non | Non |
| <i>Voies payantes</i> | non | oui | - | - |

Tableau 2 : Les impacts sur l'équité des instruments tarifaires

2.2.3. Le rôle du décideur : quelle mesure tarifaire choisir ?

A ces contraintes d'équité, nous pouvons ajouter celle de l'acceptabilité publique dans le choix de l'instrument tarifaire par le décideur. En effet, en vue d'une réélection, l'homme politique devra prendre des décisions en tenant compte de l'acceptabilité publique de la réforme. C'est dans ce cadre qu'apparaît l'importance d'une grande politique d'information et de communication.

Les problèmes d'équité et d'acceptabilité suscités par les différentes politiques d'internalisation de la congestion ne sont pas nécessairement liées les unes aux autres. Une politique inéquitable peut être relativement bien acceptée par le plus grand nombre de citoyens et cela à cause d'un manque d'information, par exemple. Une réforme attise

³⁴ Nous avons évincé la subvention des transports collectifs dans la mesure où cet instrument n'est pas contraignant pour les automobilistes puisque ce n'est ni une taxe ni un péage.

de nombreux débats et le décideur politique va devoir prendre en considération un certain nombre de paramètres : équité et acceptabilité publique en sont les principaux. Certaines mesures sont indolores car elles sont intégrées dans le prix final payé par l'automobiliste (c'est le cas des taxes sur les carburants) et demeurent relativement acceptées. En revanche, d'autres mesures telles que le péage de congestion ou de stationnement sont perçues simplement comme des taxes supplémentaires visant à remplir les caisses de l'Etat. Si l'objectif est clairement de réduire la congestion urbaine, les autorités pourront intégrer une visée environnementale dans la mesure tarifaire afin de la rendre plus acceptable aux yeux des riverains (en orientant les recettes vers la création de pistes cyclables, de parcs publics ou en instaurant des réductions tarifaires aux véhicules qui utilisent de l'énergie verte). Puis, pour la rendre plus équitable, elles pourront envisager d'orienter les recettes vers les transports collectifs afin de permettre aux automobilistes qui délaissent leur véhicule de ne pas subir un "coût de dérangement" trop important.

Le décideur harmonisera donc ces deux contraintes pour rendre plus acceptable son projet de régulation de la circulation en tenant compte également des contraintes de mise en oeuvre technique et financière (Figure 7).

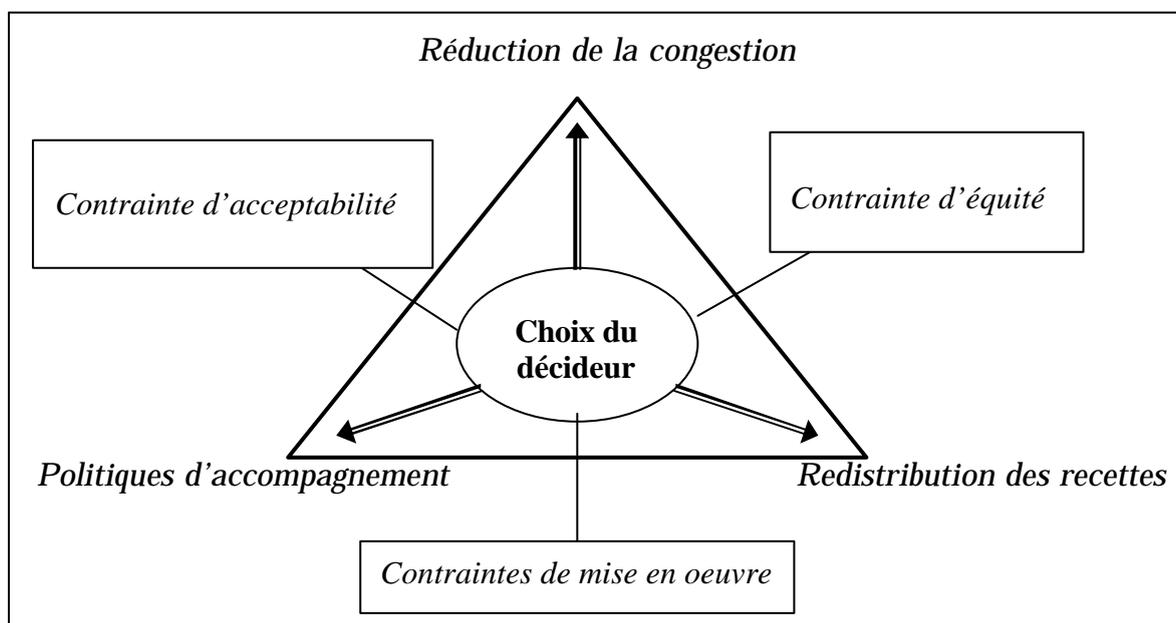


Figure 7 : Les choix du décideur face aux différentes contraintes

Se retrouvant face à plusieurs choix il devra prendre un risque politique pour mettre en œuvre une réforme d'internalisation de la congestion efficace, équitable et acceptable.

Contrairement à la plupart des autres instruments, *"la supériorité du péage réside dans sa capacité à gérer cette hétérogénéité [des automobilistes]."* (M. GLACHANT et B. BUREAU, p. 12, 2004). A ce sujet, Y. CROZET et G. MARLOT (2001, p. 103) rappellent toutefois que *"toute forme de tarification des déplacements a un double effet. Du fait de l'élasticité de la demande au prix, une partie des utilisateurs renonce à utiliser l'infrastructure, et de fait les conditions de circulation s'en trouvent améliorées pour les autres. De surcroît, le système de prix opère une discrimination entre les utilisateurs et les usages de l'automobile : seuls ceux qui valorisent l'usage de l'automobile au-delà du prix demandé continueront à utiliser leur véhicule."*

On peut alors suggérer d'instaurer des *"routes de première classe"* sur les grands axes de la ville afin de permettre aux usagers pressés de minimiser leur perte de temps. On peut aussi envisager de créer des parking-relais aux différentes voies d'accès de la ville et proposer le choix suivant aux usagers (M. REYMOND, 2003a) :

- soit l'automobiliste gare son véhicule (moyennant un frais de stationnement) et bénéficie d'un aller-retour gratuit en transport collectif ;
- soit l'automobiliste décide de conserver son véhicule pour accéder au centre ville et devra emprunter une route à péage modulable dans le temps. Si l'usager est accompagné, il sera en partie exonéré du péage.

Conclusion

Avec la circulation urbaine qui s'intensifie, les externalités de congestion et les externalités environnementales s'accroissent (section 1). Afin de les contrer, les autorités publiques sont ainsi amenées à prendre des dispositions rigoureuses, contre-productives, symboliques ou même insignifiantes parfois. Le champ des politiques publiques s'offrant au décideur est vaste et varié (section 2). Nous avons choisi de mettre en avant le péage de congestion qui permet une meilleure gestion de l'hétérogénéité des individus, sans être techniquement trop complexe à mettre en œuvre, contrairement à la tarification kilométrique ou au marché de droits.

Dans ce chapitre, différentes approches de la congestion ont été évoquées, et certains auteurs, tels que R. PRUD'HOMME, précisent que les coûts sociaux générés par la congestion automobile ne sont pas aussi élevés que ce que le laissent penser certains rapports officiels. Il apparaît important que les pouvoirs publics se fixent pour mission de fluidifier les réseaux routiers urbains. Pour ce faire, le péage de congestion variable dans le temps semble être la meilleure option.

ANNEXE DU CHAPITRE I

Code de la voirie routière

Section I : Dispositions générales

Article L153-1

L'usage des ouvrages d'art est en principe gratuit.

Toutefois, il peut être institué, à titre exceptionnel et temporaire, lorsque l'utilité, les dimensions et le coût d'un ouvrage d'art à comprendre dans la voirie nationale, départementale ou communale ainsi que le service rendu aux usagers le justifient, une redevance pour son usage.

En ce qui concerne la voirie communale, les ouvrages d'art doivent répondre aux conditions de dimension et de coût fixées par voie réglementaire.

Article L153-2

La convention par laquelle l'Etat concède la construction et l'exploitation d'un ouvrage d'art à comprendre dans la voirie nationale peut autoriser, dans les conditions définies par le cahier des charges, le concessionnaire à percevoir des redevances en vue d'assurer le remboursement des avances et dépenses de toute nature faites par l'Etat, l'exploitation et, éventuellement, l'entretien de l'ouvrage, ainsi que la rémunération et l'amortissement des capitaux investis par le concessionnaire.

La convention de concession et le cahier des charges sont approuvés par décret en Conseil d'Etat pris après avis des conseils généraux concernés lorsque ceux-ci participent au financement de l'ouvrage d'art ou que l'absence d'autres moyens de communication assurant à l'utilisateur un service de même nature rend l'ouvrage indispensable à la circulation locale.

Article L153-3

La perception d'une redevance sur un ouvrage d'art à comprendre dans la voirie départementale peut être autorisée par délibération du ou des conseils généraux concernés, en vue d'assurer soit la couverture des charges de remboursement des emprunts garantis ou contractés par le ou les départements pour la construction de l'ouvrage et pour l'aménagement de ses voies d'accès ou de dégagement, soit la couverture des charges d'exploitation et d'entretien, ainsi que la rémunération et l'amortissement des capitaux

investis par le concessionnaire qui assure l'exploitation de l'ouvrage d'art.

Article L153-4

L'acte administratif instituant une redevance sur un ouvrage d'art reliant des routes départementales peut prévoir des tarifs différents ou la gratuité selon les diverses catégories d'usagers pour tenir compte, soit d'une nécessité d'intérêt général en rapport avec les conditions d'exploitation de l'ouvrage d'art, soit de la situation particulière de certains usagers, et, notamment, de ceux qui ont leur domicile ou leur lieu de travail dans le ou les départements concernés.

Article L153-4-1

(inséré par Ordonnance n° 2001-273 du 23 mars 2001 art. 1 Journal Officiel du 31 mars 2001)

Les péages perçus sur les véhicules à moteur ou ensembles de véhicules couplés destinés exclusivement au transport de marchandises par route, et ayant un poids total en charge autorisé égal ou supérieur à 12 tonnes, sont appliqués sans discrimination directe ou indirecte en raison de la nationalité du transporteur ou de l'origine ou de la destination du transport.

Article L153-5

L'institution d'une redevance sur un ouvrage d'art à comprendre dans le domaine public routier communal est décidée par une délibération du conseil municipal qui doit satisfaire aux dispositions des articles L. 153-3 et L. 153-4. Elle est autorisée par décret en Conseil d'Etat.

Article L153-6

Les dispositions des articles L. 153-1 à L. 153-5 ne sont pas applicables aux ouvrages d'art compris dans l'emprise des autoroutes.

CHAPITRE II

LA TARIFICATION DE LA CONGESTION

PAR LE PEAGE :

UNE REVUE DE LA LITTERATURE

CHAPITRE II. LA TARIFICATION DE LA CONGESTION PAR LE PEAGE : UNE REVUE DE LA LITTERATURE

Introduction

Au cours du chapitre précédent, nous avons abordé pour la première fois la notion de péage de congestion. Cette notion remonte aux travaux de A. PIGOU (1920) puis a été développée par F. KNIGHT (1924), A. WALTERS (1961), W. S. VICKREY (1969). Ces travaux fondateurs se sont construits parallèlement aux idées de péage de financement de J. DUPUIT (1873) et de l'ingénierie française. Tout au long du chapitre II, nous allons approfondir cette présentation en exposant différents apports théoriques qui se rapportent au péage de congestion en revenant sur les modèles essentiels comme la « taxe pigouvienne », les modèles de flux, les modèles de files d'attente, et les différentes déclinaisons de l'hétérogénéité des individus. Cette section contenant exclusivement des travaux déjà présentés ne s'attardera pas toujours sur les modélisations. Le lecteur intéressé pourra se référer aux articles et ouvrages indiqués en bibliographie pour de plus amples informations.

La section 1 se borne à présenter les origines de la tarification de la congestion par le péage. Cela renvoie essentiellement aux principes du "*pollueur-payeur*" et à celui de "*l'utilisateur-payeur*". Dans la section 2, nous développerons les modèles théoriques de référence lorsque que le péage concerne une demande captive sur une seule route. Nous insisterons sur le modèle d'ARNOTT et al., qui nous servira de référence dans la partie II de la thèse consacrée à la redistribution des recettes lorsque deux modes de transports fonctionnent en parallèle. Enfin, la section 3 reviendra sur un cas particulier de tarification de second rang lorsque l'offre de déplacement se différencie. Nous étudierons la situation où les automobilistes sont confrontés à un choix d'itinéraire : soit une route payante et fluide, soit une route gratuite et encombrée.

Section 1. Les fondements théoriques du péage de congestion

Un retour rapide sur les concepts de surplus et de taxe pigouvienne permettra d'aborder les différents principes d'internalisation de la congestion et de préciser la notion de péage.

1.1. L'internalisation des externalités et l'apport de A. PIGOU (1920)

1.1.1. La taxe pigouvienne ou la solution fiscale de l'internalisation

Certains auteurs, dont A. PIGOU, considèrent la présence d'*externalités négatives* comme étant un échec du marché et proposent une intervention publique visant à réglementer ou sanctionner, via une taxe, les effets externes induits³⁵. A. PIGOU suggère d'évaluer monétairement les avantages et les inconvénients sans compensation pécuniaire. Ainsi, la prise en compte des externalités génère un coût social, qui est supérieur au coût privé³⁶.

Dans la figure ci-dessous, le point *E* correspond au point d'équilibre spontané du marché qui n'est pas optimal au sens de Pareto³⁷. Afin de combler l'écart entre le coût social et le coût privé, A. PIGOU propose de faire payer une taxe à l'émetteur de l'externalité, dont la valeur est égale à la différence entre le coût social et le coût privé ($E'-C$). Le prix du bien produit correspond alors au coût marginal social du bien : coût marginal privé + taxe. De fait, le producteur de l'externalité prendra conscience de la nuisance qu'il fait subir à la collectivité et sera incité à réduire les quantités produites. Selon le principe du *pollueur-payeur*, on passe alors de $Q0$ à $Q1$. Le point *E'* est alors le point d'équilibre optimal. La taxe pigouvienne permet, dans le principe d'internalisation des externalités, d'avoir une amélioration du bien-être au sens de Pareto.

³⁵ D'autres auteurs, comme R. COASE, plus sceptiques quant au rôle de l'Etat et aux solutions proposées par PIGOU, suggèrent de résoudre les effets pervers du marché en tenant compte des coûts de transactions entre les agents (exemple : le marché de droit). Pour R. COASE, la tarification au coût marginal social est insuffisante, car elle ne prend pas en compte le problème de la réciprocité : la responsabilité des dommages doit-elle uniquement être supportée par l'émetteur de l'externalité ?

³⁶ Inférieur dans le cas d'une externalité positive.

³⁷ Situation dans laquelle nulle personne ne peut améliorer son utilité sans entraîner la diminution de celle d'un autre.

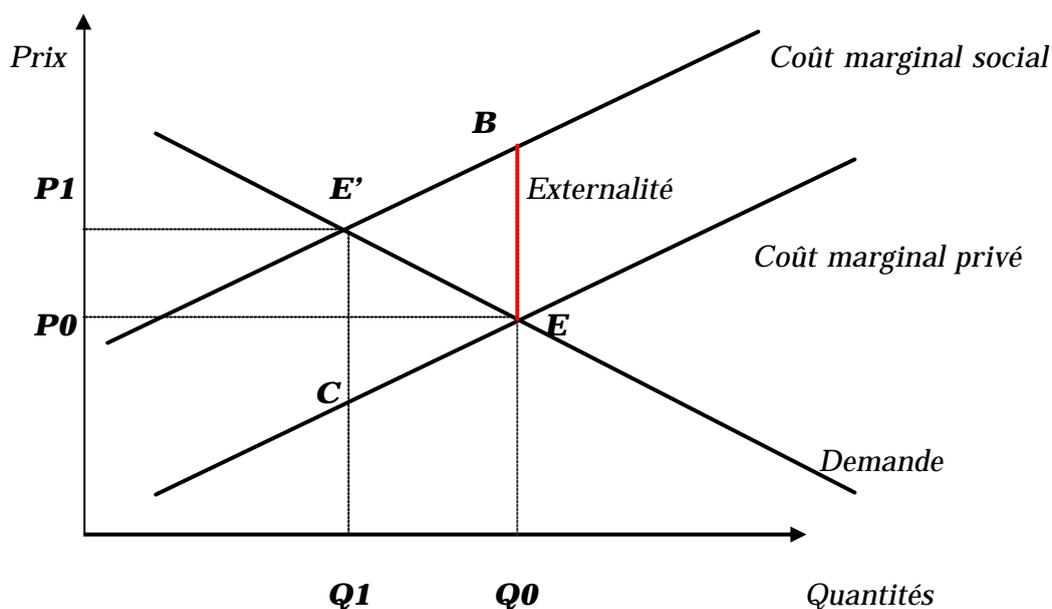


Figure 1 : Externalité, écart entre coût social et coût privé (Source : S. FAUCHEUX et J. F. NOËL, 1995)

1.1.2. La convergence PIGOU -VICKREY

Pour illustrer le principe de la taxe pigouvienne à la congestion automobile, prenons le cas d'un automobiliste marginal qui s'engage sur un itinéraire déjà encombré. Il fait supporter à chacun des autres utilisateurs de la route un surcoût. Afin de résorber ce coût marginal social de congestion, A. PIGOU envisage deux formes de péage. Premièrement, le **péage non monétaire** se caractérise par un péage sous la forme de la perte de temps. Les pouvoirs publics ne font rien pour résorber la congestion, et les automobilistes pressés dont la valeur du temps est la plus élevée, modifieront un de leurs critères de déplacement (itinéraire, mode, heure de départ). L'autre solution avancée par PIGOU est donc le **péage monétaire** présenté ici, et qui "pénaliserait, comme le rappelle P. H. DERYCKE (1997, p. 96), l'utilisateur au-delà d'une utilisation 'normale' de la voirie, c'est-à-dire quand l'utilisateur marginal ralentit le trafic. Ainsi se révélerait le 'vrai' prix d'usage de la route et les décisions de se déplacer se prendraient sur une base plus rationnelle."

Dans une brève modélisation (présentée par P. H. DERYCKE, 1997, p.97-98), nous allons déterminer le niveau du péage de congestion à partir des coûts marginaux sociaux.

Dans une situation inspirée de « l'interaction multiple » de VICKREY, on suppose une voirie simple sur laquelle la vitesse de base est v_0 et le temps de base pour parcourir

une unité de distance est t_0 . La congestion va entraîner un allongement du temps de déplacement avec $t > t_0$ et $v < v_0$, soit :

$$Dt = (t - t_0) = \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} \right) > 0$$

L'allongement du temps de déplacement est proportionnel à l'intensité du trafic n , soit, pour chaque automobiliste :

$$Dt = an^k \text{ avec } k \gg 1$$

Où k correspond à l'élasticité du coût marginal privé par rapport au flux du trafic.

Pour l'ensemble des automobilistes, la perte de temps totale est naturellement :

$$nDt = an^{k+1}$$

Le coût marginal qu'inflige l'automobiliste supplémentaire à l'ensemble des autres est alors :

$$CMS = d(nDt) / dn = (1 + k)an^k = (1 + k)\Delta t \quad (1)$$

Le temps de déplacement t peut être assimilé au coût marginal privé (*CMP*) de l'automobiliste. t tend vers zéro lorsque le trafic est parfaitement fluide et t_0 correspond au coût d'usage du véhicule à sa vitesse de base, c'est-à-dire à son coût moyen.

Ceci nous permet d'écrire la relation fondamentale de PIGOU :

$$CMS = CMP (1+k)$$

Le péage de congestion p^* (ou taxe pigouvienne) que l'on peut déduire de cette équation est égal à la différence entre *CMS* et *CMP* si $CMP < CMS$, sinon le péage n'a pas lieu d'exister. Ainsi :

$$\begin{cases} p^* = CMS - CMP = CMS (1+k) - CMP = k.CMP \text{ si } CMP < CMS & (2a) \\ p^* = 0 \text{ si } CMS \leq CMP & (2b) \end{cases}$$

1.2. Perte sociale et tarification

1.2.1. Utilité et surplus

Afin d'établir le niveau de taxation d'une externalité, il convient de donner une définition précise de l'utilité des individus par rapport à l'utilité d'une infrastructure. J. DUPUIT différencie ainsi l'utilité absolue et l'utilité relative, puis il différencie l'utilité des agents

et l'utilité d'une infrastructure : "Les voies de communications soulèvent une foule de questions économiques sur lesquelles on est loin d'être d'accord : questions de fait, questions de principes. Quelles sont les voies les plus avantageuses ? Comment doit se constater et mesurer leur utilité ? Qui doit en supporter les frais d'établissement ? Qui doit les exécuter ? Qui doit les exploiter ?" (J. DUPUIT, 1873, p. 847, cité dans L. BAUMSTARK et A. BONNAFOUS, 1997).

- L'utilité absolue correspond à la satisfaction que la consommation d'un bien ou d'un service procure à un agent. Celle-ci ne varie pas en fonction du temps.
- L'utilité relative est la différence entre le sacrifice qu'un acquéreur est prêt à consentir pour un bien ou un service et le prix qu'il doit payer.
- L'utilité absolue d'une infrastructure (par exemple, une route) est égale à la somme des utilités absolues des usagers.
- L'utilité relative d'une infrastructure est équivalente à la différence entre l'utilité absolue de l'infrastructure et les frais d'entretiens et intérêts du capital dépensés dans la construction.

Ainsi, lorsque le service public est gratuit et que la demande est satisfaite, le surplus du consommateur est maximum.

En contrepartie, il se peut que l'offre soit insuffisante pour satisfaire toute la demande. Or, pour que le bien-être du consommateur soit maximum, le gestionnaire de l'infrastructure, en l'occurrence une route, devrait proposer un péage minimum. Si le péage est nul, l'infrastructure risque d'être saturée. Alors, J. DUPUIT suggère d'instaurer un *péage économique pur* (P_{ep}) dont les tarifs sont modulables selon les capacités contributives des usagers. Cette longue citation explique le principe de segmentation de la clientèle : "Une passerelle est établie entre deux quartiers très peuplés d'une grande ville, elle a coûté 150 000 francs, le produit à raison de 0,05 franc par passage n'est que de 5000 francs ; c'est une mauvaise affaire, l'entrepreneur qui avait emprunté la plus grande partie des 150 000 francs ne pouvant payer les intérêts de cette somme est bientôt ruiné. Le pont est vendu à un homme intelligent qui étudie la fréquentation et cherche à augmenter son revenu. Il lui est défendu de relever son tarif, et d'ailleurs cette mesure, pas plus qu'un abaissement, n'accroîtrait suffisamment le produit, il est donc obligé

d'avoir recours à de nouvelles ressources. Il remarque que son pont réunit le quartier des manufactures à celui où logent les ouvriers ; matin et soir ces derniers sont obligés de faire un long détour pour se rendre à leur destination. Le pont abrège beaucoup la distance à parcourir, mais un sacrifice de 10 centimes par jour est beaucoup trop considérable eu égard à leur salaire ; en ne leur demandant que 2 centimes, pas un n'hésitera à se procurer cette satisfaction, et on obtiendra ainsi mille nouveaux passages quotidiens, qui à raison de 2 centimes produiront une recette journalière de 10 francs et 3000 francs pour les trois cents jours de travail de l'année. Il s'agit maintenant de faire cette recette supplémentaire sans réduire celle de 5000 francs que procure le tarif à 0,05 francs. C'est ici que l'imagination du spéculateur doit s'exercer. Le propriétaire du pont pourra insérer dans son tarif une clause ainsi conçue : pour le passant en casquette en blouse ou en veste, le péage est réduit à 0,01 francs. S'il est ainsi parvenu à définir d'une manière suffisante les ouvriers qu'il veut faire jouir de la réduction, il aura nécessairement la recette de 3000 francs que doivent donner les nouveaux passages ; mais il est très possible que la recette de 5000 francs soit diminuée d'une certaine somme, parce qu'un certain nombre de passants à 0,05 francs profiteront, grâce à leur costume, de la réduction qui ne leur est pas destinée. [...] On voit que cette réduction partielle du tarif ne donne pas au propriétaire tout ce qu'elle pourrait donner, il perd 1600 francs sur les anciens passants qui en profitent malgré lui. Or, par de nouveaux artifices, il pourra diminuer cette perte. Ainsi, il pourra stipuler que la réduction n'aura lieu que le matin et le soir aux heures d'ouverture et de fermeture des ateliers, ou qu'elle ne sera accordée qu'aux ouvriers porteurs de leur livret. Quelle que soit la combinaison adoptée, elle aura pour résultat d'augmenter d'autant plus le péage qu'elle distinguera mieux les passants qui attachent une utilité différente à l'usage du pont." (J. DUPUIT, 1849, cité dans L. BAUMSTARK et A. BONNAFOUS, 1997, pp. 6-7) Ici, il est montré qu'une discrimination totale permettrait de réduire la perte sociale à zéro. Le péage économique pur et le surplus des usagers sont traduits dans la figure 2.

De fait, lorsqu'un péage est instauré pour accéder à l'infrastructure, l'utilité de la route est réduite à cause de la perte d'utilité des usagers exclus. L'utilité collective peut alors varier avec la création du péage (L. BAUMSTARK et A. BONNAFOUS, id.):

$$\Delta U(p) = \Delta C(p) + \Delta R(p) - \int_0^1 T(p).dp \quad (3)$$

Où ΔC correspond à la variation de coût du système de transport entre la situation 0 et la situation 1 ;

Où ΔR représente la variation des recettes ;

Et où $-\int_0^1 T dp$ la variation du surplus des usagers, où T représente la quantité de service de transport consommé au prix p .

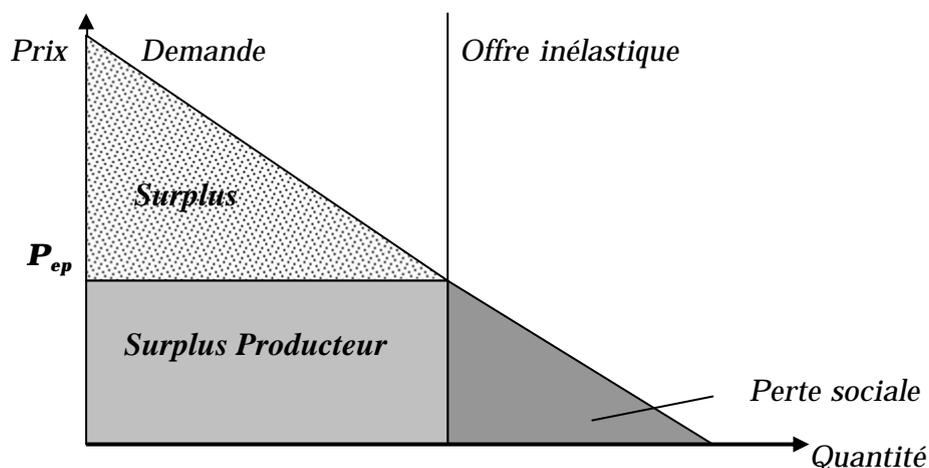


Figure 2 : Surplus des usagers : saturation, péage et perte sociale (Source : D. BOUF et Y. CROZET, 1992)

La finalité d'un péage devient différente selon la nature institutionnelle du gestionnaire :

- Si celui-ci est *public* alors l'objectif sera de *maximiser le bien-être* (utilité) des usagers sous la contrainte d'obtenir les ressources nécessaires pour construire l'infrastructure.
- S'il est *privé*, son but premier sera de *maximiser les recettes* indépendamment du niveau de l'utilité totale.

Ainsi, on peut analyser la perte sociale, ou perte de bien-être, comme étant égale à 0 avec une discrimination totale des usagers. Il est donc optimal d'établir une tarification supérieure pour les usagers captifs et inférieure pour les usagers peu captifs.

1.2.2. Tarification au coût marginal privé

En utilisant leur véhicule, les automobilistes subissent un coût individuel (essence, temps,...), mais supportent également des coûts collectifs (pollution, bruit, perte de temps infligés aux autres usagers,...) occultés par le péage économique pur (P_{ep}). Pour cette raison, de nombreux auteurs préconisent la mise en place d'une tarification au coût marginal privé ressenti, permettant d'avoir un niveau de trafic supérieur. Ainsi, le

passage du péage économique pur au péage au coût marginal privé (P_{cmp}) entraîne un gain de surplus comme le montre le graphique suivant :

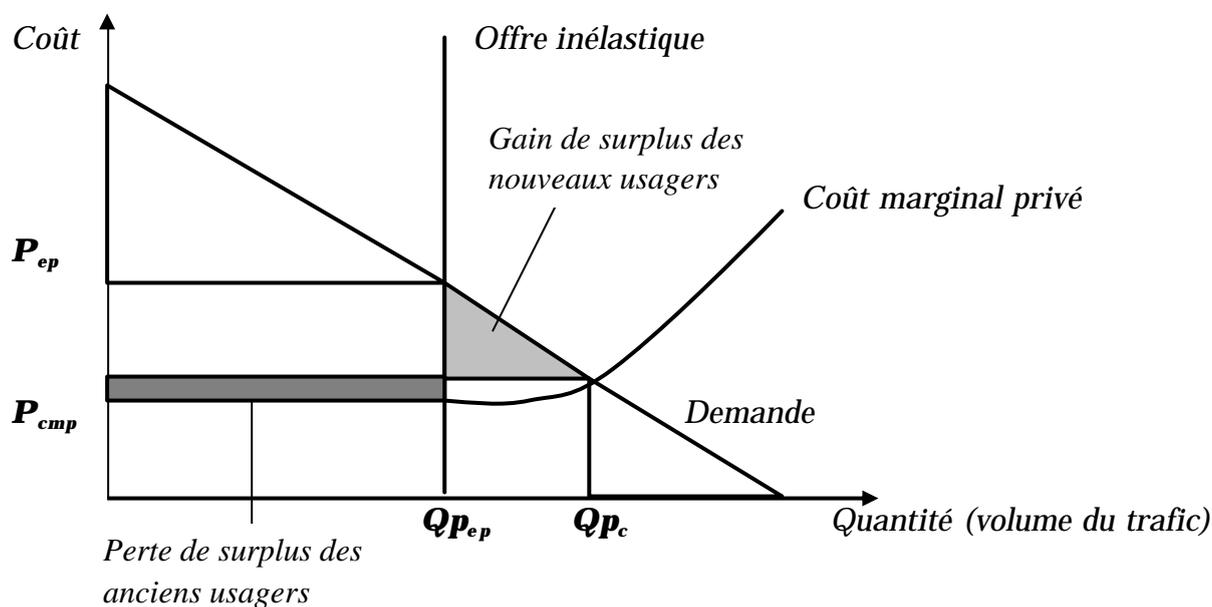


Figure 3 : Péage économique pur et péage au coût marginal privé (source : D. BOUF et Y. CROZET, 1992)

La tarification au coût marginal privé intègre une contrainte de coût pour les usagers : le coût individuel ressenti. Ainsi, plus ce coût est faible, plus le nombre de véhicules désirant emprunter la voie est important. Après avoir présenté les concepts d'internalisation de la congestion via le péage urbain, il convient de s'intéresser aux travaux théoriques effectués sur le sujet. Les modèles de base, indépendants du temps, présentés par R. LINDSEY et E. VERHOEF (1999, 2000), permettent de mieux percevoir les modèles dépendants du temps. Ils reflètent que de manière imparfaite la réalité du trafic puisqu'ils représentent un trafic stationnaire.

1.3. La tarification au coût marginal social dans les modèles indépendants du temps

Considérons une route reliant un point de départ (domicile) et un point d'arrivée (lieu du travail). Les usagers font les trajets seuls dans des véhicules identiques et les flux de trafic sont uniformes sur la route et sont indépendants du temps. Avec l'aide des travaux de A. PIGOU et en reprenant la figure 4, R. LINDSEY et E. VERHOEF (2000) établissent le graphique ci-dessous, où l'axe des abscisses correspond au volume de circulation (ici le

débit des véhicules) et l'axe des ordonnées représente les coûts de déplacement (usure du véhicule, consommation de carburant, réduction de la vitesse, péage éventuel).

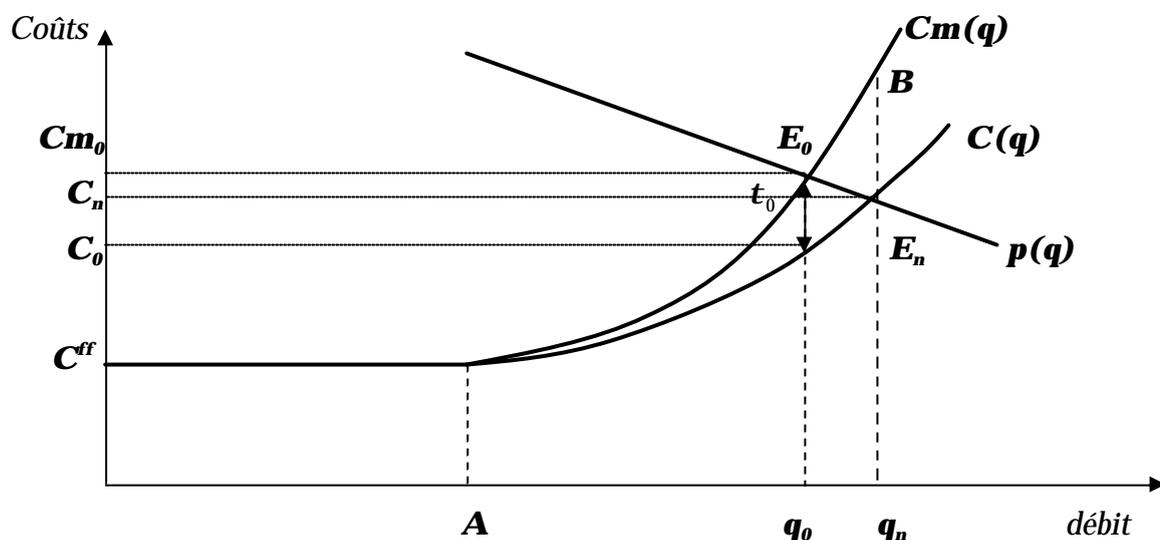


Figure 4 : Péage optimal dans le modèle indépendant du temps (Source : R. LINDSEY et E. VERHOEF, 2000)

Lorsque le débit sur la route est faible, la courbe des coûts de déplacement $C(q)$ est analogue à celle des coûts supportés en circulation fluide ("free-flow cost") notée C^{ff} . Quand la circulation devient plus abondante, des phénomènes de congestion se développent et entraînent une chute de la vitesse de circulation. Sur la figure 4, la pente de $C(q)$ augmente. Ensuite, une courbe de demande $p(q)$ peut être ajoutée : cela représente la quantité de déplacements demandée par unité de temps. Cette courbe correspond à la partie inférieure de la courbe coûts/débit de la figure 4 du chapitre précédent. La pente de $p(q)$ est négative car lorsque le coût de déplacement augmente, le nombre d'automobilistes souhaitant circuler diminue. Ainsi l'équilibre "sans péage" se situe à l'intersection entre $C(q)$ et $p(q)$ avec un flux de circulation q_n et un coût C_n . Le gain social est situé dans la zone en deçà de $p(q)$; $C(q)$ représente le coût moyen social d'un voyage ; $Cm(q)$ mesure le coût marginal d'un déplacement pour un voyageur (les externalités autres que la congestion, telles que la pollution ou les accidents, ne sont pas prises en compte). Dans ce contexte, le coût total social pour q véhicules est :

$$CT(q) = C(q) \cdot q \tag{4}$$

Le coût marginal pour un déplacement supplémentaire se mesure de la manière suivante :

$$Cm(q) = \frac{CT(q)}{q} = C(q) + q \cdot \frac{C(q)}{q^2} \quad (5)$$

L'optimum social est représenté sur la figure 4 par l'intersection entre $Cm(q)$ et $p(q)$, où la disposition marginale à payer les déplacements est Cm_0 et le nombre de déplacements, q_0 , est moins élevé qu'à l'équilibre "sans péage". L'équilibre est Pareto-optimal si l'on oblige les voyageurs à payer un prix total de Cm_0 , car le coût d'un trajet correspond à la somme des coûts individuels de déplacement et du péage requis t_0 (taxe pigouvienne).

$$t_0 = Cm(q_0) - C(q_0) = q_0 \cdot \frac{C(q_0)}{q_0^2} \quad (6)$$

Où $q_0 \cdot \frac{C(q_0)}{q_0^2}$ est le coût marginal de congestion imposé par un usager aux autres.

La congestion peut cependant demeurer avec l'existence d'un péage comme cela est indiqué sur la figure 4, C_0 étant supérieur au coût de circulation fluide C^{ff} . Le gain obtenu grâce à un péage optimal correspond à l'augmentation du surplus social, qui est défini par la réduction des coûts totaux moins la réduction des avantages totaux acquis avec la diminution du trafic. Le gain est mesuré par la zone ($E_0 E_n B$) sur la figure 4. Les ressources obtenues avec le péage, $q_0 \cdot t_0$, représentent un transfert financier des usagers vers la collectivité. Le nombre d'usagers q_0 qui continuent à voyager subit une augmentation de coût de $(Cm_0 - C_n)$. Et les $q_n - q_0$ usagers qui arrêtent de se déplacer ont une perte de surplus qui s'étend de 0 pour l'utilisateur q_n à $Cm_0 - C_n$ pour l'utilisateur supplémentaire après q_0 . Dans cette optique, le décideur peut envisager un mode de transport alternatif afin de ne pas léser ces groupes d'automobilistes.

Section 2. Tarification et répartition optimale de la circulation : les modèles de référence

Au cours de cette section, nous présentons les modèles de référence en matière de tarification de la congestion. Nous insisterons sur les oppositions entre les modèles de flux et de files d'attente.

2.1. Modèles de flux *versus* modèles de files d'attente

Il importe maintenant de centrer notre analyse sur la répartition temporelle du trafic automobile. Pour ce faire, il convient d'analyser les comportements de choix d'horaires de déplacement des automobilistes. Ainsi, les usagers articulent leurs choix de déplacement entre le *temps-durée* et le *temps-horaire*. En introduisant le concept de temps-horaire, K. SMALL (1982) démontre que les individus supportent deux types de coûts dans le déplacement domicile-travail. Un coût est lié au temps effectivement employé pour effectuer le trajet et un coût d'horaire résulte d'un retard ou d'une attente sur le lieu de travail. C'est à dire que certains individus peuvent avoir une forte ou faible contrainte de temps et une faible ou forte contrainte d'horaire. Par exemple, grâce à des horaires flexibles, les cadres supérieurs, qui ont une forte contrainte de temps, évitent les encombrements en arrivant en avance ou en retard à leur lieu de travail (faible contrainte horaire). De ce fait, les usagers vont choisir entre les *coûts du temps* de déplacement (temps perdu dans les embouteillages) et les *coûts d'horaire* dus à l'attente sur le lieu de travail (*coûts d'avance*) ou dus à la perte salariale suite au retard (*coûts de retard*). "*Cette alternative, rappelle F. MIRABEL (1996, p. 372), entre coûts du temps et coûts d'horaire est au cœur de la rationalité des individus et représente le soubassement des analyses sur les problèmes de concentration temporelle du trafic*".

Concepts théoriques des variations du niveau de trafic dans le temps :

X. CHU (1995) a comparé les deux principaux modèles³⁸ de la congestion du trafic – modèle de flux et modèle de files d'attente, distinction qui s'effectue à partir de la *capacité d'écoulement de la voirie (K)* :

³⁸ Ces modèles sont basés sur le concept de l'équilibre de Nash : "*chaque usager supposé rationnel choisit l'heure à laquelle il quitte son domicile en supposant que chacun des autres utilisateurs agit de même*" (F. MIRABEL, 1996, p.446).

- en dessous de K , la vitesse est liée négativement au débit ; nous sommes dans la situation des modèles de flux de trafic développés par J. HENDERSON et X. CHU. Ce type de congestion correspond à la situation dans laquelle la vitesse diminue lorsque le débit augmente (cf. la figure 3 du Chapitre I) ;
- à partir du moment où le débit atteint K , une file d'attente se forme et le flux d'automobiles est limité par la capacité d'écoulement de la voirie ; nous sommes dans la situation des modèles de files d'attente ou de goulots d'étranglement développés en premier lieu par W.S. VICKREY (1969), puis approfondis par R. ARNOTT, A. DE PALMA et R. LINDSEY (1990a, 1993, 1998). Dans ce cas, le débit est constant et égal à la capacité d'écoulement de la voirie.

2.1.1. Le modèle temporel de flux reformulé par X. CHU (1995)

Le modèle de flux a été développé par J. HENDERSON (1974, 1981, 1992) dont les travaux ont été étayés par X. CHU (1995, 1999)³⁹.

2.1.1.1. Présentation du modèle

Soient N individus⁴⁰ effectuant un trajet de longueur L et ayant un horaire de début de travail t_0 identique. Les usagers choisiront leurs horaires d'arrivée t pour minimiser le coût privé de déplacement $C(t)$, compte tenu des coûts d'horaires C_h et des coûts de temps de trajet C_t . Ainsi :

$$C(t) = C_t(t) + C_h(t) \tag{7}$$

³⁹ Dans la version reformulée du modèle par X. CHU (1995), l'auteur revient aussi sur les hypothèses contradictoires et incohérentes d'HENDERSON. Il propose alors une reformulation des hypothèses du modèle : "en supposant que le temps de déplacement pour un usager est déterminé par le flux des arrivées lorsqu'il parvient sur son lieu de travail au lieu d'être déterminé par le flux des départs lorsqu'il quitte son domicile." (X. CHU, 1995, p.326).

⁴⁰ Les N individus représentent la population de la ville. Cette taille est une donnée exogène et l'on considère que la ville est **fermée** (aucune connexion avec les autres villes). Ce concept renvoie à une situation où N est fixe, donc à une **analyse de court terme**.

Le temps de déplacement subi par chaque usager est égal au rapport de la distance L parcourue sur la vitesse $V(t)$:

$$C_t(t) = aL / V(t) \tag{8}$$

Où a est le coût unitaire du temps de déplacement.

Concernant le coût d'horaire, les usagers peuvent subir soit un coût d'avance C_a , soit un coût de retard C_r . Ainsi :

$$C_h(t) = \begin{cases} C_a = \beta(t_0 - t) & \text{si } t_1 = t = t_0 \\ C_r = u(t - t_0) & \text{si } t_0 = t = t_2 \end{cases} \tag{9}$$

Où t_0 représente l'heure de l'automobiliste qui arrive exactement à l'heure sur son lieu de travail, t_1 représente l'heure du premier arrivé et t_2 l'heure du dernier arrivé. Et avec β qui représente le coût unitaire d'avance sur le lieu de travail et u le coût unitaire de retard sur le lieu de travail.

Le coût privé de déplacement d'un individu qui arrive sur son lieu de travail au temps t s'écrit de la manière suivante :

$$C(t) = aL / V(t) + \begin{cases} \beta(t_0 - t) + t(t) & \text{si } t_1 = t = t_0 \\ u(t - t_0) + t(t) & \text{si } t_0 = t = t_2 \end{cases} \tag{10}$$

Où $t(t)$ représente un péage éventuel.

Ensuite, il est nécessaire de déterminer l'expression de la vitesse par rapport au nombre d'arrivées sur le lieu de travail $A(t)$ par heure et en fonction de la capacité d'écoulement de la voirie K . Ainsi d'après X. CHU (1995) :

$$T(t) = \frac{1}{V(t)} = \frac{1}{V_{max}} + \left(\frac{A(t)}{K} \right)^g \tag{11}$$

Où $T(t)$ représente le temps mis pour effectuer 1 km, g correspond à l'élasticité du temps de déplacement par rapport au taux d'arrivée $A(t)$.

2.1.1.2. L'équilibre sans péage

X. CHU rappelle qu'à l'équilibre, trois conditions sont vérifiées :

- les usagers qui arrivent en t_1 ou en t_2 ne sont victimes d'aucun ralentissement de la circulation :

$$\begin{cases} C(t_1) = \mathbf{a} T_L + \beta(t_0 - t_1) \\ C(t_2) = \mathbf{a} T_L + \mathbf{u} (t_2 - t_0) \end{cases} \quad (12)$$

Où T_L représente le temps de déplacement en circulation fluide.

- de plus, les coûts privés de déplacement sont égaux quelle que soit l'heure d'arrivée :

$$C(t_1) = C(t_2) \quad (13)$$

- enfin, les (N) individus arrivent entre t_1 et t_2 :

$$\int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = N \quad (14)$$

A partir des conditions (12), (13) et (14), il est possible de déduire le coût subi par chaque automobiliste à l'équilibre en tenant compte des heures d'arrivée sur le lieu de travail :

$$\begin{aligned} t_1 &= t_0 - \mathbf{y} \mathbf{a} / \beta \\ t_2 &= t_0 + \mathbf{y} \mathbf{a} / \mathbf{u} \\ C_e(t) &= \mathbf{a} T_L + \mathbf{a} \mathbf{y} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{Où } \mathbf{y} = \left(\frac{N(1+\mathbf{g}) \mathbf{d}}{\mathbf{g}K} \frac{1}{\mathbf{a}} \right)^{\mathbf{g}/(1+\mathbf{g})}$$

A l'aide de ces calculs, J. Henderson puis X. CHU (1995) déduisent les coûts agrégés à l'équilibre subis par l'ensemble des usagers :

- Coût total de déplacement à l'équilibre :

$$CT_e = N(\mathbf{a} T_L + \mathbf{a} \mathbf{y}) \quad (16)$$

- Coût agrégé de congestion (perte de temps totale dans les embouteillages pour l'ensemble des automobilistes) :

$$CTA_e = \int_{t_1}^{t_2} aA(t) \left[\frac{L}{V(t)} - T_L \right] dt = aNy \frac{1+g}{1+2g} \quad (17)$$

- Coût agrégé d'horaires (coût total d'une arrivée en avance ou en retard pour l'ensemble des automobilistes) :

$$CTH_e = \int_{t_1}^{t_0} bA(t) (t_0 - t) dt + \int_{t_1}^{t_0} uA(t) (t - t_0) dt = aNy \frac{g}{1+2g} \quad (18)$$

- Coût agrégé variable du déplacement (somme du coût total de congestion et du coût total d'horaires) :

$$CTV_e = CTA_e + CTH_e = aNy \quad (19)$$

2.1.1.3. La tarification optimale

Les autorités gestionnaires du réseau cherchent à minimiser le coût social (**CS**) de déplacement subi par la collectivité, sous contrainte que les usagers arrivent entre t_1 et t_2 . Pour cela, elles déterminent le niveau des arrivées sur le lieu de travail :

$$\min_{A(t)} (CS) = \int_{t_1}^{t_0} A(t) \left[a \frac{L}{V(t)} + b(t_0 - t) \right] dt + \int_{t_0}^{t_2} A(t) \left[a \frac{L}{V(t)} + u(t - t_0) \right] dt \quad (20)$$

$$s/c \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = N$$

Posons λ comme étant le multiplicateur de Lagrange associé à cette contrainte et qui représente le coût marginal social d'une arrivée en t . De fait, la condition du premier ordre s'écrit :

$$\lambda = \begin{cases} aL/V(t) + b(t_0 - t) + aA(t) \frac{\partial L}{\partial V(t)} \frac{1}{A(t)} & \text{si } t_1 = t = t_0 \\ aL/V(t) + u(t - t_0) + aA(t) \frac{\partial L}{\partial V(t)} \frac{1}{A(t)} & \text{si } t_0 = t = t_2 \end{cases} \quad (21)$$

Pour que cette condition d'optimalité soit vérifiée, les autorités peuvent faire payer à chaque automobiliste le coût social qu'il fait subir à la collectivité. Nous pouvons, à partir des équations (10) et (21), déduire la valeur du péage fixée par le gestionnaire du réseau :

$$t(t) = aA(t) \frac{\partial \hat{e} \frac{L}{V(t)} \hat{u}}{\partial A(t)} \quad \text{avec } t_1 = t = t_2 \quad (22)$$

$$t(t) = a g [-T_L + L/V(t)] \quad (23)$$

De la même façon qu'à l'équilibre sans péage, et d'après la relation (23), les coûts agrégés subis par l'ensemble des usagers sont alors :

- Coût agrégé de déplacement à l'équilibre :

$$CT_o = N \left(aT_L + ay(1+g)^{\frac{1}{1+g}} \right) \quad (24)$$

- Coût agrégé de congestion :

$$CTA_o = \int_{t_1}^{t_2} aA(t) \frac{\partial \hat{e} \frac{L}{V(t)} \hat{u}}{\partial A(t)} - T_L \hat{u} dt = aNy \frac{(1+g)^{\frac{1}{1+g}}}{1+2g} \quad (25)$$

- Coût agrégé d'horaires :

$$CTH_o = \int_{t_1}^{t_0} bA(t)(t_0 - t) dt + \int_{t_0}^{t_2} nA(t)(t - t_0) dt = aNy \frac{g}{1+2g} (1+g)^{\frac{1}{1+g}} \quad (26)$$

- Coût agrégé variable du déplacement :

$$CTV_o = CTA_o + CTH_o = aNy \frac{g}{1+2g} (1+g)^{\frac{1}{1+g}} \quad (27)$$

Sans la création d'un péage de congestion, la trajectoire temporelle des arrivées sur le lieu de travail est concentrée autour de t_0 . Au contraire avec l'instauration d'un péage $t(t)$ variable dans le temps, la trajectoire des arrivées est plus étalée dans le temps (entre t_1 et t_2). Ainsi, " la politique optimale des pouvoirs publics serait d'"étaier" la période de pointe du trafic, soit en limitant en chaque instant le nombre d'arrivées sur le

lieu de travail (politique de type réglementaire), soit en instaurant un péage temporel reflétant les véritables coûts sociaux que chaque utilisateur fait subir à la collectivité (politique de type tarifaire incitative)." (F. MIRABEL, 1996, p. 388).

2.1.2. Les modèles de files d'attente

Suite aux travaux fondateurs de W.S. VICKREY (1969), les modèles de files d'attente (ou goulots d'étranglement) ont été notamment approfondis par R. ARNOTT et al. (1990a, 1993, 1998), et par T. TABUCHI (1993).

2.1.2.1. Présentation du modèle (d'après ADL, 1990a, 1993)

Dans le cas où la capacité d'écoulement K de la voirie est inférieure à la demande des automobilistes, une file d'attente se crée et la circulation s'écoule lentement : au rythme de la capacité d'écoulement K de la voirie. Dans le cas contraire, si le nombre de véhicules est inférieur à K , alors la circulation est fluide et le temps de déplacement des automobilistes est faible. Ainsi les usagers peuvent choisir entre :

- pénétrer dans la file d'attente avec des coûts élevés de déplacement
- retarder le départ avec des coûts de retard
- partir plus tôt du domicile avec des coûts d'attente

Le modèle est dynamique et l'information et l'évolution des prix peuvent alors modifier les coûts et la longueur de la file d'attente.

Soient N individus qui effectuent un trajet domicile-travail, sur une route fluide sauf en un point de rétrécissement de la voie. Si la cadence des arrivées au goulot d'étranglement est supérieure à K et s'il est impossible de doubler, alors une file d'attente se développe⁴¹.

Le temps de déplacement domicile-travail se définit donc de la façon suivante⁴² :

$$T(t) = T_f(t) + T_v(t) \quad (28)$$

⁴¹ Ce modèle correspond au principe du "premier arrivé, premier servi" (first-come, first-served).

⁴² Contrairement au modèle précédent, t représente maintenant l'heure de départ et non plus l'heure d'arrivée.

Où $T_f(t)$ est le temps de voyage fixe et $T_v(t)$ le temps de voyage variable.

Pour simplifier, les auteurs posent $T_f(t) = 0$ de sorte que le trajet effectué par les individus soit constamment congestionné. Ce qui permet de nous intéresser au délai d'attente d'un individu lorsqu'il atteint la file d'attente :

$$T(t) = T_v(t) = D(t)/K \quad (29)$$

Où $D(t)$ correspond à la longueur de la file d'attente lorsque l'individu quitte son domicile en t .

$D(t)$ correspond en fait au nombre cumulé des arrivées au niveau du goulot d'étranglement entre \hat{t} et t moins le nombre de véhicules qui ont déjà franchi le bouchon entre \hat{t} et t ($D(t)$ représente en fait la longueur de la file d'attente en t) :

$$D(t) = \int_{\hat{t}}^t r(u)du - K(t - \hat{t}) \quad (30)$$

Où \hat{t} correspond au dernier instant avant l'apparition de la file d'attente, et où $r(t)$ représente le taux des départs du domicile à l'heure t .

L'heure de départ du domicile (\tilde{t}) d'un individu qui arrive à l'heure (en t_0) sur son lieu de travail s'écrit :

$$\tilde{t} = t_0 - T_v(\tilde{t}) \quad (31)$$

Si l'automobiliste quitte son domicile en $t < \tilde{t}$, il arrive alors en avance sur son lieu de travail (avec un temps d'attente de $t_0 - t - T_v(t)$). Dans le cas contraire, si l'automobiliste quitte son domicile en $t > \tilde{t}$, il arrive en retard au travail (avec un temps de retard de $t + T_v(t) - t_0$).

De la même façon que le modèle de flux, le coût total privé correspond à la somme du coût du temps de déplacement et du coût d'horaire. Ainsi :

$$C(t) = \begin{cases} \mathbf{a} T(t) + \beta(t_0 - t - T(t)) + \mathbf{t}(t) & \text{si } t + T(t) = t_0 \\ \mathbf{a} T(t) + \mathbf{g}(t + T(t) - t_0) + \mathbf{t}(t) & \text{si } t + T(t) > t_0 \end{cases} \quad (32)$$

Où \mathbf{a} est le coût unitaire du temps de déplacement, β représente le coût unitaire d'avance sur le lieu de travail et \mathbf{g} le coût unitaire de retard sur le lieu de travail. Où $\mathbf{t}(t)$ représente l'éventuel péage.

Les résultats empiriques de K. SMALL (1982) montrent que $\mathbf{g} > \mathbf{a} > \beta$, ce qui garantit l'existence d'un équilibre unique. ARNOTT et al. (1985) démontrent que lorsque $\mathbf{a} < \beta$ il existe une multiplicité d'équilibres.

2.1.2.2. L'équilibre sans péage

L'équilibre est obtenu quand aucun individu ne peut diminuer son coût de voyage en modifiant son heure de départ, en prenant en compte que tous les autres départs sont fixes.

Soit t_1 correspondant au début de l'heure de pointe, t_2 correspondant à la fin. Pour les automobilistes qui arrivent en avance [$t \hat{I} (t_1, \tilde{t})$], le prix d'équilibre d'un trajet est :

$$p(t) = a T(t) + \beta[t_0 - t - T(t)] \quad (33a)$$

Pour les automobilistes qui arrivent en retard [$t \hat{I} (\tilde{t}, t_2)$], le prix d'équilibre d'un trajet est :

$$p(t) = a T(t) + g [t + T(t) - t_0] \quad (33b)$$

Et le taux des départs du domicile s'écrit :

$$r(t) = \frac{aK}{a - b} \quad \text{pour } t \in (t_1, \tilde{t}) \quad (34)$$

$$r(t) = \frac{aK}{a + g} \quad \text{pour } t \in (\tilde{t}, t_2) \quad (35)$$

La longueur de la file d'attente augmente sur la période (t_1, \tilde{t}) et diminue sur la période (\tilde{t}, t_2) . A présent déterminons les horaires t_1 , t_2 et \tilde{t} :

$$t_1 = t_0 - \frac{g}{(b + g)} \left(\frac{N}{K} \right) \quad (36)$$

$$t_2 = t_0 + \frac{b}{(b + g)} \left(\frac{N}{K} \right) \quad (37)$$

$$\tilde{t} = t_0 - \left(\frac{b}{a} \right) \left(\frac{g}{b + g} \right) \left(\frac{N}{K} \right) \quad (38)$$

Avant l'heure \tilde{t} , le taux des départs est supérieur à la capacité d'écoulement de la voirie, ce qui entraîne une file d'attente ne se résorbant qu'en fin de période (en t_2).

Ainsi, de la même façon que pour le modèle de flux, nous pouvons déterminer les différents coûts à l'équilibre subis par les usagers.

- Coût agrégé de déplacement à l'équilibre :

$$CT_e = \left(\frac{N^2}{K} \right) \frac{bg}{b+g} \quad (39)$$

- Coût agrégé de congestion :

$$CTA_e = \left(\frac{N^2}{K} \right) \frac{bg}{2(b+g)} \quad (40)$$

- Coût agrégé d'horaires :

$$CTH_e = \left(\frac{N^2}{K} \right) \frac{bg}{2(b+g)} = CTA_e \quad (41)$$

- Coût agrégé variable du déplacement :

$$CTV_e = CTA_e + CTH_e = 2 \left(\frac{N^2}{K} \right) \frac{bg}{2(b+g)} \quad (42)$$

2.1.2.3. La tarification optimale

Nous supposons à présent qu'un gestionnaire de réseau recherche l'optimum social au sens de Pareto. Il va donc instaurer un péage de sorte que le coût social subi par la collectivité soit minimum.

ARNOTT et al. (1990a, 1993) montrent que la situation optimale, lorsque le coût total variable du déplacement est minimum, correspond à l'absence de file d'attente. Ainsi, la vitesse demeure constante : $V(t) = L/T_L$.

Les auteurs déterminent aussi qu'à l'optimum social, le coût agrégé d'horaire et le coût privé de déplacement sont les mêmes que dans la situation sans péage. Le coût agrégé variable est quant à lui divisé par deux par rapport à sa valeur initiale (sans péage). Ainsi :

$$CT_o = CTH_o = \frac{\alpha N^2 \ddot{d}}{\xi K \dot{\theta}^2} \quad (43)$$

$$\text{Avec } d = \frac{bu}{b+u}.$$

- Le coût moyen de déplacement par usager s'écrit :

$$C_o = CT_o / N = \frac{d}{K} \frac{N^2}{2} \quad (44)$$

- Le coût marginal social pour un automobiliste est :

$$Cm_o = \left(\frac{N}{K} \right) d = 2C_o \quad (45)$$

L'optimum social peut alors être obtenu à l'aide d'un péage variable entre t_1 et t_2 (**péage de pointe** : *fine toll*) qui entraîne un coût total de déplacement lié à la congestion (CTA_o) égal à 0 :

$$t(t) = \begin{cases} \frac{dN}{K} - b[t_0 - t - T_L] & \text{si } t_1 = t = t_0 \\ \frac{dN}{K} - g[t - t_0 + T_L] & \text{si } t_0 = t = t_2 \end{cases} \quad (46)$$

2.1.2.4. Tarifications alternatives

Le péage de pointe nécessite une variabilité des tarifs permanente et apparaît donc difficilement réalisable. Ainsi les autorités peuvent mettre en place d'autres types de tarification, plus malléables.

- **Le péage uniforme** (*uniform toll*)

Un péage uniforme ajoute des coûts constants à chaque trajet et ne modifie donc pas la configuration de l'ordre des départs du domicile. Toutefois, il agit sur le nombre de déplacements total et entraîne une diminution de N . Les coûts agrégés avec un péage uniforme s'écrivent ainsi :

- Le coût agrégé de déplacement :

$$CT_u = \left(\frac{N^2}{K} \right) d \quad (47)$$

- Le coût moyen de déplacement :

$$C_u = CT_u / N = \left(\frac{N}{K} \right) d \quad (48)$$

- Le coût marginal social :

$$Cm_u = dCT_u / dN = 2 \left(\frac{N}{K} \right) d = 2C_u \quad (49)$$

- Le prix du trajet est alors fixé au coût marginal social :

$$P_u = Cm_u = C_u + t_u \quad (50)$$

Dans ce cas, d'après les relations (48) et (50), le péage uniforme imposé aux usagers est égal au coût moyen de déplacement : $t_u = C_u$

- Le péage uniforme durant la période de pointe (coarse toll)

Le péage uniforme pendant la période de pointe est plus efficient qu'un péage uniforme puisqu'il interfère sur les horaires de départ des usagers. En contrepartie, il n'élimine pas complètement la file d'attente. Arnott et al. (1993) déterminent le coût total de déplacement que R. DANIELIS et E. MARCUCCI (1998) notent :

$$CT_b = \frac{\alpha y d N^2 \delta}{\xi K \theta} \quad (51)$$

Où $y = \frac{1}{4} \left[3 - \frac{(u - a b)}{(b + u)(a + u)} \right]$ et où a est le coût unitaire du temps de déplacement.

Concernant la valeur de ce péage, ARNOTT et al. (1990a) l'expriment aussi :

$$t_b = C_b = \frac{y d N}{K} \quad (52)$$

2.1.2.5. Comparaison des différents régimes (sans péage, pointe, uniforme et uniforme durant la période de pointe)

Nous pouvons alors définir une fonction d'offre de déplacement avec les différents régimes de péages, en posant $j = e, o, u, b$. Ainsi :

$$p_j(N, K) = C_j + t_j \quad (53)$$

Où :

$$t_j = C_j$$

et :

$$C_j = \frac{G_j dN}{K} \tag{54}$$

$$\text{Avec } G_u = 1, G_o = G_e = 1/2, \text{ et } G_b = \frac{1}{4} \left[3 - \frac{(u - a b)}{(b + u)(a + u)} \right].$$

Nous posons également une fonction de demande notée :

$$N = N(p) \quad \text{avec } dN/dP < 0$$

Ainsi, à partir des équations précédentes et lorsque la demande de déplacement N devient *variable*, nous déduisons graphiquement les équilibres avec chaque régime de tarification dans un modèle de file d'attente.

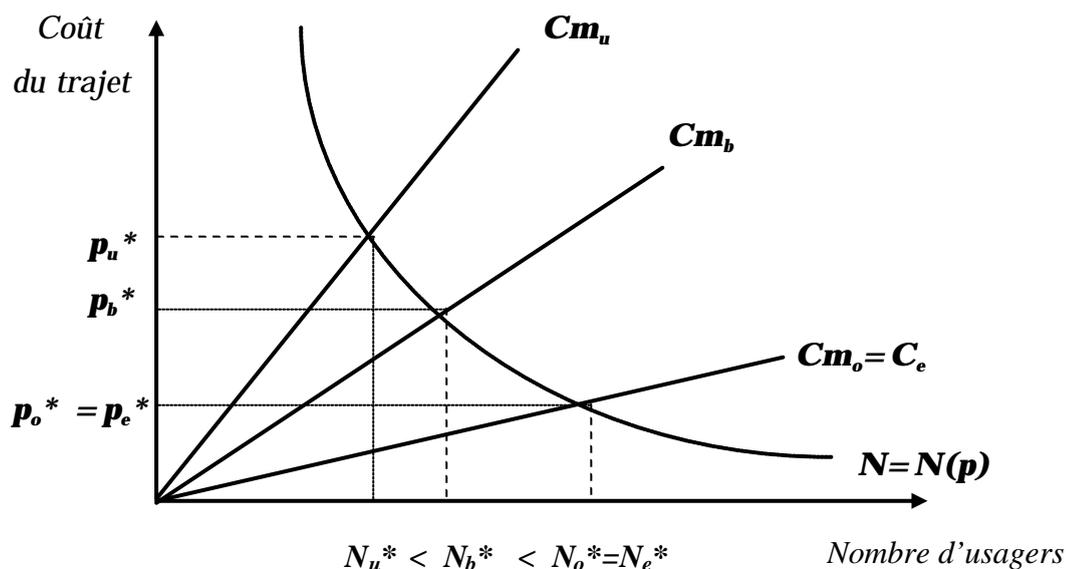


Figure 5 : Equilibres avec chaque régime de tarification (Source : R. DANIELIS et E. MARCUCCI, 1999)

A partir de la figure 5, nous remarquons que le prix du trajet est le plus faible en l'absence de péage et en situation de péage de pointe (situation optimale). Par contre, le péage uniforme, faisant subir constamment un coût supplémentaire aux usagers, génère le coût de trajet le plus élevé et donc demeure le moins bien accepté par la collectivité.

Logiquement, le niveau de circulation ne diminue pas avec le péage de pointe ($N_o^* = N_e^*$). Un tel péage a pour objectif de mieux répartir les automobilistes durant la période de pointe ; aussi, "plus le péage est variable, moins la congestion est forte, plus le

bénéfice marginal d'un accroissement de la voirie est faible, et plus la capacité optimale se réduit" (ARNOTT et al., 1990a). En contrepartie, plus le péage est uniforme, plus le coût du trajet est élevé et plus le nombre d'usagers est faible. L'effet d'une telle tarification entraîne un transfert modal plutôt que temporel.

2.1.3. Comparaison des deux approches

Suite à la présentation de ces deux modèles (flux et files d'attente), nous pouvons mettre en exergue quelques controverses et débats suscités par l'un et/ou l'autre des modèles.

Peu de critiques théoriques ont été développées à l'égard de ces travaux. En 1974, J. HENDERSON souligne tout de même le manque de généralité du modèle de VICKREY et le fait qu'il se borne à l'étude des files d'attente. K. SMALL (1992) réplique pour sa part que les modèles de flux ne reflètent pas les situations de congestion observées dans les grandes villes, ce que reconnaît J. HENDERSON (1992, p. 107): *"bien que l'approche par les flux continus ait été critiquée par Small qui préconise un modèle de file d'attente pour représenter le phénomène de "resserrement" du trafic (i.e. embouteillage), chaque approche est indubitablement aussi "irréaliste" que l'autre (...). Mais les deux sont des représentations satisfaisantes dans le cadre des modèles fondés sur l'hypothèse du "comme si" ("as if")"* (cité dans F. MIRABEL, 1996, p. 377).

Il est important de noter que dans le modèle de files d'attente, la vitesse de circulation demeure identique à la vitesse en régime libre jusqu'à ce que la capacité de la voirie se réduise, et crée une file d'attente. Au contraire, dans le modèle de flux, l'écoulement du trafic s'accroît progressivement durant la période de pointe avant de décroître pour revenir à une situation de trafic fluide.

Enfin, X. CHU (1995) montre que les résultats des deux modèles sont les mêmes lorsque l'élasticité g (dans les modèles de flux) du coût du temps de déplacement par rapport au taux d'arrivée des véhicules tend vers l'infini (F. MIRABEL, 1996, p.445). En effet, dans les modèles de flux avec g qui tend vers l'infini, le taux d'arrivées des individus sur leur lieu de travail tend vers la capacité d'écoulement de la voirie K (qui correspond au taux des arrivées des automobilistes dans les modèles de files d'attente). X. CHU (1995, p.326) signale que, intégrant les modèles de files d'attente, les modèles de flux sont plus généraux: *"L'approche d'Henderson varie avec l'élasticité des temps de déplacement par rapport au flux de trafic alors que l'approche de Vickrey manque d'une telle flexibilité"*.

Au cours de la présentation de ces deux modèles, nous nous sommes bornés à exposer une structure spatiale simple correspondant à la mise en place d'un péage de congestion sur une voirie sans alternative. En réalité, le trafic en milieu urbain se fait sur un réseau routier, composé de multiples voies différentes et par conséquent de nombreux croisements entraînant nécessairement une abondance de trajets différents. Ainsi, ARNOTT et al. (1998, p.92) précisent qu' "*avec un réseau, chaque automobiliste choisit non seulement son heure de départ du domicile, mais aussi choisit sa route*".⁴³ Dans cette situation, un **péage de cordon**, assimilable à **la congestion de réseau** présentée par W. VICKREY, serait l'instrument préconisé par les économistes et par les décideurs. S. MUN, K. KONISHI et K. YOSHIKAWA (2003) reviennent sur ce mode de tarification et précisent que "*le péage de cordon est adopté dans de nombreuses mises en œuvre de péages routiers agissant sur la congestion dans une zone de la ville (e.g. Singapour, Hong Kong, Oslo, etc.)*." (p. 21) Pour leur part, X. ZHANG et H. YANG (2004) s'intéressent à la localisation et au niveau des péages dans le réseau routier et montrent que pour chacune des intersections, le niveau de péage doit être différent⁴⁴.

2.2. Hétérogénéité des usagers et répartition temporelle de la circulation

En admettant que les péages de congestion dépendent du temps, il convient de poser deux hypothèses supplémentaires. Premièrement, précisons la façon dont la demande de déplacement varie avec le temps, et ensuite comment le trafic évolue en fonction du temps et de l'espace. Comme dans les modèles présentés ci-dessus, nous considérons une route unique où il est impossible de doubler. On suppose que le nombre d'usagers est fixe et que les prix sont inélastiques. L'hypothèse, restrictive, d'homogénéité des individus est levée. En effet, les préférences pour les horaires de déplacements, ainsi que les valeurs du temps, sont hétérogènes suivant les voyageurs (nous y reviendrons ci-dessous dans le paragraphe 2.2.1.).

⁴³ ARNOTT et al. (1990b) se sont focalisés sur le cas où des automobilistes homogènes choisissent l'heure de départ et la route à emprunter (deux routes parallèles avec un péage de pointe identique au modèle simple). Nous reviendrons dans la section 3 sur les **routes de première classe**.

⁴⁴ Précisons une nouvelle fois la différence avec le péage de zone. Avec un péage de zone, la circulation dans une zone de la ville devient payante pour les entrants ainsi que les déplacements restant à l'intérieur. La somme déboursée est la même quelque soit le lieu d'entrée. Le péage de cordon est un cas particulier du péage de zone, les automobilistes payent à différents points d'entrée d'une zone encombrée. Il peut permettre une plus grande flexibilité dans l'espace (tarifs différents).

Considérons d'abord la demande. Soit un individu, i , qui a un horaire de début de travail, t_i^* , et qui encourt un coût de retard (ou d'avance) $\beta_i(t-t_i^*)$. S'il arrive à l'heure t , avec $\beta_i(0) = 0$ et $\beta_i(x) = 0$ pour $x > 0$, le coût engendré par i en arrivant à l'heure t est supposé être linéaire sur la durée du déplacement⁴⁵ :

$$C_i(t) = a_i T(t) + \beta_i(t-t_i^*) + t(t)$$

Où $T(t)$ représente la durée de déplacement, a_i représente coût unitaire de la durée de déplacement pour i et $t(t)$ représente le péage au temps t .

Dans cette sous-section on se concentre sur la tarification de congestion de premier rang. En premier lieu, nous allons nous intéresser à l'équilibre sans péage (SP), puis l'optimum social (OS), et enfin nous identifierons les effets du péage de congestion en comparant SP et OS.

2.2.1. L'équilibre sans péage

Chaque individu minimise son coût de déplacement défini par (59) avec $t(t) = 0$ en supposant comme données les choix du temps de trajet des autres individus. Le choix de t par l'individu i peut être représenté par les courbes d'indifférence du retard dû à la congestion ("*congestion delay indifference curve*") : $T_i(t, C_i)$. On peut donc écrire :

$$T_i(t, C_i) = (C_i - \beta_i(t - t_i^*)) / a_i$$

La pente en valeur absolue, $|\beta_i'(t - t_i^*)| / a_i$ (car $C_i' = 0$), représente la disposition marginale de i à arriver en t_i^* . La courbe est fortement inclinée soit quand le coût marginal de l'heure de retard est élevé, soit quand le coût de l'unité de temps de trajet est faible. Ainsi un individu ayant une courbe dont l'inclinaison est élevée a une forte disposition à accepter la congestion (forte contrainte d'horaire et faible contrainte de temps) (« *congestion tolerance* »).

La supposition d'une homogénéité parfaite des usagers est une hypothèse trop restrictive et peut être levée. Dans cette perspective, ARNOTT et al. (1994) ont repris les modèles de files d'attente en soulignant que les usagers subissent des contraintes d'horaires ou de temps plus ou moins élevées selon leur activité. Ainsi les automobilistes peuvent être rangés en deux catégories :

⁴⁵ Cette équation du coût de déplacement est la même que celle présentée dans les modèles de flux, notée (10).

- d'une part les professions aisées (*i*) (cadres supérieurs, professions libérales...) qui ont une contrainte de temps de déplacement très élevée et une contrainte d'horaire plus faible ($\alpha > \beta$) ;
- d'autre part, les professions plus modestes (*j*) (ouvriers, employés de service...) qui ont une contrainte de temps de déplacement relativement faible et une contrainte d'horaire très forte ($\beta > \alpha$).

C'est dans cette optique que les auteurs différencient les groupes d'usagers suivant la valeur du rapport : α / β . Ainsi, nous pouvons distinguer *G* groupes d'usagers classés dans l'ordre décroissant du coût relatif du temps :

$$\alpha_i / \beta_i > \alpha_1 / \beta_1 > \alpha_2 / \beta_2 > \dots > \alpha_G / \beta_G > \alpha_j / \beta_j$$

De la même manière, R. LINDSEY et E. VERHOEF (2000) ont intégré cette différenciation en ne tenant compte que des classes extrêmes d'automobilistes.

Nous allons développer cette approche afin de mieux percevoir l'impact d'un péage de pointe sur le comportement de ces deux types d'individus.

Soient deux individus, ***i*** et ***j***, qui ont des dispositions différentes à accepter la congestion :

- **L'individu *i*** est un cadre supérieur qui préfère débiter le travail en avance plutôt qu'à l'heure t_i^* , et qui a une valeur très élevée du temps (α_i). De ce fait, il a une faible tolérance pour la congestion (avec une contrainte d'horaire relativement faible). L'individu *i* choisit d'arriver tôt, à l'heure $t_i^n < t_i^*$, où la courbe de temps de déplacement $T^n(t)$ est tangente à la courbe T_i au plus bas possible de la courbe d'indifférence de *i*. En choisissant d'arriver prématurément, *i* réalise une économie de temps de déplacement qui compense le "coût d'avance".

- **L'individu *j*** est un agent de service qui a une heure officielle de début de travail t_j^* , proche du pic de l'heure de pointe, et qui a une valeur peu élevée du temps (α_j), avec une légère aversion à arriver plus tôt. De plus, l'individu *j* ne peut pas se permettre d'arriver en retard car il risque des réprimandes de la part de son employeur. L'individu *j* doit ainsi arriver à l'heure $t_j^n = t_j^*$ pour éviter de supporter un "coût de retard" important.

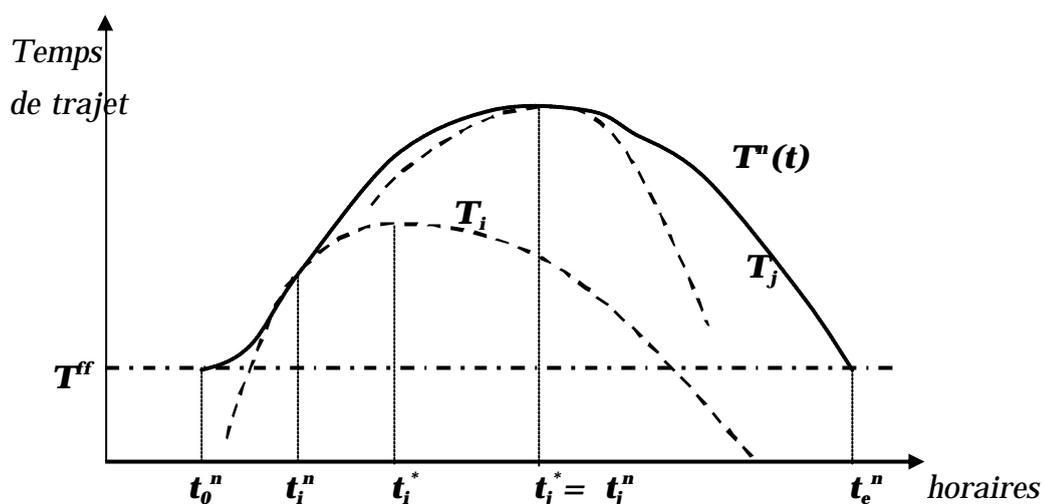


Figure 6 : Equilibre sans péage dans les modèles dépendant du temps (Source : R. LINDSEY et E. VERHOEF, 2000)

La figure 6 représente l'étendue des trajets en période de pointe le matin. La courbe $T^n(t)$ montre de quelle façon varie le temps de déplacement au-dessus du niveau du temps de trajet en circulation fluide (T^{ff}) à partir de t_0^n , en augmentant régulièrement jusqu'à un maximum, puis en décroissant jusqu'au temps t_e^n .

A l'équilibre sans péage, la courbe $T^n(t)$ enveloppe les courbes d'indifférence de tous les voyageurs. Chaque point correspond à la tolérance de la congestion de l'utilisateur qui accède à la route. C'est pourquoi les individus qui ont une forte aversion de la congestion se déplacent au début et à la fin de la période de pointe. Ces usagers sont donc peu responsables des phénomènes d'encombrement de la voirie.

2.2.2. L'optimum social

A l'optimum social, le profil temporel des arrivées sur le lieu de travail correspond à celui qui permet de minimiser la somme des coûts d'heures et des coûts agrégés du temps perdu dans les embouteillages. La relation entre la vitesse des véhicules au départ et à l'arrivée est donnée par la courbe de débit. Etant donné que les véhicules ne se dépassent pas, l'ordre de départ est le même qu'à l'arrivée. Le taux optimal des arrivées est donné par la différence entre les coûts d'heure et les coûts de la durée de déplacement. Ainsi, un fort taux d'arrivées réduit la période d'arrivée et diminue les coûts d'heure, mais amplifie la congestion et les retards. Sur la figure 7, (t_0^0, t_e^0) détermine la période des arrivées. Les taux d'arrivées en t_0^0 et en t_e^0 permettent de maintenir la circulation fluide.

Par conséquent, entre t_o^0 et t_e^0 les vitesses des véhicules sont en dessous de la vitesse moyenne de circulation fluide.

En reprenant la situation initiale sans péage, R. LINDSEY et E. VERHOEF (2000) se sont intéressés à l'optimum social pour les usagers et ont établi la figure suivante :

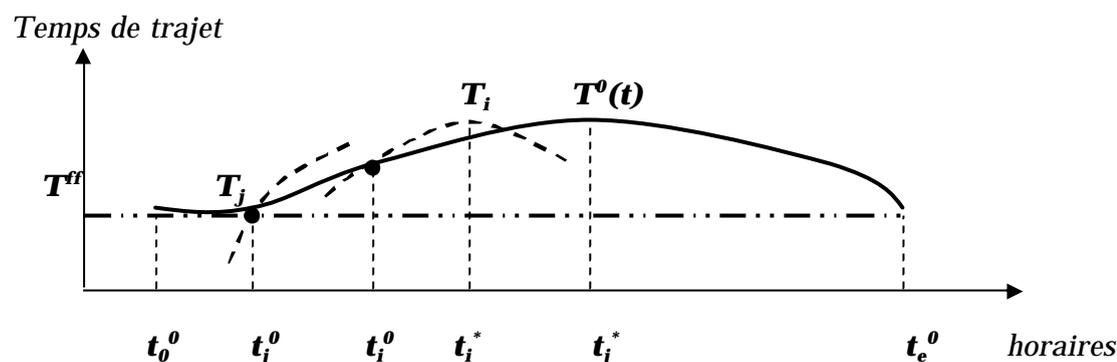


Figure 7 : L'optimum social dans les modèles dynamiques (Source : R. LINDSEY et E. VERHOEF, 2000)

La figure 7 reprend les mêmes individus que dans l'équilibre sans péage. La courbe du temps de trajet $T^0(t)$ est plus aplatie que $T^n(t)$. Comme précédemment l'individu i arrive plus tôt (t_i^0), mais comme il a une forte valeur du temps, il arrive juste avant t_i^* . De cette façon son attente avant l'heure du début du travail est faible. D'autre part, l'individu j n'a qu'une légère aversion à arriver en avance, va arriver avant l'heure de pointe et plus tôt que i . Il n'arrivera donc pas après t_j^* comme dans l'équilibre sans péage. L'optimum social implique donc des changements dans l'heure et dans l'ordre des arrivées par rapport à l'équilibre sans péage. Dans ce modèle, la congestion correspond à un ralentissement des vitesses de déplacement quand le trafic augmente.

2.2.3. Le péage de pointe avec hétérogénéité des individus

Ici, les automobilistes ne peuvent pas doubler, ainsi ceux qui ont une valeur du temps élevée seront prêts à payer une somme d'argent pour se rendre plus rapidement sur leur lieu de travail. De ce fait, les externalités engendrées par le temps "perdu" pour arriver peuvent-elles être internalisées via un péage de pointe modulé dans le temps ("*time-varying toll*" ou "*fine toll*").

Ce péage ne dépend pas seulement de l'encombrement de la circulation et du ralentissement des flux de voitures, mais il dépend aussi de la distribution des fréquences d'arrivées souhaitées par tous les usagers, de la valeur du temps des individus, et des coûts d'horaires supportés par les usagers. Le péage doit être identique en période de circulation fluide, avant t_0^0 et après t_e^0 .

Dans la figure 7, la courbe d'indifférence de retard de l'individu i , T_i , est moins plate en t_i^0 que la courbe de temps de déplacement $T^0(t)$. Pour inciter i à arriver en t_i^0 , et non avant ou après, le péage doit augmenter jusqu'au taux approprié. De même pour l'individu j , le péage doit l'inciter à arriver en t_j^0 . En t_e^0 le péage est tenu de retrouver la valeur présente avant la période de pointe, au niveau t_0^0 .

Quand la demande par rapport au prix est élastique, le péage optimal de congestion doit être positif afin de décourager les trajets sans nécessité (c'est le cas du modèle statique de la section 1). Dans le modèle présenté ici, il convient d'ajouter une constante positive au péage de congestion pour limiter la demande.

Aussi le *péage de pointe* entraîne-t-il une baisse des coûts de déplacements ainsi qu'une amplification des coûts d'horaires car les automobilistes sont incités à circuler en dehors de la période de congestion, c'est à dire lorsque le péage est gratuit. Mais comme le péage tient compte de la valeur du temps des individus, il en résulte une réduction des coûts. L'effet net sur les coûts d'horaires varie, de telle sorte que les gains d'efficacité du péage peuvent être plus élevés ou plus faibles que les économies de temps dans les déplacements.

Toutefois, le péage affecte le bien-être des usagers. L'individu i par exemple, qui a une valeur très élevée du temps, accepte de payer en échange d'une réduction du temps de trajet et d'une réduction du retard d'arrivée. Dès lors découle tout un débat politique sur le péage de congestion. Une analyse coûts-avantages pourrait être biaisée dans le cas où l'on ne tiendrait compte que des temps de déplacements et non des coûts d'horaires.

Les gains d'efficacité du péage de congestion sont du même ordre de grandeur que ses recettes, et peuvent même être supérieurs. Le péage de congestion a des effets redistributifs sur le bien-être des usagers et en particulier ceux ayant une valeur du temps élevée. Or, comme la valeur du temps est corrélée positivement avec le revenu, il paraît logique que le péage soit régressif (ce qui n'est pas le cas avec un tel péage).

Section 3. La tarification de second rang de la congestion : voirie gratuite versus voirie payante

L'objet de cette section est d'étudier les politiques optimales de régulation de la circulation avec une offre de trajet différenciée. Dans le premier chapitre de la thèse, nous avons observé que les moyens de lutte contre la congestion étaient multiples (interdiction d'accéder au centre ville pour certains types de véhicules, instauration d'itinéraires indiqués, taxation forte sur les carburants, stationnement payant...) mais nous avons retenu que la tarification de la congestion (sous la forme d'un péage urbain) était la plus pertinente et la plus intéressante. Elle consiste à instaurer une taxation de l'usage de la chaussée, variable ou non dans le temps et/ou dans l'espace afin de compenser les coûts sociaux que chaque automobiliste impose à la collectivité.

Toutefois, derrière la politique de tarification de la congestion, il transparaît plusieurs objectifs déjà évoqués (internalisation des effets externes environnementaux, incitation au changement de mode, gain de temps...). Ici, il sera essentiellement question du gain de temps proposé aux individus pressés (dont la valeur du temps est élevée).

Comme il est interdit en France d'instaurer un péage sur une voirie urbaine existante, l'alternative est de créer une voie parallèle de distance équivalente mais payante. De ce fait, les usagers pressés pourront utiliser cette voie moyennant paiement et, dans le cas où la demande globale est fixe, permettront à la voirie sans péage de se décongestionner.

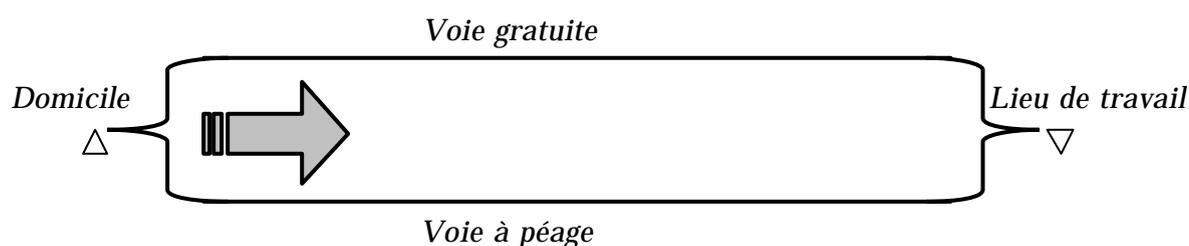


Figure 8 : Offre de trajet différenciée (voirie gratuite versus voirie payante)

Nous allons donc analyser les travaux de différents auteurs qui ont œuvré sur cette "tarification de second rang de la congestion". Les travaux initiaux abordant ce thème sont inspirés de F. H. KNIGHT (1924), H. LEVY-LAMBERT (1968) et M. MARCHAND (1968) qui furent les premiers à considérer le cas d'une route alternative à péage. À partir des modèles de files d'attente, ARNOTT et al. (1992) ont étudié la situation où deux

groupes d'usagers sont confrontés à deux voiries payantes (tarification de premier rang). Dans une approche statique, VERHOEF et al. (1996) comparent trois situations : un libre accès sur les deux voiries, une tarification de la congestion sur une seule voirie (second rang) et une tarification appliquée aux deux routes (premier rang). Dans les deux derniers cas, l'autorité publique a pour but de maximiser le bien-être collectif. Ensuite, ces modes de tarification sont comparés à une situation de gestion privée des infrastructures et à une tarification visant à maximiser les recettes du péage. L'objet n'étant plus donc d'optimiser le bien-être collectif, celui-ci se voit donc dégradé. Toutefois, même si la maximisation des recettes sur l'une des voiries est moins efficace d'un point de vue de la régulation automobile que la gestion publique, elle peut réellement mener à une utilisation plus efficace de l'espace lorsqu'elle est instaurée sur les deux voies (par rapport à une tarification publique de second rang). Dans la même lignée, R. BRAID (1996) intègre le temps de trajet dans un modèle à deux routes et considère un péage de pointe sur la voirie payante. A partir d'une simulation sur les choix d'horaire et sur les choix d'itinéraire, T. LAM (2004) démontre que les routes alternatives gratuites (parallèles à des voies payantes) permettent aux automobilistes de voyager à des horaires plus proches de leurs préférences sans circuler massivement aux heures de pointe.

Dans cette section, nous allons étudier la tarification de second rang avec **deux variables**. Nous reprendrons le modèle présenté par K. SMALL et J. YAN (2001) – inspiré directement de L. LIU et J. McDONALD (1999) – où l'on analysera le choix de route (gratuite/payante) avec deux groupes d'usagers (riches/pauvres qui correspond en fait à une différenciation des valeurs du temps).

3.1. La tarification de second rang et la prise en compte de l'hétérogénéité des usagers : le modèle de K. SMALL et J. YAN (2001)

Le plan de péage auquel nous faisons référence ici est appelé "*value pricing*" ("péage de valeur") car les usagers sont prêts à payer plus pour bénéficier d'un service de valeur supérieure. L. LIU et J. McDONALD (1998, 1999) ont étudié la nature de cette tarification de "second rang" en supposant que les individus étaient homogènes, avec une valeur du temps identique. Cette hypothèse restrictive a été levée par K. SMALL et J. YAN en supposant l'existence de deux groupes d'usagers différenciés par leurs valeurs du temps :

$$a_1 > a_2 \tag{55}$$

Soient deux voies, A et B, reliant la même origine et la même destination, de longueur L et de temps de voyage T_r^0 en régime fluide. Un usager i ($i = 1, 2$) voyageant

sur r ($r = A, B$) encourt un coût de déplacement C_{ir} , que l'on peut définir de la manière suivante⁴⁶ :

$$C_{ir}(N_r) = jL + a_i T_r^0 + g \frac{a_i N_r^k}{K_r} \quad (56)$$

Où f correspond aux coûts directs (essence, usure) subis par l'utilisateur sur la distance L .

Où $a_i T_r^0 + g \frac{a_i N_r^k}{K_r}$ correspond au coût du temps par unité de distance, avec a_i qui équivaut

à la valeur du temps du groupe d'utilisateur i ($a_1 > a_2$) et $T_r^0 + g \frac{a_i N_r^k}{K_r}$ qui correspond au temps de trajet qui dépend du volume de capacité : N_r/K_r . g et k sont des paramètres positifs non nuls.

La demande d'utilisation de voirie de chaque groupe a une forme linéaire :

$$N_i(P_i) = a_i - b_i P_i \quad (57)$$

Où a_i et b_i sont positifs non nuls, et P_i correspond au prix forfaitaire égal au minimum du coût de déplacement (intégrant le péage) du groupe d'utilisateurs empruntant la voie r (t_r) :

$$P_i = \text{Min}_r \{ C_{ir} + t_r \} \quad (58)$$

Enfin, la fonction de bien-être social W est définie par la zone située sous la courbe de demande inverse ($P_i(N_i)$) moins le coût total :

$$W = \sum_{i=1}^2 \int_0^{N_i} P_i(t) dt - \sum_{i=1}^2 \sum_{r=A}^B N_{ir} C_{ir} \quad (59)$$

Où N_{ir} correspond au nombre d'utilisateurs de type i empruntant la route r .

3.2. Répartition des usagers et solutions d'équilibre

Les automobilistes cherchent à minimiser leurs coûts en prenant l'une ou l'autre route. En supposant que la route A offre un trajet plus rapide que la route B, et que le groupe

⁴⁶ A la différence du modèle de L. LIU et J. McDONALD (1998, 1999), K. SMALL et J. YAN (2001) étudient le comportement des deux groupes d'utilisateurs sur une seule période.

d'utilisateur 1 a une valeur du temps supérieure à celle du groupe 2, alors nous pouvons écrire les conditions d'équilibre inspirées du premier principe de WARDROP⁴⁷ :

$$C_{1A}(N_A) + t_A \leq C_{1B}(N_B) + t_B \quad (60a)$$

$$C_{2A}(N_A) + t_A \geq C_{2B}(N_B) + t_B \quad (60b)$$

$$N_{1B} \cdot (C_{1A} + t_A - C_{1B} - t_B) = 0 \quad (60c)$$

$$N_{2A} \cdot (C_{2B} + t_B - C_{2A} - t_A) = 0 \quad (60d)$$

$$N_{1B}, N_{2A} \geq 0 \quad (60e)$$

Il y a quatre équilibres possibles, si (60a) et (60b) sont des inégalités ou pas:

□ Cas ES : (équilibre entièrement séparé) (60a) et (60b) sont des inégalités, c'est à dire que chaque groupe préfère strictement une chaussée différente car $a_1 > a_2$. De plus, ces conditions exigent que la route A soit plus chère mais moins lente que la route B, ainsi $t_A > t_B$ et $N_B/K_B > N_A/K_A$.

□ Cas PS1 : (équilibre partiellement séparé, avec le groupe 1 séparé) le groupe 2 préfère strictement la route B, mais le groupe 1 est indifférent. Donc, (60a) est une égalité et (60b) est une inégalité.

□ Cas PS2 : (équilibre partiellement séparé, avec le groupe 2 séparé) le groupe 1 préfère strictement la route A, mais le groupe 2 est indifférent. Dans ce cas, (60a) est une inégalité et (60b) est une égalité⁴⁸.

□ Cas EI : (équilibre entièrement intégré) les deux groupes sont indifférents aux deux routes, ainsi (60a) et (60b) sont des égalités. Puisque les usagers ont une valeur du temps différente, cette solution n'est envisageable que dans le cas où les routes auraient des péages égaux et des fluidités identiques. Cela revient à écrire $C_{1A} = C_{1B}$ et $C_{2A} = C_{2B}$.

⁴⁷ J. WARDROP (1952) précise que les usagers d'un certain type choisissent la route qui réduit au minimum leur coût privé, et que si les coûts privés sont égaux pour ces usagers, ils utilisent les deux routes. Nous reviendrons sur les principes de WARDROP dans le Chapitre III.

⁴⁸ Notons qu'une solution extrême peut se produire dans les deux cas, pour l'équilibre PS1 il est possible que $N_{1B} = 0$, c'est à dire que tous les usagers de type 1 emploient la route A et que, de fait, cet équilibre soit identique à l'équilibre ES. Il en est de même pour PS2 avec $N_{2A} = 0$.

3.3. Régimes de tarification

K. SMALL et J. YAN développent cinq types de tarifications avec, pour chaque scénario, des contraintes spécifiques :

□ Tarification de premier rang : dans ce cas, un opérateur public installe des péages⁴⁹ sur les deux routes en cherchant à maximiser le bien-être. (PR)

□ Tarification de second rang : ici la situation est similaire à la précédente, avec pour contrainte $t_B = 0$. (SR)

□ Tarification de troisième rang : cette tarification est la même que SR avec une contrainte supplémentaire, à savoir :

$$N_A/K_A \leq 0,887 \tag{61}$$

Cette contrainte permet de garantir un service minimum sur la route payante. 0,887 a été calculé comme étant le débit maximum de véhicules par rapport à la capacité permettant d'avoir une circulation fluide. (TR)

□ Tarification maximisant le profit : le niveau du péage t_A est choisi pour maximiser les recettes avec la contrainte $t_B = 0$. (MP)

□ Régime sans péage : dans ce cas, t_A et $t_B = 0$. Les usagers sont alors indifférents aux deux routes, l'équilibre est entièrement intégré. (SP)

De fait, dans les régimes PR, SR et TR, l'objectif est de maximiser le bien-être de la collectivité (cf. §9)) avec les contraintes (60), et avec la contrainte (61) pour TR. Dans le régime MP l'objectif est de maximiser les recettes⁵⁰ avec les contraintes (60).

3.4. Test des solutions

Tout d'abord, les auteurs testent les solutions avec les cas d'équilibre ES, PS1 et PS2. Pour cela ils proposent de calculer le Lagrangien approprié avec $N_{2A}=0$ pour PS1, $N_{1B}=0$ pour PS2 et N_{2A} et $N_{1B}=0$ pour ES. Ils résolvent alors les conditions de premier ordre avec N_{ir} et t_r (cf. détail des calculs en annexe).

⁴⁹ On appliquera une tarification au coût marginal (correspondant au résultat de la maximisation du bien-être collectif) sur chaque route.

⁵⁰ De la même manière que la maximisation du bien-être, on recherche le péage optimal permettant de maximiser les recettes : $R = \sum_r t_r N_r$.

3.5. Simulations numériques

3.5.1. Présentation des données

L'originalité du modèle de K. SMALL et J. YAN repose sur le fait que l'hétérogénéité des usagers est prise en compte, et que l'on distingue les usagers par leur valeur du temps. Ainsi, dans le cadre d'une simulation numérique, les auteurs considèrent que la taille des deux groupes peut évoluer. Tout d'abord, ils étudient un scénario de base, proche de la situation de Orange County en Californie (cas d'une autoroute urbaine), où la capacité de la route A est inférieure à la capacité de B ; ensuite les groupes vont évoluer de sorte que la demande de voirie soit proportionnelle à la capacité ; dans un troisième scénario, ils modifieront l'élasticité-prix des usagers ; puis, dans une quatrième situation, ils considéreront une circulation plus dense ; et enfin, ils inverseront la capacité relative des deux chaussées ($K_A > K_B$). Pour cela, nous reprenons les valeurs des paramètres donnés par K. SMALL et J. YAN, avec 1\$ (2001)= 1,16 € et 1 mile= 1,6 km :

| Paramètres | Scénario de Base | Scénario de demande proportionnelle | Scénario de forte élasticité | Scénario de forte congestion | Scénario d'inversion des capacités |
|---------------|------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| f (c€/km) | 4,93 | 4,93 | 4,93 | 4,93 | 4,93 |
| K_A (véh/h) | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | <u>4000</u> |
| K_B (véh/h) | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | <u>2000</u> |
| N_A | 5700 | <u>3800</u> | <u>7150</u> | <u>6780</u> | 5700 |
| N_B | 5700 | <u>7600</u> | <u>7150</u> | <u>6780</u> | 5700 |

Tableau 1 : Valeurs des paramètres utilisés pour la simulation

Avec, comme données supplémentaires :

- $L=16$ km, $g= 0,15$, $k= 4$ et $T_r^0 = 105$ km /h.
- Le coût moyen du temps est de 0,398 €/minute, dans tous les scénarii.
- Les pentes des fonctions de demande sont choisies afin de maintenir les élasticités des deux groupes à $- 0,60$ dans le cas de forte élasticité et $- 0,33$ dans les autres cas.
- Enfin, la différence de temps entre les routes A et B sous le régime MP est de 15 minutes avec forte congestion et de 8 minutes dans les autres cas.

3.5.2. Résultats

3.5.2.1. Scénario de base

Les auteurs choisissent les paramètres de demande de sorte qu'avec le régime sans péage, l'élasticité-prix de la demande soit égale à $-0,33$ et de façon à ce que la politique de MP engendre un péage d'environ 3,19 € et avec une différence du temps de trajet entre les deux routes d'environ 8 minutes. La valeur moyenne du temps est évaluée à 23,896 € par heure. A partir de ces données les auteurs déduisent les résultats ci-dessous :

| Régime de tarification | <i>PR</i> | <i>SR</i> | <i>TR</i> | <i>MP</i> | <i>SP</i> |
|--|------------|------------|------------|------------|-----------|
| Type d'équilibre | <i>PS1</i> | <i>PS1</i> | <i>PS1</i> | <i>PS1</i> | <i>EI</i> |
| Péage-A ⁵¹ | 452,48 | 84,2276 | 310,07 | 319,58 | 0 |
| Péage-B | 451,46 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Vitesse ⁵² -A | 79,36 | 71,68 | 95,4 | 96 | 64 |
| Vitesse-B | 79,36 | 61,92 | 53,6 | 53,28 | 64 |
| Coûts d'horaire : | | | | | |
| 1A | 112,87 | 167,27 | 34,2 | 30,44 | 230,03 |
| 1B | 113,02 | 251,49 | 344,25 | 350,06 | 230,03 |
| 2A | - | - | - | - | 229,89 |
| 2B | 112,79 | 251,38 | 344,12 | 349,85 | 229,89 |
| <hr/> | | | | | |
| Usager-1 ⁵³ | 0,84 | 0,99 | 0,94 | 0,94 | 1,00 |
| Usager-2 | 0,84 | 0,99 | 0,94 | 0,94 | 1,00 |
| Elasticité-1 | -0,59 | -0,34 | -0,41 | -0,41 | -0,33 |
| Elasticité-2 | -0,59 | -0,34 | -0,41 | -0,41 | -0,33 |
| Gain de bien-être (par rapport au régime SP) | 70,76 | 4,64 | -46,4 | -52,2 | 0 |

Tableau 2 : Résultats avec le scénario de base

⁵¹ Tous les coûts sont en centimes d'Euro (c€) par véhicule.

⁵² La vitesse est en kilomètre/heure.

⁵³ Usagers du groupe *i* par rapport à la situation initiale sans péage ($N_i / N(SP)_i$).

De ces premiers résultats, les auteurs remarquent que le gain de bien-être est faible en SR et négatif en TR et MP. En effet, les coûts d’horaires étant très élevés sur la voie B, les usagers subissent une perte de bien-être. En contrepartie, la tarification de premier rang (difficilement applicable) permet d’assurer une vitesse moyenne d’environ 80 km/h sur les deux routes. Par rapport au régime SP, la solution de SR permet de conserver une vitesse quasiment identique sur la voie B et supérieure sur la voie A (respectivement 61,92 et 71,68 km/h).

Maintenant, il est possible d’étudier l’évolution de ces valeurs compte tenu des variations de la valeur du temps (VT) des deux groupes d’usagers. Pour cela, les auteurs modifient les pentes des fonctions de demande pour garder l’élasticité des deux types d’usagers et le poids de la valeur moyenne du temps (dans le régime SP). SMALL et YAN obtiennent alors des graphiques permettant de bien saisir l’attitude des usagers et l’évolution des données initiales.

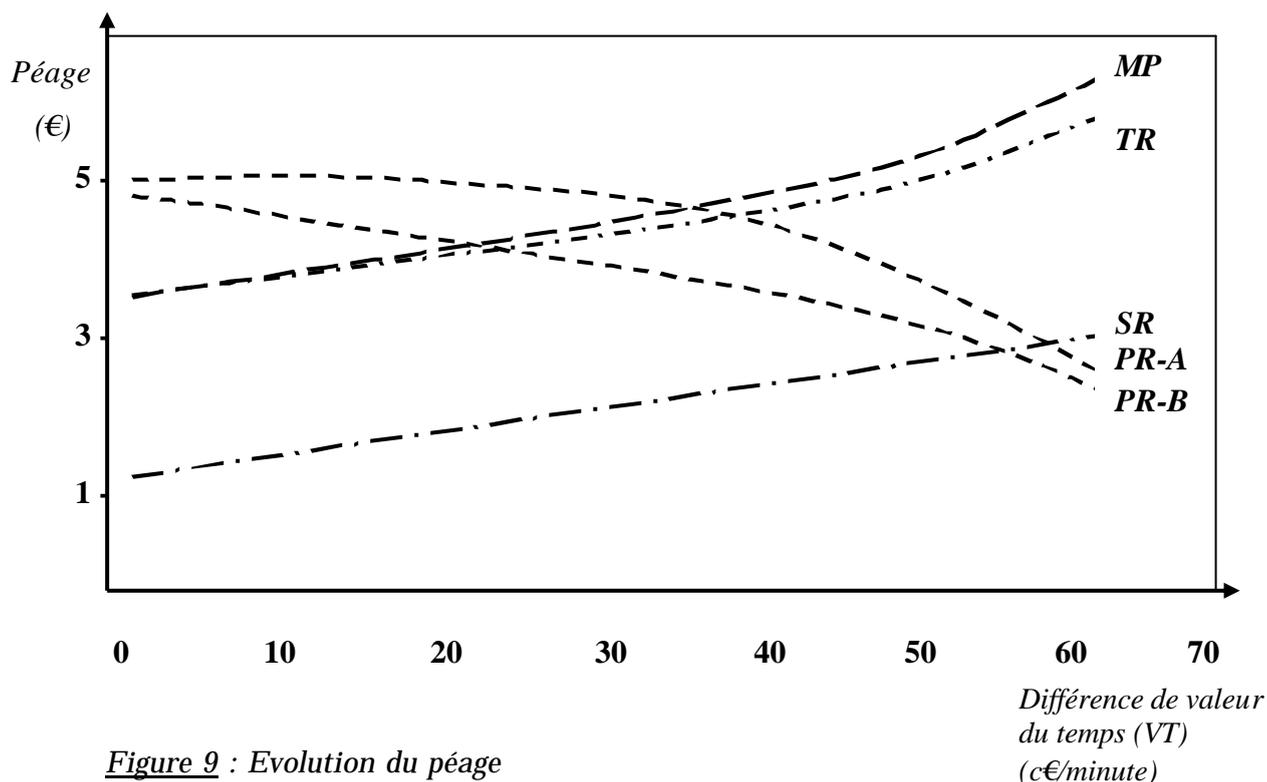


Figure 9 : Evolution du péage

La figure 9 indique que les péages sont fonctions de l’hétérogénéité des usagers. Les automobilistes du groupe 1 utilisent les deux routes (car la voie A ne peut contenir qu’un tiers de la capacité totale) et sont plus avantagés sur la route B avec le régime de premier rang : avec l’augmentation de la différence des valeurs du temps, le nombre

d'usagers du groupe 1 augmente de 30% et le nombre d'usager du groupe 2 diminue de 30%. C'est pour cette raison que la différence entre le montant des péages des deux routes devient faible.

Temps de trajet (minutes)

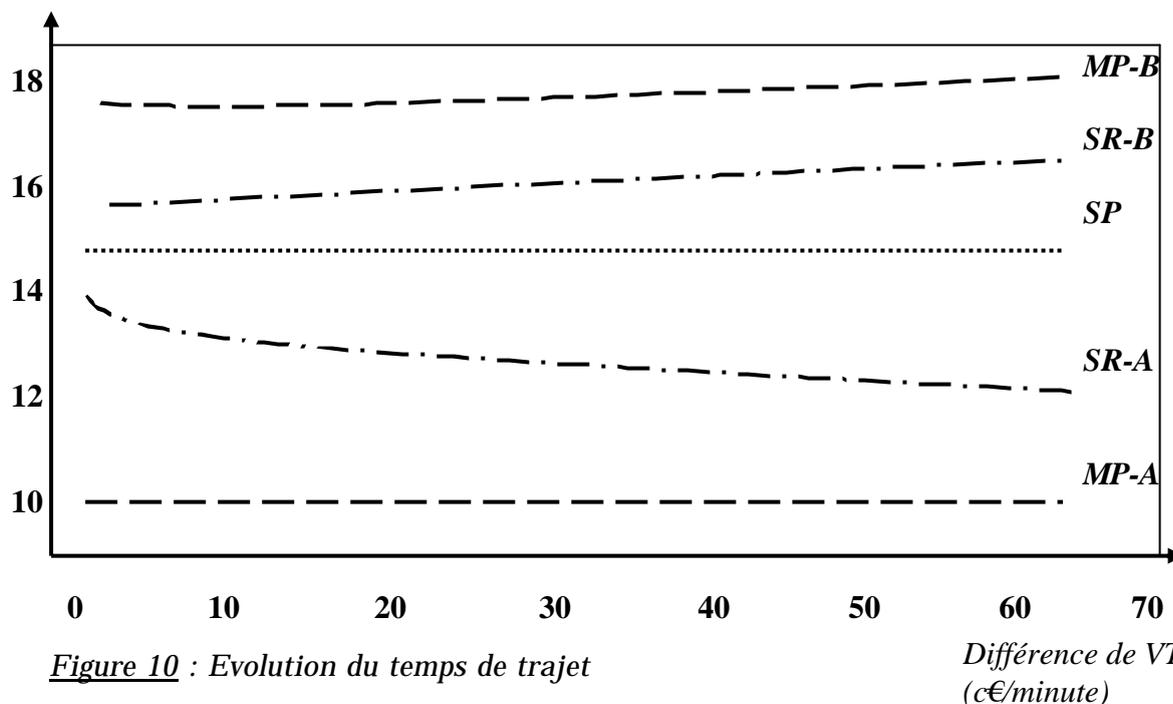


Figure 10 : Evolution du temps de trajet

Différence de VT
(€/minute)

La figure 10 montre que le temps de trajet, identique sur les deux routes avec le régime SP, est amplement différent suivant le régime de tarification MP ou SR. En effet, il existe une différence de qualité entre les deux politiques, puisque dans le premier cas un monopole privé (sur la voie A) recherche à maximiser ses recettes et propose un péage plus élevé que SR (cf. figure 10). Le temps de trajet sur la voie A sera donc nettement plus court.

Sur la figure 11, le gain de bien-être est calculé par rapport à la situation sans péage. Dans tous les cas, plus l'hétérogénéité est grande et plus le gain de bien-être est élevé. Concernant le régime de tarification MP, il y a toujours une perte de bien-être dû à la politique même de maximisation des recettes. La politique de tarification de premier rang réalise les meilleurs gains de bien-être, mais ce régime de tarification demeure difficilement applicable.

Gain de
bien-être (c€/Véhicule)

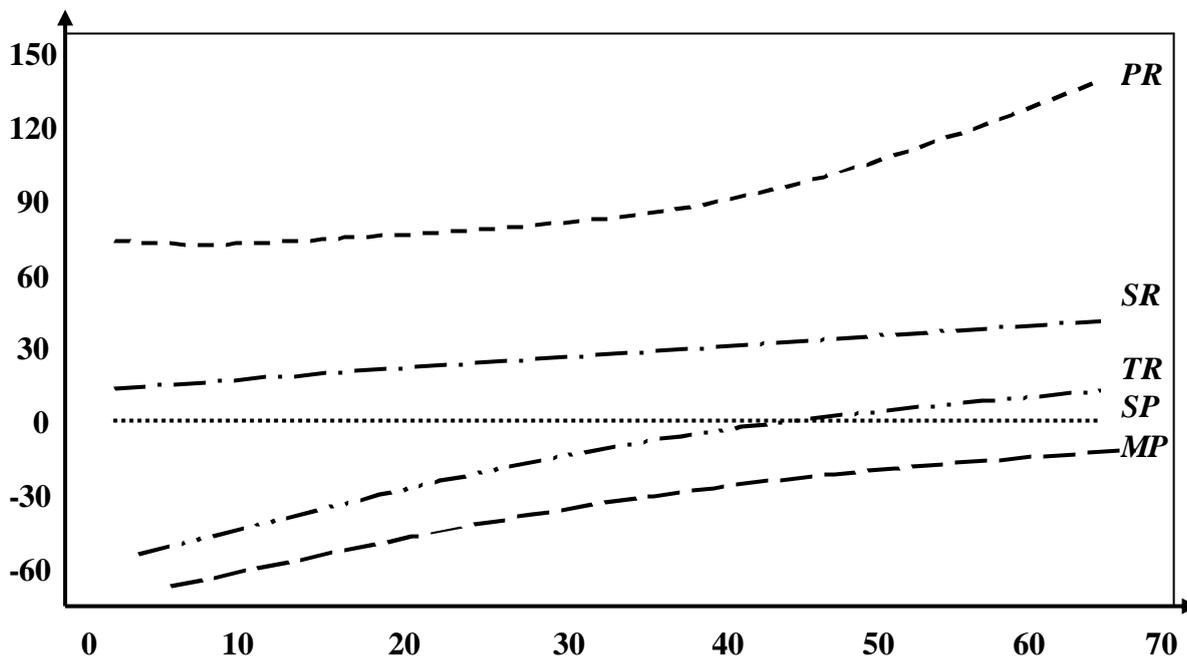


Figure 11 : Evolution du gain en bien-être dans le scénario de base Différence de VT (c€/minute)

Dans les situations présentées ci-dessous, nous nous limiterons simplement à comparer les évolutions du bien-être suivant les différents régimes. En effet, l'instauration d'un péage urbain devrait avoir comme objectif prioritaire l'amélioration du bien-être de la collectivité.

3.5.2.2. Scénario de demande proportionnelle

Afin de garder la cohérence des résultats, les auteurs prennent la moitié de la valeur du temps du scénario de base, à savoir 11,95 € par heure. L'élasticité entre les deux groupes est de - 0,33 et le différentiel de temps de trajet entre les deux routes est de 8 minutes pour le régime MP.

Dans ce scénario, tout en gardant la demande totale inférieure à celle en situation de non-péage, la fonction de demande est proportionnelle à la capacité des routes. C'est à dire : $a_1 / a_2 = K_A / K_B = 1/2$. De plus, les pentes des fonctions de demande sont changées afin d'avoir une élasticité égale à celle du scénario de base.

L'évolution du bien-être est donnée graphiquement :

Gain de

bien-être (c€/Véhicule)

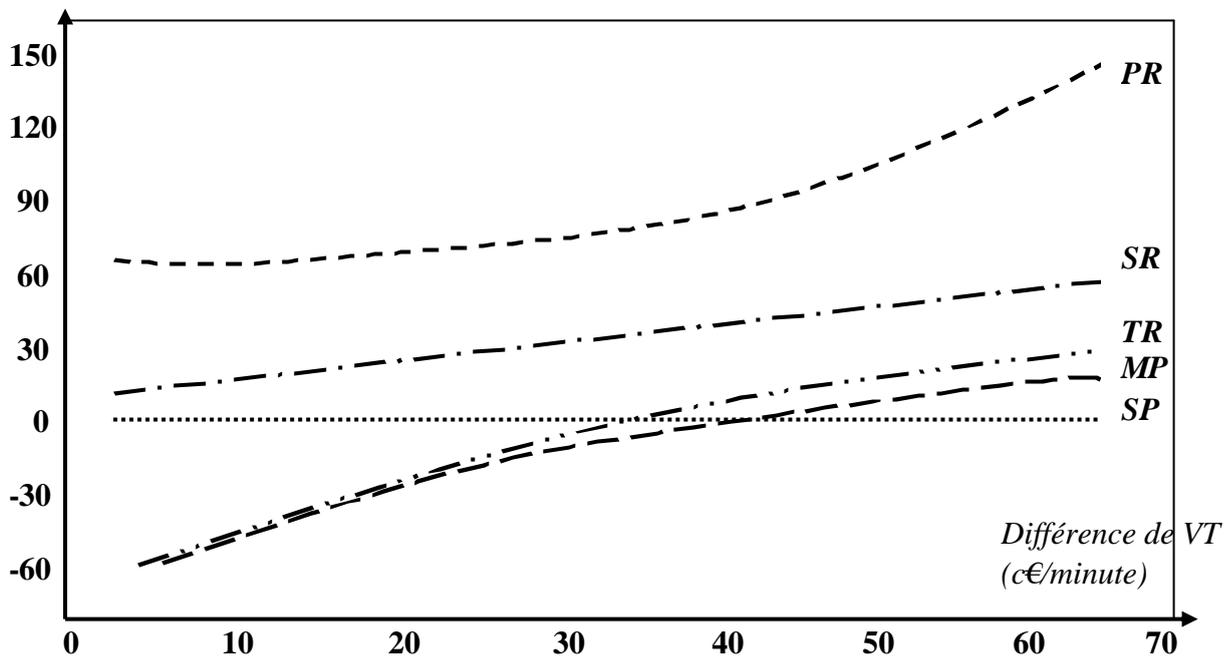


Figure 12 : Evolution du gain en bien-être avec une demande proportionnelle à la capacité

Dans ce cas de figure, les régimes de TR et de MP, améliorent le bien-être par rapport au scénario initial. Cela est dû à une hétérogénéité plus forte entre les usagers en comparaison avec la situation précédente. De plus, nous constatons que le régime PR est approximativement équivalent au scénario de base et que le régime SR est plus efficient. Les gains de bien-être sont supérieurs dans cette situation car les usagers sont orientés vers la voie correspondante à leur valeur du temps.

3.5.2.3. Scénario de forte-élasticité

L'élasticité prix de la demande est ici plus élevée : - 0,60 avec le régime sans péage. Comme dans le scénario de base, la valeur moyenne du temps est égale à 23,896 € par heure.

L'évolution du bien-être peut être exprimée graphiquement :

Gain de
bien-être (c€/Véhicule)

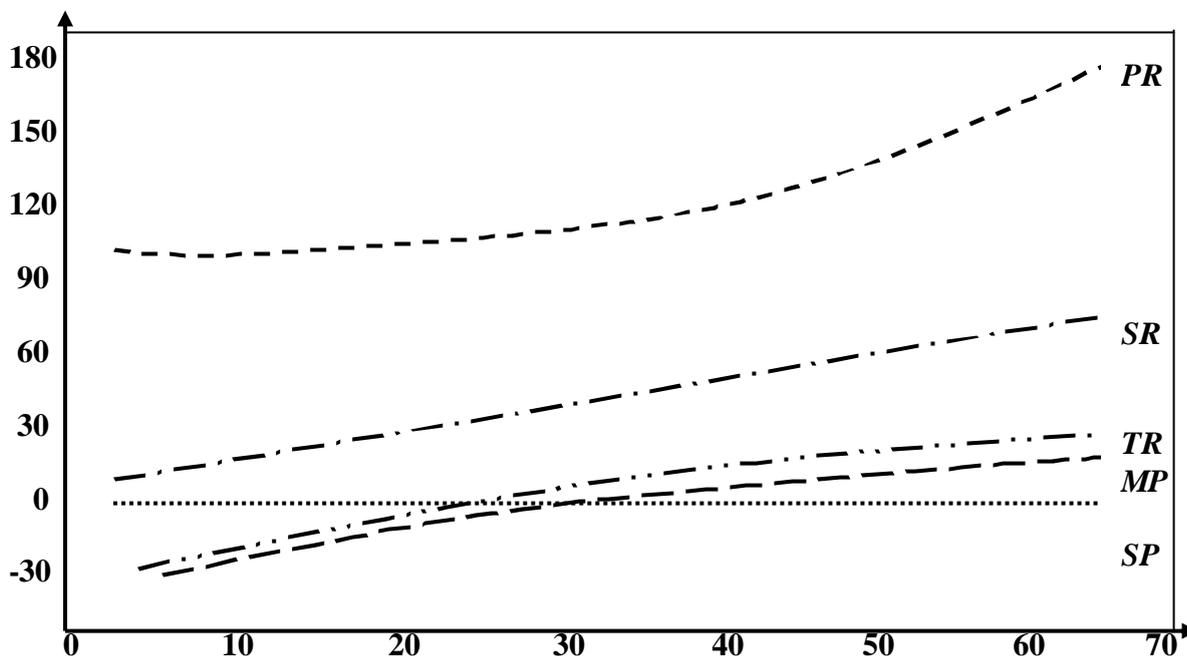


Figure 13 : Evolution du gain en bien-être avec une forte élasticité Différence de VT (c€/minute)

Quand la différence de la valeur du temps est supérieure à 34,8 c€/minute, les régimes TR et MP produisent une amélioration du bien-être. En contrepartie, le régime de SR n'améliore pas les situations précédentes car il souligne le différentiel de péage (moins important toutefois dans cette situation).

3.5.2.4. Scénario de forte congestion

Compte tenu de la forte congestion, les auteurs proposent d'étudier l'évolution du bien-être avec un différentiel de temps de trajet de 15 minutes en régime MP. Cette situation entraîne de grandes disparités dans l'évolution du bien-être compte tenu des différents régimes de tarification. Toutefois, les résultats demeurent proches de la situation avec forte élasticité.

Gain de

bien-être (c€/Véhicule)

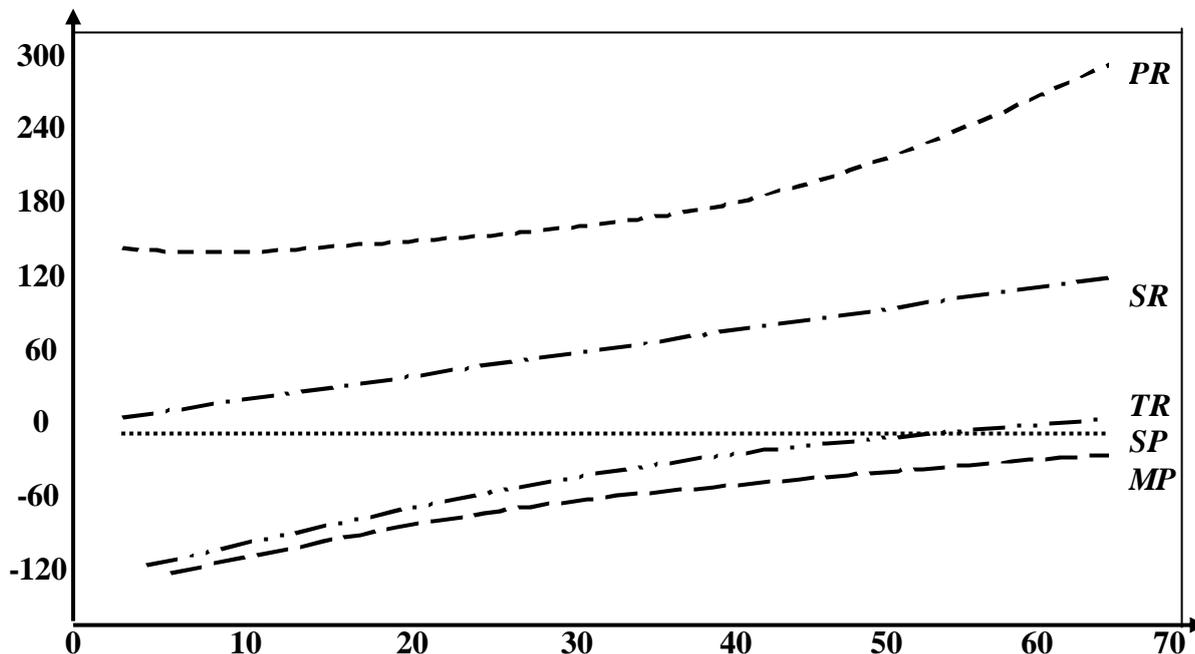


Figure 14 : Evolution du gain en bien-être avec une forte congestion

Différence de VT
(c€/minute)

3.5.2.5. Scénario d'inversion de la capacité

Dans ce scénario, la capacité est inversée et les paramètres sont les mêmes que dans le scénario initial. Le péage sur la route A (avec MP, SR et TR) est supérieur car la route de substitution gratuite a une capacité plus faible, et de fait est promptement sujette à l'encombrement. Le régime SR a un gain de bien-être supérieur car il concerne une plus grande surface de circulation. Notons aussi qu'il existe différents cas d'équilibre dans ce cas de figure, en effet lorsque l'hétérogénéité des usagers augmente, on passe d'un équilibre partiellement séparé (PS1 ou PS2) à un équilibre entièrement séparé (ES).

L'évolution du bien-être peut être exprimée graphiquement :

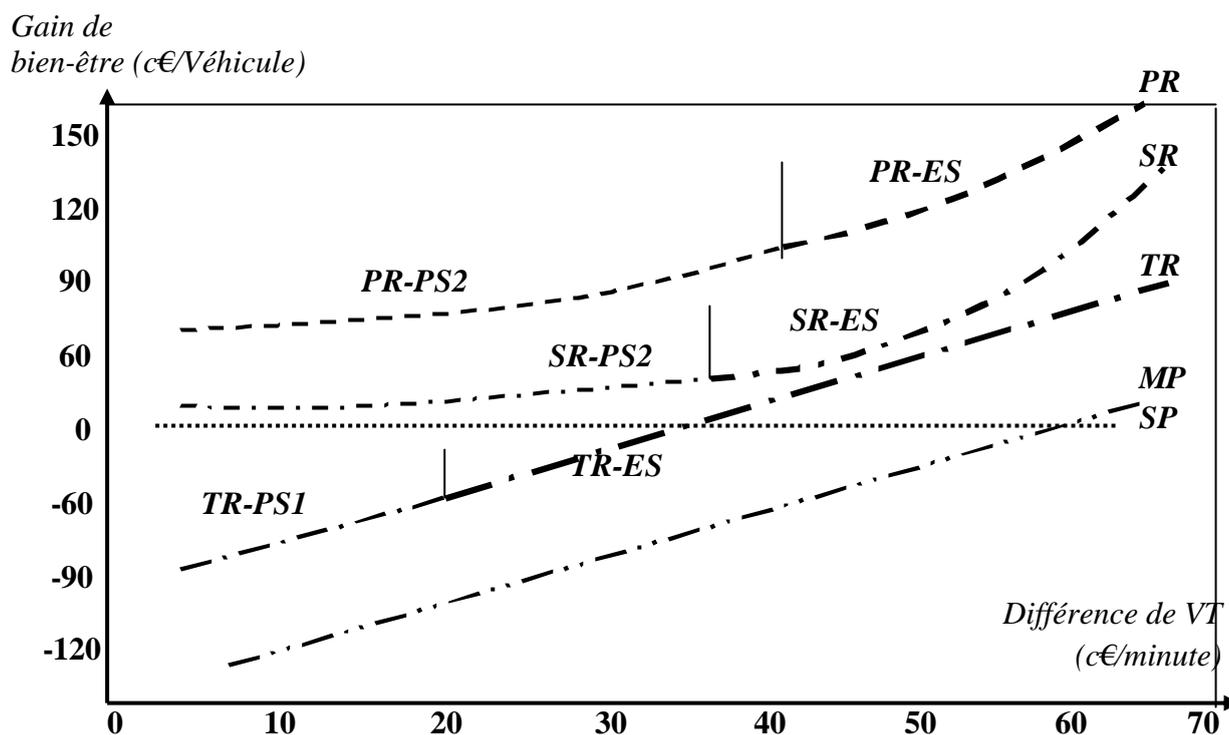


Figure 15 : Evolution du gain en bien-être avec une inversion des capacités

Ces résultats démontrent l'importance de la prise en compte de l'hétérogénéité des valeurs du temps des usagers dans les péages urbains. En effet, comme le signale les auteurs : "L'existence d'hétérogénéité favorise de telles politiques car la différenciation des produits offre un avantage considérable aux deux groupes d'usagers" (K. SMALL et J. YAN, 2000, p. 18). Dans le cas où l'hétérogénéité est "extrême", il est collectivement préférable de laisser une voirie gratuite ; dans le cas contraire il est optimal de faire payer les deux routes. Ainsi, dans le scénario de base et pour une "hétérogénéité moyenne" des usagers, la tarification de second rang ne procure qu'un quart des gains sociaux de la politique de premier rang. De cette simulation nous pouvons conclure que :

- d'une part, lorsque les politiques dictent qu'un réseau est gratuit, les coûts agrégés sont réduits en laissant les réseaux payants devenir moins congestionnés (incitation au covoiturage) ;
- d'autre part la prise en compte de l'hétérogénéité des usagers améliore la "performance" des politiques de tarification partielle (SR, TR, MP) en créant une valeur significative pour la différenciation des automobilistes, surtout lorsque l'élasticité-prix de la demande est élevée et que la congestion en l'absence de péage est intense.

Conclusion

Au cours de ce second chapitre, nous sommes revenus sur les théories et la littérature qui fondent le concept de "péage de congestion". Cet instrument politique, apparemment efficace d'un point de vue théorique, n'en demeure pas moins délicat à mettre en place. Les autorités publiques hésitent à prendre politiquement le risque d'implanter un péage, car la mesure est peu acceptée par les populations.

Nous avons présenté les modèles de référence en matière de tarification de la congestion. Dans la section 2, nous avons insisté sur les oppositions entre les modèles de flux et de files d'attente. Et la section 3 a permis de faire le point sur une autre forme de tarification de la congestion : celle qui n'exclut pas les automobilistes ayant une faible valeur du temps. En conservant une voirie alternative gratuite, les pouvoirs publics proposent ainsi aux automobilistes pressés une "*route de première classe*".

Il s'avère toutefois que des politiques d'accompagnement du péage peuvent être envisagées pour rendre plus acceptable l'instrument tarifaire. Ainsi le développement des transports collectifs (Partie II) est une des solutions possibles qui s'offre au décideur. Dans les chapitres suivants, nous considérerons des modèles plus complexes qui prennent en compte d'autres éléments non retenus ici comme la redistribution des recettes du péage et le développement des transports collectifs.

ANNEXE DU CHAPITRE II

Le modèle de K. SMALL et J. YAN (2001)

Nous supposons qu'au moins quelques usagers du groupe 1 empruntent la voie A et que certains usagers du groupe 2 utilisent la voie B. En situation d'encombrement, le péage correspondant est strictement positif. De fait, le problème de la tarification du premier rang (PR) peut s'écrire :

$$\max W = \int_0^{N_{1A}+N_{1B}} P_1(t) dt + \int_0^{N_{2A}+N_{2B}} P_2(t) dt - \sum_i \sum_r N_{ir} C_{ir}$$

sous contrainte de :

$$h_1 \circ P_1(N_{1A}+N_{1B}) - C_{1A}(N_{1A}+N_{2A}) - t_A = 0 \tag{A1}$$

$$h_2 \circ P_1(N_{1A}+N_{1B}) - C_{1A}(N_{1A}+N_{2A}) - t_A = 0 \tag{A2}$$

$$h_2 \circ P_2(N_{2A}+N_{2B}) - C_{2B}(N_{1B}+N_{2B}) - t_B = 0 \tag{A3}$$

$$h_3 \circ N_{1B} \cdot (P_1 - C_{1B} - t_B) = 0 \tag{A4}$$

$$h_4 \circ N_{2A} \cdot (P_2 - C_{2A} - t_A) = 0 \tag{A5}$$

$$g_1 \circ P_1(N_{1A}+N_{1B}) - C_{1B}(N_{1B}+N_{2B}) - t_B \leq 0 \tag{A6}$$

$$g_2 \circ P_2(N_{2A}+N_{2B}) - C_{2A}(N_{1A}+N_{2A}) - t_A \leq 0 \tag{A7}$$

$$g_3 \circ -N_{1B} \leq 0 \tag{A8}$$

$$g_4 \circ -N_{2A} \leq 0 \tag{A8}$$

Où $P(\cdot)$ et $C(\cdot)$ sont des fonctions définies dans la section 3.

Certaines contraintes sont ajoutées pour les régimes SR, TR et MP, et la fonction objective est remplacée par les recettes du péage dans la politique MP. Puisque nous posons que $N_{1B}, N_{2A} > 0$, (A1) et (A2) sont identiques à (3) ; (A3) et (A4) sont identiques à (5c) et (5d) ; (A5) et (A6) à (5a) et (5b) ; puis (A7) et (A8) à (5e).

Supposons que I_1, I_2, I_3, I_4 sont les multiplicateurs de Lagrange pour les quatre premières contraintes d'égalité, et g_1, g_2, g_3, g_4 sont les contraintes associées

aux contraintes d'inégalité. Selon le théorème de KUHN et TUCKER, les conditions nécessaires pour obtenir la solution optimale⁵⁴ sont :

$$\tilde{N}W(N^*) - \sum_{i=1}^4 \lambda_i \tilde{N}h_i(N^*) - \sum_{j=1}^4 g_j^* \tilde{N}g_j(N^*) = 0 \quad (A9)$$

$$g_j^* g_j(N^*) = 0, \quad j=1,2,3,4 \quad (A10)$$

$$g_j^* \geq 0, \quad j=1,2,3,4 \quad (A11)$$

$$g_j \leq 0, \quad j=1,2,3,4 \quad (A12)$$

Si les contraintes (A5) et (A6) sont saturées en même temps, les péages doivent être identiques sur les deux routes avec la politique PR. Or, les résultats numériques prouvent que cette situation n'est pas optimale, et en conséquence, il existe seulement trois solutions possibles :

- $g_1^* = 0, g_2^* \neq 0$ (PS2). Dans ce cas, $g_2 = 0$, et les usagers du type 2 sont indifférents au choix des itinéraires. De plus, $g_1 \neq 0$, et les usagers du groupe 1 n'empruntent que la voie A ($N_{1B}^* = 0$).
- $g_1^* \neq 0, g_2^* = 0$ (PS1). Dans ce cas, $g_1 = 0$, et les usagers du type 1 sont indifférents au choix des itinéraires. De plus, $g_2 \neq 0$, et les usagers du groupe 2 n'empruntent que la voie B ($N_{2A}^* = 0$).
- $g_1^* = 0, g_2^* = 0$. Dans ce cas, il y a trois solutions : $g_2 = 0$ et $g_1 \neq 0$, et les usagers du groupe 1 n'empruntent que la voie A ($N_{1B}^* = 0$) (PS2) ; $g_1 = 0$ et $g_2 \neq 0$, et les usagers du groupe 2 n'empruntent que la voie B ($N_{2A}^* = 0$) (PS1) ; puis $g_1 = 0$ et $g_2 = 0$, ($N_{1B}^* = 0$) et ($N_{2A}^* = 0$) (ES).

Ensuite, SMALL et YAN (2001) recherchent les péages optimaux pour chaque équilibre (ES, PS1 et PS2) et dans chaque politique.

1. Politique PR :

* Cas ES : On pose N_{1B} , $N_{2A} = 0$ dans la fonction de bien-être, ainsi :

⁵⁴ $N^* = (N_{1A}^*, N_{1B}^*, N_{2A}^*, N_{2B}^*), I^* = (I_1^*, I_2^*, I_3^*, I_4^*), g^* = (g_1^*, g_2^*, g_3^*, g_4^*)$.

$$\max W = \int_0^{N_{1A}} P_1(t) dt + \int_0^{N_{2B}} P_2(t) dt - N_{1A} C_{1A}(N_{1A}) - N_{2B} C_{2B}(N_{2B})$$

La solution doit être unique, et les péages correspondants sur les deux routes sont déterminés par (A.1 et A.2) :

$$t_A = P_1 - C_{1A} = N_{1A} \cdot C'_{1A}(N_{1A}) \circ CmE_{1A}$$

$$t_B = P_2 - C_{2B} = N_{2B} \cdot C'_{2B}(N_{2B}) \circ CmE_{2B}$$

Où chaque péage est égal à la différence entre le coût marginal social et le coût marginal privé de chaque route, et est connu sous le terme de *coût marginal externe (CmE)*.

* Cas PS1 : On pose $N_{2A} = 0$ dans la fonction de bien-être, ainsi :

$$\max W = \int_0^{N_{1A}+N_{1B}} P_1(t) dt + \int_0^{N_{2B}} P_2(t) dt - N_{1A} C_{1A}(N_{1A}) - N_{1B} C_{1B}(N_{1B} + N_{2B}) - N_{2B} C_{2B}(N_{1B} + N_{2B})$$

La solution doit être unique, et les péages correspondants sur les deux routes sont déterminés par (A.1 et A.2) :

$$t_A = P_1(N_{1A} + N_{1B}) - C_{1A} = N_{1A} \cdot C'_{1A}(N_{1A}) \circ CmE_{1A}$$

$$t_B = P_1(N_{1A} + N_{1B}) - C_{1B} = N_{1B} \cdot C'_{1B}(N_{1B} + N_{2B}) + N_{2B} \cdot C'_{2B}(N_{1B} + N_{2B}) \circ CmE_B = P_2 - C_{2B}$$

Ici, le coût social de la route A inclut seulement les usagers du groupe 1 et le coût social de la voie B considère les deux groupes d'automobilistes.

* Cas PS2 : On pose $N_{1B} = 0$ dans la fonction de bien-être, ainsi :

$$\max W = \int_0^{N_{1A}} P_1(t) dt + \int_0^{N_{2B}+N_{2A}} P_2(t) dt - N_{2B} C_{2B}(N_{2B}) - N_{1A} C_{1A}(N_{1A} + N_{2A}) - N_{2A} C_{2A}(N_{1A} + N_{2A})$$

La solution doit être unique, et les péages correspondants sur les deux routes sont déterminés par (A.1 et A.2) :

$$t_A = P_1(N_{1A}) - C_{1A} = N_{1A} \cdot C'_{1A}(N_{1A} + N_{2A}) + N_{2A} \cdot C'_{2A}(N_{1A} + N_{2A}) \circ CmE_A = P_2 - C_{2A}$$

$$t_B = P_2(N_{2A} + N_{2B}) - C_{2B}(N_{2B}) = N_{2B} \cdot C'_{2B}(N_{2B}) \circ CmE_{2B}$$

Ici, le coût social de la route B inclut seulement les usagers du groupe 2 et le coût social de la voie A considère les deux groupes d'automobilistes.

2. Politiques SR et TR :

La politique TR est identique à la politique SR excepté le fait que nous ajoutons une contrainte (6), que nous contrôlons séparément plutôt que de l'inclure dans le Lagrangien.

* Cas ES : On pose N_{IB} , $N_{2A} = 0$ dans la fonction de bien-être, ainsi :

$$\max W = \int_0^{N_{1A}} P_1(t) dt + \int_0^{N_{2B}} P_2(t) dt - N_{1A} C_{1A}(N_{1A}) - N_{2B} C_{2B}(N_{2B})$$

s/c:

$$P_2(N_{2B}) = C_{2B}(N_{2B})$$

La solution doit être unique, et le péage correspondant sur la route A est déterminé par (A.1) :

$$t_A = P_1 - C_{1A} = N_{1A} \cdot C'_{1A}(N_{1A}) \circ C_{mE_{1A}}$$

Où le péage est égal à la différence entre le coût marginal social et le coût marginal privé de la route A, et est connu sous le terme de *coût marginal externe* (**CmE**).

* Cas PS1 : Dans ce cas le Lagrangien correspondant est :

$$L = W - I_2 [P_2(N_{2B}) - C_{2B}(N_{1B} + N_{2B})] - g_1 [P_1(N_{1A} + N_{1B}) - C_{1B}(N_{1B} + N_{2B})]$$

Où (A.5) a été utilisé comme une égalité avec le multiplicateur de Lagrange g_1 .

Ensuite, en utilisant (A.1), nous déterminons le péage sur la route A :

$$t_A = N_{1A} C'_{1A} + \frac{C_{1B} - N_{1B} C'_{1B} - N_{2B} C'_{2B} - \frac{\partial P_2}{\partial P_1} P_1}{P_1' P_2' - P_1' C'_{2B} - P_2' C'_{1B}}$$

Le péage est égal au coût marginal dû à la congestion plus un élément qui dépend aussi bien de la fonction de la courbe de demande que de la fonction de la courbe de coût.

* Cas PS2 : Le Lagrangien correspond à :

$$L = \int_0^{N_{1A}} P_1(t) dt + \int_0^{N_{2B}+N_{2A}} P_2(t) dt - N_{2B}C_{2B}(N_{2B}) - N_{1A}C_{1A}(N_{1A}+N_{2A}) - N_{2A}C_{2A}(N_{1A}+N_{2A})$$

$$- I_1 [P_1(N_{1A}) - C_{1A}(N_{1A}+N_{2A}) - [P_2 - C_{2A}(N_{1A}+N_{2A})]] - I_2 [P_2(N_{2A}+N_{2B}) - C_{2B}(N_{2B})]$$

Où I_1 représente l'augmentation du bien-être collectif qui pourrait être réalisé en taxant davantage les usagers du groupe 1 par rapport aux usagers du groupe 2.

Ensuite, en utilisant (A.1), nous déterminons le péage sur la route A :

$$t_A = N_{1A}C'_{1A} + N_{2A}C'_{2A} - \frac{P'_1 - C'_{1A} + C'_{2A} \frac{P'_2 N_{2B} C'_{2B}}{\theta}}{P'_1 P'_2 - P'_1 C'_{1B} - P'_2 C'_{2B}}$$

Le péage est égal au coût marginal dû à la congestion plus un élément qui dépend aussi bien de la fonction de la courbe de demande que de la fonction de la courbe de coût.

3. Politique MP :

Dans cette situation, les contraintes sont les mêmes que celles présentées avec la politique SR. Toutefois, l'objectif étant de maximiser les recettes et non le bien-être collectif, la fonction objective s'écrit alors :

$$R = (N_{1A}) [P_1(N_{1A}) - C_{1A}(N_{1A}+N_{2A})] + N_{2A} [P_2(N_{2A}+N_{2B}) - C_{2A}(N_{1A}+N_{2A})]$$

*Cas ES : Dans ce cas la solution doit être unique, le péage maximisant les recettes est déterminé :

$$t_A = N_{1A} [C'_{1A}(N_{1A}) - P_1]$$

Le péage est égal au coût marginal dû à la congestion plus une majoration monopolistique ("*monopolistic mark-up*") qui est inversement liée à l'élasticité de la demande du groupe 1.

*Cas PS1 : Le péage maximisant les recettes sur la route A est :

$$t_A = N_{IA}C'_{IA} - N_{IA}P'_1 + \frac{\frac{\partial}{\partial \theta} N_{IA}(P'_1)^2 \frac{\partial}{\partial \theta} (P'_2 - C'_{2B})}{\frac{\partial}{\partial \theta} (P'_1(P'_2 - C'_{2B}) - P'_2 C'_{1B})}$$

* Cas PS2 : Le péage s'écrit :

$$t_A = N_{IA}C'_{IA} + N_{2A}C'_{2A} - N_{IA}P'_1 + \frac{\frac{\partial}{\partial \theta} (P'_1 - C'_{IA} + C'_{2A}) \frac{\partial}{\partial \theta} (P'_2 N_{2A}C'_{2B} + P'_1 P'_2 N_{IA} - P'_1 N_{IA}C'_{2B})}{P'_1 P'_2 - P'_1 C'_{1B} - 2(P'_2)^2 + P'_2 C'_{2B}}$$

Ici aussi, le péage est égal au coût marginal dû à la congestion plus une majoration monopolistique ("monopolistic mark-up").

BIBLIOGRAPHIE DE L'INTRODUCTION GENERALE ET DE LA PARTIE I

ARNOTT R., 1985 : "Quelques résultats relatifs à l'analyse économique des flux de trafic non stationnaires", *Revue économique*, n°36 (1), pp. 11-43.

ARNOTT R., A. DE PALMA et R. LINDSEY, 1990a : "Economics of a bottleneck", *Journal of Urban Economics*, n° 27, pp. 111-130.

ARNOTT R., A. DE PALMA et R. LINDSEY, 1990b : "Departure time and route choice for routes in parallel", *Transportation Research part B*, n° 24 (3), pp. 209-228.

ARNOTT R., A. DE PALMA et R. LINDSEY, 1992 : "Route choice with heterogeneous drivers and group-specific congestion costs " *Regional Science and Urban Economics*, n°22, pp. 71-102.

ARNOTT R., A. DE PALMA et R. LINDSEY, 1993 : "A structural model of peak-period congestion: a traffic bottleneck with elastic demand", *American Economic Review*, n°83, pp. 161-179.

ARNOTT R., A. DE PALMA et R. LINDSEY, 1994 : "The welfare effects of congestion tolls with heterogeneous commuters", *Journal of Transport Economics and Policy*, n° 28 (2), pp. 139-161.

ARNOTT R., A. DE PALMA et R. LINDSEY, 1998 : "Recent developments in the bottleneck model" in K.J. BUTTON et E.T. VERHOEF (eds.) (1998) *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility* Edward Elgar, Cheltenham, pp. 79-110.

ASCHER F., 2000 : *Ces événements nous dépassent, feignons d'en être les organisateurs*, L'aube.

BAUMSTARK L. et A. BONNAFOUS, 1997 : "La relecture théorique de Jules Dupuit par Maurice Allais face à la question du service public", Document de travail n° 97/03, LET, Lyon.

BOITEUX M. (sous la dir.), 2001 : *Transports : choix des investisseurs et coût des nuisances*, rapport pour le Commissariat Général au Plan, Juin 2001.

BONNAFOUS A., 1992 : "Transports et environnement : comment valoriser et maîtriser les effets externes ?", *Economie et Statistiques*, n°258-259, pp. 121-127.

- BOUF D. et Y. CROZET, 1992 : "Péage urbain versus congestion : l'économiste et les usagers", in LEE-GOSSELIN M. et RAUX C. (eds.), *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage*, Edition du P.P.S.H., recherches en Sciences Humaines, Lyon pp. 129-141.
- BOURBOULON I., 1997 : "Des villes asphyxiées par l'automobile", *Le Monde Diplomatique*, décembre 1997, p.18.
- BRAID R. M., 1996 : "Peak-load pricing of a transportation route with an unpriced substitute", *Journal of Urban Economics*, n°40, pp. 179-197.
- BUTTON K.J., 1993 : *Transport economics*, 2^{ème} édition, Edward Elgar, University Press, Cambridge, Great Britain.
- BUTTON K.J., 1998 : "Road pricing and the alternatives for controlling in road traffic congestion", in K.J. BUTTON et E.T. VERHOEF (eds.) (1998) *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility* Edward Elgar, Cheltenham, pp. 113-135.
- BUTTON K.J. et E.T. VERHOEF (eds.), 1998 : *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility*, Edward Elgar, Cheltenham.
- C.C.F.A., 2001 : *Analyse et statistiques, L'industrie automobile française*, Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (www.ccfa.fr/publication/analyses.htm).
- C.C.F.A., 2004 : *Analyse et statistiques, L'industrie automobile française*, Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (www.ccfa.fr/publication/analyses.htm).
- C.E., 2004 : *Energie et Transports : Bilan 2000-2004*, direction générale de l'énergie et des transports, Bruxelles, 92 p.
- C.E.E., 1995 : *Vers une tarification équitable et efficace dans les transports*, livre vert, Bruxelles, Belgique.
- C.E.M.T., 1998 : *La congestion routière en Europe*, Table ronde 110, O.C.D.E. Paris.
- C.E.M.T., 2000 : *Trends in the transport sector 1970-1998*, OCDE, Paris, 93 p.
- C.E.R.T.U., 2000a : *Les premières mises en place du stationnement payant sur voirie : quelle acceptabilité pour les mesures de tarification ?* Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Lyon.
- C.E.R.T.U., 2000b : *Le financement des déplacements urbains : quelle acceptabilité pour les péages urbains ?*, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, Lyon..

C.E.R.T.U., 2001 : *Tarification des déplacements automobiles urbains. La question de l'acceptabilité*, Collection Débat, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.

CHU X., 1995 : "Endogenous trip scheduling: the Henderson approach reformulated and compared with the Vickrey approach", *Journal of Urban Economics*, n°37, pp. 324-343.

CHU X., 1999 : "Alternative congestion pricing schedules", *Regional Science and Urban Economics*, n°29 (6), pp.697-722.

CROZET Y. et G. MARLOT, 2001 : "Péage urbain et ville « soutenable » : figures de la tarification et avatars de la raison économique", *les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°40/2001, pp. 79-113.

CROZET Y., 1997 : *Analyse économique de l'Etat*, Collection Cursus, Armand Collin, Paris, 191 p.

DARBERA R., 2001 : "Effets redistributifs et allocatifs d'une modification de la TIPP sur les carburants automobiles", *Recherche Transports Sécurité*, n° 72, pp. 37-55.

DE BORGER B. et S. PROOST. (eds.), 2001 : *Reforming transport Pricing in European Union : A Modelling Approach*, Edward Elgar, Cheltenham.

DE BORGER B., J. PEIRSON et R. VICKERMAN, 2001 : "An overview of policy instruments", in B. DE BORGER et S. PROOST (eds.) *Reforming transport Pricing in European Union : A Modelling Approach* Edward Elgar, Cheltenham, pp. 37-50.

DE PALMA A. et E. QUINET (eds.), 2005 : *La tarification des transports : Enjeux et défis*, Economica, Paris.

DE PALMA A. et R. LINDSEY, 2000 : "Private roads: competition under various ownership regimes", *Annals of Regional Science*, n°34, pp. 13-35.

DE PALMA A. et R. LINDSEY, 2005 : "Concepts économiques fondamentaux pour la tarification et le financement des systèmes de transport", in A. DE PALMA et E. QUINET (eds.) *La tarification des transports : Enjeux et défis*, Economica, Paris, pp. 37-64.

DERYCKE P. H., 1997 : *Le péage urbain – Histoire, analyse, politiques*, Economica, Paris, 205 p.

DERYCKE P. H., 1999 : "De la congestion au péage. Réflexions sur l'article de Rémy Pud'homme", *Revue d'économie politique*, n°109 (4), pp. 443-449.

DERYCKE P. H., 2000 : "Mobilité, congestion, péage. Réflexions sur les politiques de réduction de l'encombrement urbain", *Revue d'économie régionale et urbaine*, n°1/2000, pp. 157-168.

DUPUIT J., 1873 : "Voies de communication", *Dictionnaire de l'économie politique*, Coquellin et Guillaumin, 4^e édition, tome 2, Paris, pp. 846-854.

FAUCHEUX S. et J.-F. NOËL, 1995 : *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*, Collection U-Economie, Armand Colin, Paris.

GLACHANT M. et BUREAU B., 2004 : *Economie des effets distributifs de la tarification de la circulation en zone urbaine*, Paris, ARMINES – CERNA, 122 p.

GOMEZ-IBANEZ J., 1992: "The Political Economy of Highway Tolls and Congestion Pricing", *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 46, n° 3, pp. 343-360.

GOODWIN P.B., 1992 : "A review of new demand elasticities with special reference to short and long run effects of price changes", *Journal of Transport Economics and Policy*, n° 26, pp. 155-170.

HENDERSON J., 1992 : "Peak shifting and cost-benefit miscalculations", *Regional Science and Urban Economics*, n°22, pp. 103-121.

I.F.E.N., 2004 : *Les coûts environnementaux de l'automobile : une mise en perspective de l'évolution*, Institut Français de l'Environnement, 158 p.

INFRAS/IWW, 2004 : *Les coûts externes des transports. Etude d'actualisation*, document de synthèse, Zurich/Karlsruhe, 18 p.

International Energy Agency : Adresse Internet : www.iea.org.

KAUFMANN V., 2003 : "Mobilités et modes de vie : les politiques de transports urbains au cœur de nos contradictions", in *Demain, quelle(s) mobilité(s), quelle(s) perspective(s) d'action dans nos villes ?*, séminaire de prospective urbaine, Sénat, pp. 9-11.

KNIGHT F., 1924 : "Some fallcies in the interpretation of social cost", *Quarterly Journal of Economics*, n°38, pp. 582-606.

LEE-GOSSELIN M. et C. RAUX, 1992 : "La mobilité urbaine : de la paralysie au péage", Edition du P.P.S.H., recherches en Sciences Humaines, Lyon.

LEVEQUE F., 1998 : *Economie de la réglementation*, Collection Repères, La découverte, Paris, 125 p.

LEVEQUE, F., 1999 : "Instruments économiques et ville soutenable", Colloque « Evolution urbaine et développement durable », *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 4 février 1999.

LINDSEY C.R. et E.T. VERHOEF, 1999 : "Congestion modelling", working paper, *Tinbergen Institute Discussion Paper*.

LINDSEY C.R. et E.T. VERHOEF, 2000 : "Traffic congestion and congestion pricing", working paper, *Tinbergen Institute Discussion Paper*.

LITMAN T., 1999 : "Using Road Pricing Revenue: Economic Efficiency and Equity Considerations", Working paper, *Victoria Transport Policy Institute*, (www.vtpi.org).

LIU L.N. et J. F. McDONALD (1998) : "Efficient congestion tolls in the presence of unpriced congestion: a peak and off-peak simulation model", *Journal of Urban Economics*, n° 44, pp. 352-366.

LIU L.N. et J. F. McDONALD (1999) : "Economic efficiency of second-best congestion pricing schemes in urban highway systems", *Transportation Research Part B*, n° 33, pp. 157-188.

M. H. MASSOT, 2003 : "La mobilité individuelle dans 20 ans", in *Demain, quelle(s) mobilité(s), quelle(s) perspective(s) d'action dans nos villes ?*, séminaire de prospective urbaine, Sénat, pp. 20-23.

MARLOT G., 2002 : *Efficacité et acceptabilité de la régulation de la congestion. Du péage optimal aux permis de circuler négociables*, Thèse de doctorat de Sciences Economiques, Université de Lyon II, décembre.

MIRABEL F., 1996 : *Energie, transports et externalités : comportements et politiques optimales de localisation et de déplacement dans l'espace urbain*, Thèse de doctorat de Sciences Economiques, Université de Montpellier I, novembre, 653 pages.

MIRABEL F., 1999 : "Efficacité des instruments de politique publique : quels outils pour améliorer la qualité environnementale du parc automobile ?", working paper, *ARC ECODIF Transports individuels*.

MUN, S., K. KONISHI et K. YOSHIKAWA, 2003 : "Optimal cordon pricing", *Journal of Urban Economics*, n° 54, pp. 21-38.

- ORFEUIL, J. P. 2001 : "Entre autonomie et servitude volontaire", *Les Cahiers de Médiologie*, n° 12, pp. 193-201.
- PAPON F., 1992 : "Les "routes de première classe" : un péage urbain choisi par l'utilisateur", in *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage*, LEE-GOSSELIN M. et RAUX C. , pp. 143-164, Edition du P.P.S.H., recherches en Sciences Humaines, Lyon.
- PIGOU A., 1920 : *Economics of welfare*, 4th edition, Macmillan, London, 1932.
- PRATT R., 1999 : *Traveler Response to Transportation System Changes*, Interim Handbook, www4.nationalacademies.org/trb/crp.nsf/all+projects/tcrp+b-12.
- PRUD'HOMME R., 1999 : "Les coûts de congestion dans la région parisienne", *Revue d'économie politique*, n° 109 (4), pp. 425-441.
- REYMOND M., 2003a : "De la congestion au péage urbain : entre régulation et gain de temps", *Transports*, n° 417, pp. 31-42.
- SMALL K. A. et J. YAN, 2000 : "The Value of "Value Pricing" of Roads: Second-Best Pricing and Product Differentiation", *Discussion Paper 00-08*, Resources for the future (www.rff.org).
- SMALL K. A. et J. YAN, 2001 : "The Value of "Value Pricing" of Roads: Second-Best Pricing and Product Differentiation", *Journal of Urban Economics*, n° 49, pp. 310-336.
- SMALL K., 1982 : "The scheduling consumer activities : work trips", *American Economic review*, n° 72, pp. 467-479.
- TABUCHI T., 1993 : "Bottleneck congestion and modal split", *Journal of Urban Economics*, n° 34, pp. 414-431.
- TfL, 2003 : "Central London Congestion Charging : Six months on October 2003", <http://www.tfl.gov.uk/tfl/downloads/pdf/congestion-charging/cc-6monthson.pdf> .
- VERHOEF E. T., 2001 : "An integrated dynamic model of road traffic congestion based on simple car-following theory : exploring hypercongestion", *Journal of Urban Economics*, n°49, pp. 505-542.
- VERHOEF, E.T., P. NIJKAMP et P. RIETVELD, 1996 : "Second-best congestion pricing: the case of an untolled alternative", *Journal of Urban Economics*, n°40, pp. 279-302.
- VERHOEF E.T. et K.A. SMALL, 1999 : "Product Differentiation on Roads: Second-Best Congestion Pricing with Heterogeneity under Public and Private Ownership," Irvine Economics Paper 99-00-01, University of California at Irvine.

VICKREY W.S., 1969 : "Congestion theory and transport investment", *American Economic Review (Papers and Proceedings)*, n° 59, pp. 251-260.

VICTORIA TRANSPORT POLICY INSTITUTE, 2005 : *Transportation Demand Management*, adresse Internet : <http://www.vtpi.org/tdm/>, visité le 25 juillet 2005.

WALTERS A.A., 1961 : "The theory and measurement of private and social cost of highway congestion", *Econometrica*, n° 29 (4), pp. 676-697.

WARDROP J., 1952 : "Some theoretical aspects of road traffic research", *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, n°1 (II), pp. 325-378

WOHL M. et HENDRICKSON C., 1984 : *Transportation Investment and Pricing Principles*, John Wiley & Sons, New York.

ZHANG X. et H. YANG, 2004 : "The optimal cordon-based network congestion pricing problem", *Transportation Research Part B*, n° 38, pp. 517-537.

PARTIE II

TARIFICATION DE LA CONGESTION ET REPARTITION MODALE : LA REDISTRIBUTION DES RECETTES DU PEAGE

CHAPITRE III

LA TARIFICATION DE LA CONGESTION ET LA REDISTRIBUTION DES RECETTES VERS LES TRANSPORTS COLLECTIFS

CHAPITRE III. LA TARIFICATION DE LA CONGESTION ET LA REDISTRIBUTION DES RECETTES DU PÉAGE

Introduction

Le péage urbain est connotée de façon péjorative par la plupart des automobilistes comme le révèlent les enquêtes sur l'acceptabilité réalisées dans différentes villes (PATS, 2000 ; PRIMA, 2000 ; M. REYMOND, 2004a). Dans le cadre d'une tarification de la congestion par le péage, les autorités peuvent mettre en place différentes politiques d'accompagnement visant à rendre plus acceptable le péage. Ainsi, parmi elles, le développement des transports collectifs peut être une solution adéquate puisqu'elle propose un service public permanent aux usagers.

Certains auteurs ont étudié le comportement des individus face à un choix entre les deux modes (transports collectifs versus route à péage) en partant du modèle de file d'attente proposé par ARNOTT et al. (1990a, 1993) d'après les travaux initiaux de W. VICKREY (1963, 1969). T. TABUCHI (1993) et R. DANIELIS et E. MARCUCCI (1999, 2002) proposent d'analyser la répartition modale en considérant que le prix du billet de transports collectifs est égal au coût marginal, puis en le fixant au coût moyen.

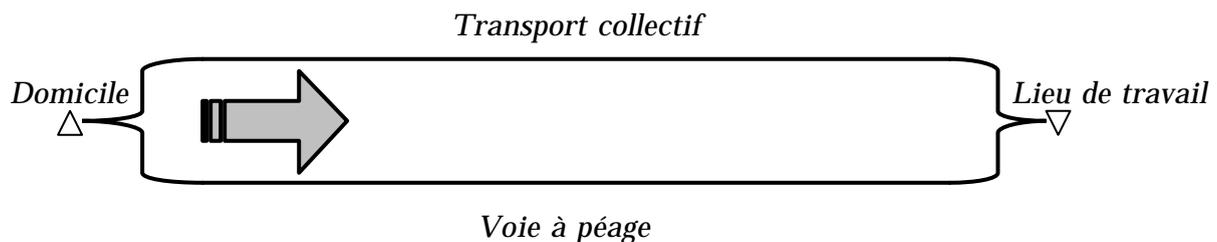


Figure 1 : Mode de transport différencié

La littérature sur le sujet est assez restreinte et nous proposons d'approfondir la question de la répartition modale en intégrant les recettes du péage de congestion. Ainsi les recettes du péage peuvent être redistribuées en partie ou en intégralité vers les transports collectifs afin de les rendre plus rentables.

Au préalable, une première section permettra de faire le point sur la question de la redistribution des revenus du péage. En reprenant divers travaux, nous exposerons un

point de vue essentiel : les recettes du péage ne doivent pas être restituées intégralement aux automobilistes payeurs. En effet, une telle affectation rendrait contradictoire et inefficace une tarification de la congestion. Mais le problème de l'affectation des ressources est posé lorsque celle-ci reste opaque. Le dilemme du décideur politique s'exprime ainsi : orienter les recettes du péage directement vers un mode de transport ou respecter le principe de non affectation des ressources ? Et dans le premier cas doit-on destiner les recettes aux transports collectifs ou au développement du réseau routier ?

Ensuite, dans le cadre de la littérature standard des modèles de files d'attente nous analyserons l'impact d'une redistribution en essayant de montrer que la problématique de l'acceptabilité du péage renvoie aux questions relatives à la redistribution des recettes. Dans la seconde section, nous présenterons, par le biais d'une modélisation, une situation particulière où le prix du billet est fixé au coût marginal et les recettes intégralement redistribuées vers les transports collectifs et dans la section 3 nous supposerons le prix du billet égal au coût moyen. Dans chacun des cas nous considérerons 3 situations : sans péage, avec péage de pointe et avec péage uniforme.

Section 1. L'affectation des recettes du péage de congestion

La question de l'acceptabilité du péage de congestion renvoie à une pluralité de notions dont celle de la liberté de circuler, l'équité et la discrimination en sont les principales. L'implication des revenus du péage dans la mise en place d'une telle politique des transports peut néanmoins en affecter positivement ou négativement la réalisation et l'acceptation collective.

Dans la littérature économique portant sur la question précise de l'affectation des recettes du péage, peu de travaux théoriques ont été développés. Nous y reviendrons dans une sous-section (1.2.) après avoir rappelé les objectifs qui peuvent être fixés par un péage de congestion (1.1.) tel qu'il a été présenté dans le chapitre précédent.

1.1. Les objectifs d'un péage de congestion

Longtemps suggéré par les économistes, le péage de congestion n'a connu que peu de mises en œuvre et peu de succès. Autour de sa réalisation, le décideur politique doit savoir quels sont précisément les buts fixés et quel sera le niveau d'acceptabilité de cette mesure.

1.1.1. Le péage de congestion comme régulateur de la circulation

L'objectif de ce péage est de contenir la demande de voirie en maîtrisant les déplacements automobiles. Nous sommes ici dans une situation où le tarif du péage est modulé dans le temps. C'est le péage de pointe déjà évoqué, réduisant la congestion en orientant une part des automobilistes en dehors de la période de pointe. La finalité d'un tel péage est **la dissuasion de circuler durant une période donnée**. Ainsi, le niveau tarifaire n'est pas fixé dans l'objectif de récolter une somme d'argent donnée.

Ici la question de l'affectation des recettes du péage devient inévitablement ambiguë pour plusieurs raisons :

- le décideur politique ne pourra pas anticiper les recettes à venir avec un tel péage, car celles-ci varieront en fonction des niveaux de péage et donc de congestion ;
- dans le cas où une offre de déplacement alternative est séduisante, les effets d'un péage de congestion peuvent être tels que les automobilistes de la

période t délaissent leurs véhicules et rendent le péage inefficace en période $t+1$.

La solution politique revient à énoncer que les recettes, si recettes il y a, seront affectées au prorata des passages automobiles et de la congestion. Les recettes ne sont déterminées qu'**a posteriori**.

Le péage de la congestion n'a pas pour vocation à engranger des recettes, sa finalité dissuasive ne peut pas permettre au décideur de planifier des projets collectifs sur le long terme en se basant sur les éventuelles recettes.

1.1.2. Le péage de congestion hybride : péage de régulation et péage de financement

La logique d'un péage de financement est exclusivement d'obtenir les recettes nécessaires à la réalisation de projets de transports (en France, cela consiste à augmenter le réseau routier et l'offre de voirie). A partir de plusieurs études et enquêtes, après quelques mois de mise en place, le planificateur peut prévoir sur le long terme le niveau des recettes. Les recettes sont alors déterminées en **amont**.

Loin de n'être « qu'un péage de financement », le péage de congestion que nous désignons ici comme **hybride**, en conserve pourtant quelques propriétés. Parmi elles, celle de recouvrer des recettes afin de concrétiser un projet (développement d'une nouvelle voirie ou des transports collectifs). Ceci influe donc nécessairement sur le niveau des tarifs du péage et sur sa variabilité. L'utilisateur se retrouve à la fois "*financeur d'infrastructure*" et "*pollueur payeur*" (CERTU, 2001, p. 23). Le péage de Londres est un bon exemple de compromis entre régulation (la part "*congestion charge*") et financement d'un projet (les recettes sont orientées vers l'entretien et la restauration des transports urbains).

Dans ce cadre, les autorités peuvent anticiper plus facilement qu'avec un péage de congestion traditionnel le niveau des recettes à venir (en **amont**), avec toutefois un biais. La mairie de Londres a notamment souligné que le péage de congestion (uniforme durant la période pointe) avait "*trop bien fonctionné*", car la réduction de la circulation était telle que les recettes effectives n'étaient pas celles escomptées.

1.2. Le choix de l'affectation des recettes

P. B. GOODWIN (1989, p. 495) rappelle que l'effet direct de l'instauration d'un péage routier sur les usagers est de diviser les automobilistes en deux groupes distincts :

- ceux qui payent et qui continuent à utiliser la route ;
- ceux qui modifient leur comportement et changent d'itinéraire ou d'horaire de déplacement.

Ainsi, les automobilistes payeurs doivent-ils payer pour ceux qui ne se déplacent plus comme eux, doivent-ils payer pour eux-mêmes ou doivent-ils payer pour l'ensemble de la collectivité ?

La plupart des publications portant sur le sujet montrent que si les recettes du péage ne sont pas redistribuées, ce péage entraînera une perte évidente pour les revenus les plus faibles.

Dans ce paragraphe, nous allons reprendre trois travaux fondateurs portant sur la question de l'affectation des recettes⁵⁵ (P. H. GOODWIN, 1989 ; K. SMALL, 1992 ; T. LITMAN, 1999).

1.2.1. La règle de trois de P. H. GOODWIN (1989)

Si l'on considère que l'acceptabilité de la mise en place du péage se construit sur l'affectation des recettes, les arguments politiques du péage de congestion peuvent se situer sur deux niveaux.

En premier lieu, ils se situent sur **les effets directs du péage** : baisse du trafic sur les zones à péage, orientation du trafic vers d'autres zones, transferts des automobilistes vers d'autres modes de transports.

Dans un second temps, on les retrouve sur **les effets directs des recettes du péage** (effets indirects du péage) : création de nouvelles routes, développement des transports collectifs, extension de l'espace piéton, baisses des taxes sur les automobiles...

⁵⁵ Certains auteurs (C. DAGANZO, 1995 ; C. DAGANZO et R. GARCIA, 2000) suggèrent qu'il est préférable de diminuer les transferts monétaires. L'amélioration du bien-être collectif se fera en adjoignant une mesure réglementaire au péage de congestion. Exemple : une partie des automobilistes (immatriculés pairs, par exemple) sera exempté du péage les jours pairs, et l'autre partie (immatriculés impairs) les jours impairs.

Chaque argument possède une certaine légitimité, mais "*aucun argument affirmant que les recettes ou que l'espace routier doit être affecté à un objectif particulier ne peut être justifié théoriquement*" (P. H. GOODWIN, 1989, p. 496).

Les critères objectifs du choix de l'affectation des recettes du péage dépendent essentiellement du décideur et de la pression qu'il subit. Quand le critère de choix est économique, l'objectif sera la maximisation du bien-être collectif. Avec un critère commercial, l'objectif sera la maximisation du profit. Si le décideur se voit attribuer d'une mission sociale, il pourra affecter les recettes aux plus démunis sous forme d'aides sociales... Ainsi P. H. GOODWIN insiste sur le fait que pour mener à bien l'un de ces projets, le décideur devra tenir compte du poids des différents groupes de pression concernés. Le *tableau 1* récapitule le plus exhaustivement possible les industries et les lobbies qui influenceront sur les décisions des pouvoirs publics⁵⁶.

| | |
|-------------------|--------------------------------|
| Industries | Fret |
| | Transports publics |
| | Moteur |
| | Infrastructures routières |
| Lobbies | Environnement |
| | Automobilistes |
| | Consommateurs |
| | Citadins |
| | Usagers des transports urbains |
| | Banlieusards |
| | Commerçants/entreprises |
| | Taxis |

Tableau 1: Appuis potentiels ou groupes de pression (source : P. H. GOODWIN, 1989, p.497)

⁵⁶ Signalons que l'ambition politique du décideur n'est prise en compte ici que de façon indirecte (cela relève de l'analyse des décisions publiques). Les pressions exercées par les industries n'ont pas la même finalité que celles exercées par les lobbies. Dans le second cas, le risque des sanctions électorales peut fortement peser dans les choix du décideur. M. GLACHANT et B. BUREAU (2004, p. 17-18) comparent ainsi le "*canal électoral*" et le "*canal des groupes d'intérêts*".

Au final, l'auteur présente une solution assez limitée mais pouvant satisfaire le plus grand nombre. Il propose de répartir les revenus du péage en trois : *"Un tiers considéré comme le revenu d'une taxe générale (...). Un tiers utilisé pour de nouvelles routes et pour l'entretien des infrastructures (...). Un tiers utilisé pour améliorer l'efficacité du transport public "* (id., p. 496).

A cette *"règle de trois"*, P. H. GOODWIN propose d'associer une autre règle de trois propre à l'espace routier libéré par le péage. L'espace libéré serait ainsi exploité (id. p. 496) :

"- Un tiers attribué aux améliorations environnementales, en instaurant des zones piétonnes et non motorisées.

- Un tiers utilisé pour le surplus de trafic généré par la vitesse et non dissuadé par le coût du péage. Cela pourrait correspondre à la mise en place d'infrastructures pour les high-occupancy vehicles⁵⁷.

- Le dernier tiers pour augmenter la vitesse, spécialement durant les heures de congestion."

Ces solutions, précise-t-il, peuvent faire le consensus et rien n'oblige les autorités à répartir équitablement (1/3, 1/3, 1/3) les recettes du péage.

De toute évidence, la mise en place d'un péage de congestion entraînera des bouleversements au fil des années, d'ailleurs P. H. GOODWIN *"suspecte que dans le futur, le péage routier sera une série continue de modifications de dernière-minute."* (id., p. 497)

1.2.2. Les principales orientations des recettes du péage selon K. SMALL (1992)

Dans la même perspective, K. SMALL (1992) propose de redistribuer les recettes du péage de façon à créer un consensus général auprès de la population et des différents groupes de pression : *"La stratégie consiste à investir dans des programmes avec une telle variété de distributions des recettes que presque chacun des groupes trouvera au moins quelques avantages, et la majorité percevra le projet global comme une amélioration"* (Id. p. 365). Ainsi, la solution proposée, proche de celle de P. H. GOODWIN (1989), consiste à allouer un tiers des recettes à chacune des catégories suivantes :

⁵⁷ Voies réservées exclusivement au covoiturage.

- Remboursement financier des voyageurs (a) ;
- Baisse des taxes générales (b) ;
- Création de nouveaux services de transport (c).

(a) Le remboursement des voyageurs (1/3)

Les autorités peuvent mettre en place deux instruments permettant un remboursement partiel des trajets. Dans un premier temps, affecter une part des recettes du péage à tous les voyageurs quelque soit leur mode de déplacement et leur horaire de départ du domicile, ceci permettant alors une plus grande flexibilité dans les choix de déplacement. Cela s'organiserait sous la forme d'indemnités de déplacement (subvention des employeurs versant une indemnité pour les trajets domicile-travail). Ensuite, les pouvoirs publics peuvent décider de réduire les charges qui pèsent sur les automobilistes (baisse des taxes propres à l'utilisation de la route, des taxes sur les carburants...). Pour I. PARRY et A. M. BENTO (2001) les gains d'efficacité liés à la substitution des recettes du péage de congestion en complément des réductions de certaines taxes peuvent être plusieurs fois supérieurs aux gains réalisés simplement par la diminution de la congestion⁵⁸.

(b) La réduction des taxes globales locales (1/3)

Une solution consiste à enlever en partie ou en intégralité une taxe appliquée dans la région ou dans la ville (taxe d'habitation, taxe professionnelle, mais aussi péage déjà existant). Cette réduction peut aussi prendre la forme de remise sur les surtaxes régionales liées à l'achat des automobiles (immatriculation, vignette...).

(c) Les nouveaux services de transports (1/3)

Sur ce thème les projets ne manquent pas. K. SMALL (1992, p. 368-369) insiste sur trois affectations. La première, à ses yeux, est d'augmenter le réseau routier et autoroutier – permettant une meilleure acceptabilité du projet. Toutefois, l'offre de voirie générant la demande de voirie, cette option peut être accompagnée d'une incitation au

⁵⁸ L'article de I. PARRY et A. M. BENTO (2001) est l'un des rares travaux modélisant la redistribution des recettes du péage. Dans leur papier, les auteurs s'intéressent aux effets du péage de congestion sur le monde du travail et les conséquences d'une réallocation des recettes sur l'offre de travail.

covoiturage en créant des voies réservées exclusivement aux voitures avec un ou plusieurs passagers⁵⁹. La seconde, option choisie par la ville de Londres, consiste à affecter une part des recettes vers les transports publics (création d'un nouveau réseau, rénovation des transports publics, augmentation de la fréquence des passages...). Enfin, la troisième sous-part peut être investie dans des zones touchées par le péage de congestion. Ainsi, le centre des affaires – par exemple, bénéficiera d'aménagements facilitant les déplacements ; la création de parkings dans cet espace peut aussi être envisagée.

Dans une étude de cas sur la région de Los Angeles, K. SMALL (1992) propose de répartir les recettes du péage comme cela est indiqué dans le *tableau 2* (exposées en dollars, les résultats ont été transformés en pourcentage du total des recettes attendues).

| Catégorie d'affectation | Programme | Part |
|--------------------------------|--|-------------|
| a | Allocation orientée vers les voyageurs | 23% |
| | Réduction des taxes sur l'usage de la route (carburants) | 12% |
| b | Réduction des péages autoroutiers et du tarif des parkings | 18% |
| | Réduction des taxes d'habitation | 16% |
| c | Investissement dans la création de routes | 11% |
| | Investissement dans les transports publics | 10% |
| | Aménagements sur la zone à péage | 11% |

Tableau 2: L'orientation des revenus du péage dans la région de Los Angeles
(Source : d'après K. SMALL, 1992, p. 372)

1.2.3. Le "coût de dérangement" de T. LITMAN (1999)

La question de la redistribution de revenus est un élément considérable dans le choix d'instaurer ou non un péage de congestion. Pour sa part, T. HAU (1992) préconise que les recettes du péage soient indirectement restituées aux usagers à travers soit la réduction

⁵⁹ Aux Etats-Unis, ces voies sont nommées "high-occupancy-vehicle (HOV) lanes". Dans le chapitre V, nous reviendrons sur ce point en présentant deux expériences : les cas de San Diego et d'Orange County.

des charges sur les utilisateurs, soit la réduction des taxes sur les transports, soit l'amélioration – générale ou particulière – des services publics. Toutefois dans une perspective d'efficacité économique, T. LITMAN (1999) rapporte que les recettes doivent plutôt bénéficier à l'ensemble de la société et non à une partie de la collectivité. En effet si les revenus sont affectés automatiquement à la restauration de la chaussée, à la multiplication des routes, ou à la réduction des charges pesant sur les usagers ; cela risque de générer une augmentation de l'offre de voirie et donc de la circulation : "*Si les automobilistes payent le lundi pour utiliser une route en sachant que l'argent sera restitué le vendredi, ils ont peu d'incitation pour changer leur comportement de déplacement*" (T. LITMAN, 1999, p. 1). Autrement dit, les recettes ne devraient pas être remboursées aux usagers au prorata de la somme qu'ils paient, car ils n'auraient aucune incitation à changer de comportement de déplacement⁶⁰.

Dans ses travaux, T. LITMAN (1999) s'est intéressé aux effets redistributifs des péages urbains suivant deux approches de l'équité : **l'équité horizontale** et **l'équité verticale**⁶¹. Nous allons revenir sur ces deux points avant d'effectuer une comparaison mettant en avant les différents groupes d'usagers.

1.2.3.1. L'équité horizontale

L'équité horizontale concerne l'ensemble des individus sans discrimination ; elle correspond au "*principe d'égalité des chances*", les usagers sont alors traités de la même manière.

⁶⁰ Toutefois, pour permettre une telle redistribution, le concept de FAIR Lanes est à l'essai pour la région de New-York. Dans ce cadre, les utilisateurs de la voie gratuite durant la période de pointe seraient compensés par des crédits qui pourraient être utilisés d'autres jours pour circuler sur la voie payante. Les automobilistes qui renonceraient à utiliser leurs droits ou crédits de circulation sur la voie payante pourraient les utiliser pour accéder gratuitement aux transports collectifs ou aux parkings à l'entrée de la ville (F. MIRABEL, 2005).

⁶¹ Ici, nous nous intéresserons uniquement à l'équité verticale et à l'équité horizontale. En effet, C. RAUX et S. SOUCHE (2001a, 2001b) distinguent également **l'équité territoriale** propre à l'accessibilité dans l'espace. Nous supposons ici, que la voie payante est accessible à tous, dans des conditions identiques. Précisons aussi, qu'une autre forme d'équité présentée par J. M. VIEGAS et R. MACARIO (2001, p. 16) est **l'équité longitudinale** (ou équité dynamique) correspondant "*à l'objectif pour chacun de ne pas diminuer les bénéfices antérieurement disponibles (droits acquis). Elle correspond à une des principales difficultés lorsque l'on souhaite remettre en cause certains compromis institutionnels dans les sociétés modernes vieillissantes.*"

Il existe deux interprétations de l'équité horizontale dans les transports (C. RAUX et S. SOUCHE, 2001a, 2001b) :

- la première est celle du « pollueur-payeur » développée par A. PIGOU (1920), qui a pour but de réduire les effets externes occasionnés par les usagers en leur faisant payer une taxe ;
- la deuxième est celle "*qui consiste à faire payer l'utilisateur pour un 'bien' qu'il obtient en échange : il s'agit essentiellement du surcroît de qualité de service offert en matière de transports (rapidité, fiabilité, confort) en échange d'un surcroît de paiement.*" (C. RAUX et S. SOUCHE, 2001b, p. 32)

Pour beaucoup, les recettes du péage doivent être réinvesties dans l'amélioration de la chaussée pour favoriser les usagers qui paient. D'autres préconisent une réorientation des recettes vers les autres modes de transports. Certains évoquent le "*principe de la soutenabilité*" en suggérant que les recettes soient affectées vers les modes de transport « verts », respectueux de l'environnement. Pour T. LANGMYPHR (1997, p. 33) "*le principe de soutenabilité correspond à l'inquiétude à l'égard des ressources non renouvelables et des générations futures, tout en satisfaisant toujours les besoins élémentaires de la génération actuelle*".

Face à ces suggestions, une question essentielle se pose : qui doivent être les bénéficiaires des recettes ? Les usagers qui paient, ou ceux qui modifient leur comportement à cause du péage et qui subissent donc un "*coût de dérangement*" (T. LITMAN, 1999, p.2)⁶².

Le schéma ci-dessous peut permettre de bien distinguer les objectifs de redistribution selon l'équité horizontale :

⁶² Dans cette idée, les utilisateurs d'autres modes de transports pourraient bénéficier des recettes du péage urbain. Outre les transports collectifs, les autorités peuvent effectuer des améliorations sur les espaces piétons et développer des voies cyclables.

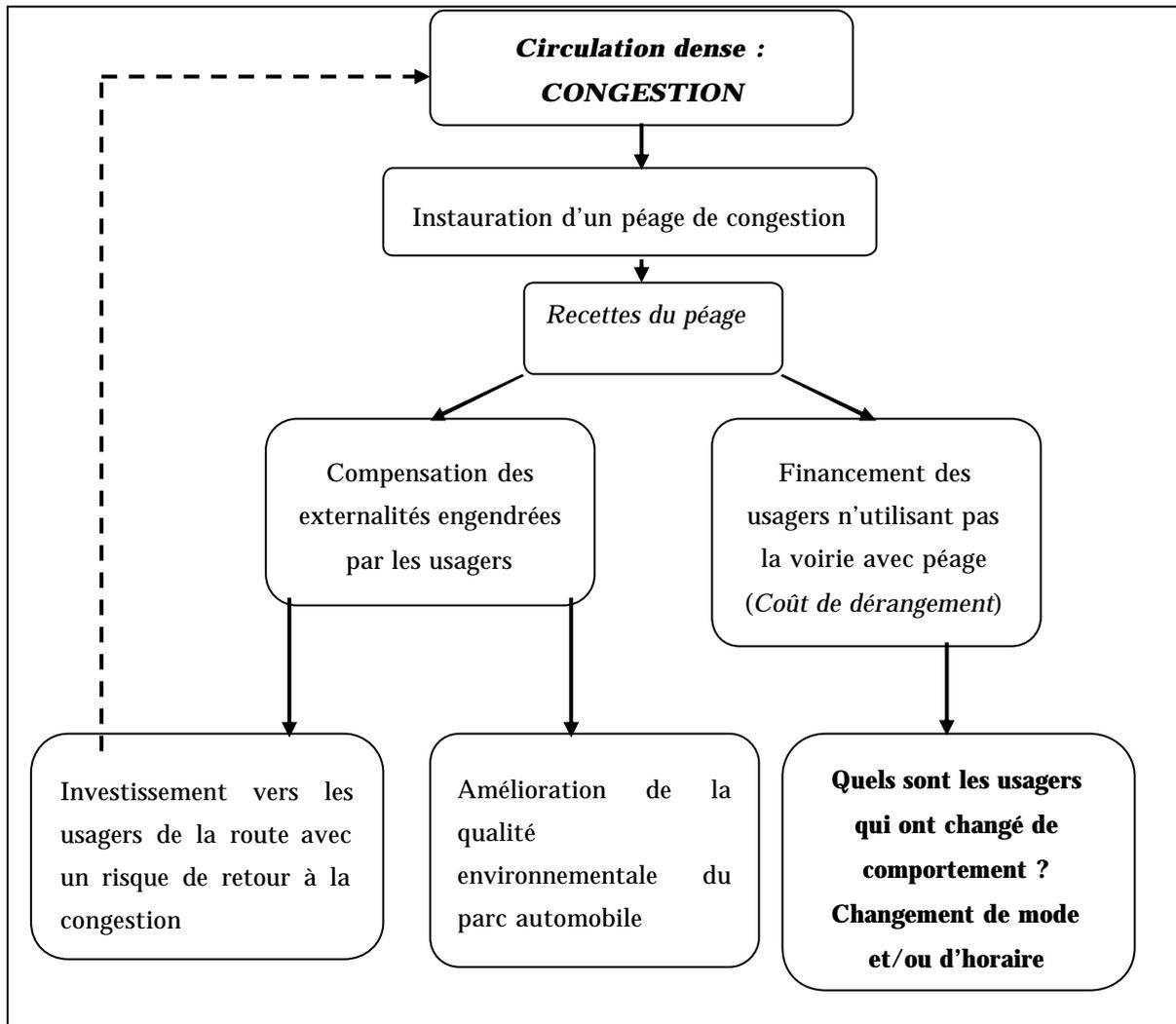


Figure 2 : La redistribution des recettes du péage dans le cas de l'équité horizontale (Source : M. REYMOND, 2003a, p. 37)

1.2.3.2. L'équité verticale

Contrairement à l'équité horizontale, l'équité verticale aborde le problème des classes sociales et correspond au "*principe de différence*". Dans ce cadre, la distribution des coûts et des avantages devrait correspondre aux besoins et aux ressources des individus⁶³. De ce fait, les principes de l'équité verticale exigent que les plus démunis bénéficient des politiques publiques en matière de transport afin de satisfaire leurs besoins.

⁶³ L'impôt progressif sur le revenu, les aides aux plus défavorisés et aux handicapés sont des exemples de politiques respectant les principes de l'équité verticale.

Le péage urbain peut alors être considéré comme injuste et inégalitaire d'un point de vue vertical, puisque les frais fixes imposent un plus grand fardeau aux usagers les plus pauvres⁶⁴. Si l'on considère un péage de x euros par jour, il représentera une plus grande partie de revenu pour l'usager ayant de faibles ressources. Notons également que cet effet est atténué par le fait que les automobilistes pauvres circulent en moyenne moins que les automobilistes aisés (D. BANISTER cité dans C.E.M.T., 1994). Toutefois un péage réduirait encore leur temps moyen de circulation.

De nombreuses études montrent que le péage urbain est verticalement injuste quand la redistribution des recettes est ignorée, il importe d'examiner pour chaque groupe d'usagers les solutions permettant de réduire alors ses effets pervers.

1.2.3.3. Comparaison des deux approches

Au regard de ces deux approches, les impacts sur la redistribution des recettes diffèrent selon les groupes d'individus. T. LITMAN présente quatre groupes d'individus (les non-automobilistes, les automobilistes à faibles revenus, les automobilistes de classe moyenne, et les automobilistes à hauts revenus) et mesure les effets de la redistribution des revenus du péage selon le principe de l'équité horizontale et selon le principe de l'équité verticale (*Tableau 3*).

⁶⁴ Certains mettent en avant cet argument pour énoncer qu'il est interdit en France d'instaurer un péage sur une voirie existante. Les autorités doivent alors construire une nouvelle voie pour qu'elle soit payante (Tunnel Prado-Carénage).

| Classe | Description | Équité horizontale | Équité verticale |
|---|--|---|--|
| Non-automobilistes | Individus ne pouvant pas conduire (pour des raisons d'âge, de bas revenu, ou de handicap). Ils sont également passagers des automobilistes et sont donc peu responsables de l'encombrement. | Bien que ces individus ne participent pas au paiement du péage, ils méritent tout de même une compensation pour les externalités qu'ils subissent. | Puisque les non-automobilistes sont des personnes économiquement ou physiquement défavorisées, il est logique qu'une part importante des recettes du péage leur profite. |
| Automobilistes à faibles revenus | Individus ayant un accès à l'automobile, mais dont les décisions de déplacement sont sensiblement affectées par les coûts internes du véhicule. Ils ne seront pas incités à emprunter les voies payantes. | Ces usagers paient une faible part des prix du péage, mais encourent des coûts de changement modal qui bénéficient à la réduction de la congestion. Ils méritent logiquement une part des recettes pour compensation. | Puisque ces automobilistes sont des personnes défavorisées, il est logique qu'une part importante des recettes du péage leur profite. |
| Automobilistes de classe moyenne | Individus qui possèdent et conduisent une automobile et dont les décisions de déplacement sont modérément affectées par les coûts internes du véhicule. Ils ne seront pas toujours disposés à emprunter les voies payantes. | Ces usagers paient une grande partie du péage et par conséquent sont largement responsables de l'encombrement. Ils méritent de percevoir une part des recettes <i>une fois que les externalités sont compensées</i> . | Puisque ces automobilistes ne sont pas désavantagés, il est logique qu'ils ne profitent d'aucune part des recettes du péage. |
| Automobilistes à hauts revenus | Individus qui possèdent et conduisent une automobile et dont les décisions de déplacement ne sont nullement affectées par les coûts internes du véhicule. Ils seront toujours disposés à profiter des voies payantes. | Comme les usagers de la classe moyenne, ils méritent de percevoir une part des recettes <i>une fois que les externalités sont compensées</i> . | Puisque ces automobilistes ne sont pas désavantagés, il est logique qu'ils ne profitent d'aucune part des recettes du péage. |

Tableau 3 : Analyse des redistributions des recettes du péage urbain selon les différents types d'équité (Source : T. LITMAN, 1999, p.5)

1.3. Les perspectives d'une affectation "équitable" et "efficace" des recettes du péage

La mise en place d'un péage de congestion en milieu urbain va nécessairement susciter des polémiques et des controverses. Si les vertus théoriques de ce mode de régulation ne sont plus contestées, les difficultés de mise en application demeurent délicates.

1.3.1. Les gagnants et les perdants

Certains auteurs (J. GOMEZ-IBANEZ, 1992 ; S. SOUCHE, 2003) présentent des regroupements d'individus et les positionnent en tant que "perdants" ou en tant que "gagnants". Cette dichotomie se traduit ainsi chez J. GOMEZ-IBANEZ (1992) :

| Gagnants directs | Perdants directs |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> -Les riches automobilistes qui ont une forte valeur de temps, et de fait le temps gagné compense pour eux le coût du péage. -Les usagers des bus (dans le cas où les bus empruntent la même voie que les automobilistes) apprécient le gain de temps. -Les bénéficiaires des recettes du péage | <ul style="list-style-type: none"> -Les automobilistes à faible revenu obligés d'emprunter la voirie payante (pas d'alternative). Le gain de temps ne compense pas le coût subi par le péage. -Les usagers qui changent de comportement en empruntant des voies congestionnées sans péage. -Les automobilistes habituels des voies sans péage qui subissent un afflux de nouveaux véhicules (congestion). -Les usagers qui renoncent à se déplacer à cause du péage. -Les individus qui s'orientent vers un autre mode de transport (dans ce cas ils peuvent alors devenir des gagnants directs du péage). |

Tableau 4 : Les gagnants et les perdants des péages urbains (Source : J. GOMEZ-IBANEZ, 1992)

Cette scission en deux groupes distincts mérite une interprétation évolutive qui permettra de discerner sur un plus long terme les effets redistributifs du péage de congestion.

Les gagnants directs, dans un **premier temps**, sont caractérisés par l'élévation de leur propre bien-être. Dans le cas d'un péage de congestion instauré sur une voirie existante, les automobilistes dont la valeur du temps est supérieure au tarif du péage seront les premiers gagnants. Et les usagers exclus financièrement (valeur du temps <

péage) seront les premiers perdants (soit en subissant une perte financière, soit en renonçant au déplacement, soit en supportant un coût de changement d'horaire, de mode ou de trajet).

Dans un **deuxième temps**, les usagers des modes de transports alternatifs seront des perdants indirects (transfert modal, donc augmentation du nombre d'usagers des transports collectifs et donc augmentation du coût de promiscuité⁶⁵) ainsi que les automobilistes utilisant d'autres itinéraires de trajets.

Dans un **troisième temps**, avec la prise en compte des recettes, les perdants initiaux peuvent devenir des gagnants. Ainsi une orientation des ressources vers les groupes les plus défavorisés entraînerait une redistribution de type vertical et pourrait compenser le coût de changement. Une orientation des recettes vers les transports collectifs (en augmentant les fréquences) permettrait de réduire les coûts de promiscuité et ainsi d'augmenter le bien-être des usagers de ces modes. Une baisse significative du prix du billet des transports collectifs rendrait salubre le péage aux yeux des automobilistes exclus.

1.3.2. Les effets distributifs du péage

Dans cette perspective, certains auteurs s'intéressent aux effets distributifs du péage sur la population en terme de coûts et d'avantages. Ainsi, *"les effets distributifs désignent la répartition entre les agents (individus et entreprises) des coûts et bénéfices induits par l'instauration du péage"* (M. GLACHANT et B. BUREAU, 2004, p. 15). Les auteurs suggèrent qu'il existe un lien fort entre l'acceptabilité du péage et ses effets distributifs. De ce fait une augmentation du nombre de gagnants dans la population concernée par le péage, accroît le niveau d'acceptabilité.

M. GLACHANT et B. BUREAU remarquent que lorsque l'on ne transfère pas les recettes du péage vers les automobilistes (les principaux concernés), le péage ne bénéficie que d'une faible acceptabilité. Il convient donc de s'interroger sur les modalités d'affectation de ces recettes car *"cette recette sera dépensée et va donc, de façon totalement symétrique, générer autant de bénéfices qu'elle a généré de coûts lors de sa*

⁶⁵ Voir l'article H. J. HUANG (2000). L'auteur considère deux groupes d'usagers (distingués selon les valeurs du temps) qui ont le choix entre une voirie (avec péage) et un métro. Les usagers les plus riches sont prêts à payer plus cher pour se déplacer en voiture. Par contre ils ont un coût de promiscuité plus important.

perception." (id., p. 16) Et donc : "*toute analyse de la question des effets distributifs doit s'intéresser aux modalités d'affectation de la recette du péage.*" (id.)

Concernant l'aspect redistributif du péage urbain, il ressort qu'une orientation des recettes en dehors du secteur des transports en paralyserait la compétitivité. L'affectation exclusive des recettes aux usagers-payeurs rendrait inopérant l'effet escompté (voir T. LITMAN, ci-dessus). Dans ce cadre, il nous semble intéressant d'étudier le cas où les recettes du péage sont orientées vers les transports collectifs (sections suivantes).

Section 2. La redistribution des recettes avec la tarification des transports collectifs au coût marginal

Si l'on considère que pour rendre plus acceptable le péage, les pouvoirs publics doivent prendre en considération les individus qui changent de comportement, ils peuvent envisager d'orienter les recettes du péage vers les modes de transports alternatifs à l'automobile, et essentiellement vers les transports collectifs.

A partir du modèle de T. TABUCHI (1993) revisité par R. DANIELIS et E. MARCUCCI (2002), nous intégrons une redistribution des recettes du péage vers les usagers des transports collectifs.

Soient N usagers qui se scindent en N_a et N_b (respectivement les automobilistes et les usagers des transports publics). A l'équilibre, l'automobiliste est supposé subir le même coût de déplacement quelle que soit l'heure de départ du domicile⁶⁶; sous cette condition, il est possible de caractériser la répartition temporelle du trafic à l'équilibre en donnant l'expression du coût de déplacement moyen d'un automobiliste (ARNOTT et al., 1990a) :

$$C_a^{sp} = \frac{dN_a}{K} \quad (1)$$

Où K représente la capacité d'écoulement de la voirie (en véhicules par heure) et d correspond à un paramètre tel que $d = \frac{bg}{b+g}$, où b le coût unitaire d'avance sur le lieu de travail et g le coût unitaire de retard sur le lieu de travail. L'exposant sp signifie *sans péage*.

Le coût de production du service par usager du transport collectif est donné par :

$$C_b = c \quad (2)$$

Où c est le coût marginal par usager du transport collectif.

⁶⁶ La situation d'équilibre est définie comme étant celle où aucun usager ne peut diminuer son coût de déplacement en modifiant l'heure de départ de son domicile.

A l'équilibre, les usagers sont indifférents entre les deux modes de transport proposés dans la mesure où les coûts du temps de déplacement qu'ils subissent en automobile et en transports collectifs sont les mêmes (équilibre de WARDROP, 1952)⁶⁷.

Après avoir choisi son mode de déplacement, l'individu y restera attaché, "à moins qu'une variation significative des coûts relatifs de déplacement ne vienne altérer sa décision et ne le pousse à modifier son choix" (F. MIRABEL, 1998, p.4).

L'équilibre modal peut ainsi être défini :

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_a = C_b & \text{pour } N_b > 0 \quad (\text{Solution intérieure}) \end{array} \right. \quad (3a)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_a < C_b & \text{pour } N_b = 0 \quad (\text{Solution en coin}) \end{array} \right. \quad (3b)$$

Avec (3a), les deux modes de transport sont utilisés (ils sont parfaitement substituables), et avec (3b), les autorités n'ont pas intérêt à mettre en place des transports collectifs⁶⁸.

De ce fait, le coût total subi par la collectivité s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} CT = C_a N_a + C_b N_b & \text{pour } N_b > 0 \end{array} \right. \quad (4a)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} CT = C_a N_a = C_a N & \text{pour } N_b = 0 \end{array} \right. \quad (4b)$$

Les autorités peuvent alors orienter le choix des usagers en agissant soit sur le coût de déplacement en automobile (en instaurant différents types de péages), soit sur le coût de déplacement en transports collectifs (en modifiant le prix du billet). Dans le cadre du modèle de T. TABUCHI, nous nous intéresserons ici au cas où le prix du billet est égal au coût marginal en envisageant trois situations alternatives : la gratuité de la voirie (2.1.), la mise en place d'un péage de pointe optimal (2.2.) et l'instauration d'un péage uniforme (2.3.).

2.1. La situation initiale : sans péage

Ce premier régime tarifaire constitue la situation de référence, situation dans laquelle les recettes des billets ne couvrent pas les coûts. L'autorité publique de la ville fixe alors le

⁶⁷ Autrement dit, en cherchant individuellement à optimiser leur itinéraire, les individus aboutissent à une situation d'équilibre suivant laquelle : "aucun usager ne peut améliorer son temps de parcours en changeant unilatéralement de route" (DAGONZO et SHEFFI, 1977).

⁶⁸ Nous verrons que dans plusieurs cas il existe des valeurs seuils de N en deçà desquelles le nombre d'usagers des transports collectifs est inférieur ou égal à 0.

prix du billet ($p=c$) que chaque usager devra payer pour se déplacer en transports collectifs. L'équilibre se définit alors de la façon suivante :

$$C_a^{sp} = C_b^{sp} \Rightarrow \frac{d(N - N_b)}{K} = c \Rightarrow d(N - N_b) - cK = 0 \quad (5)$$

Cette équation n'admet de solution réelle que si le déterminant caractéristique est supérieur ou égal à zéro, c'est à dire si (après simplifications) :

$$N \geq N_s^{sp} \quad \text{avec} \quad N_s^{sp} = \frac{cK}{d} \quad (6)$$

Ainsi, si $N \geq N_s^{sp}$, la répartition modale d'équilibre est telle que $N_b > 0$ (solution intérieure). Au contraire si $N \leq N_s^{sp}$, $N_a=N$ et $N_b=0$. N_s^{sp} peut alors être considéré comme le seuil au-dessus duquel il est économiquement rationnel de construire un réseau de transports collectifs.

Sous cette condition et après calculs, on obtient la répartition modale d'équilibre associée au régime tarifaire (sp) :

$$\begin{cases} (N_a^{sp}, N_b^{sp}) = \left(\frac{cK}{d}, N - \frac{cK}{d} \right) & \text{si } N > N_s^{sp} \\ (N_a^{sp}, N_b^{sp}) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^{sp} \end{cases} \quad (7)$$

Dans ce cas, le coût total qui correspond au régime tarifaire au coût marginal s'écrit :

$$\begin{cases} CT_1^{sp} = cN + F & \text{si } N > N_s^{sp} \\ CT_2^{sp} = \frac{dN^2}{K} & \text{si } N \leq N_s^{sp} \end{cases} \quad (8)$$

Où F représente les coûts fixes des transports collectifs sous forme de subventions non pris en charge par les usagers.

2.2. Tarification de pointe et redistribution des recettes vers les transports collectifs

Lors de la mise en place d'un péage de pointe (f) dont l'objectif est de réguler la circulation et de procurer un gain de temps aux automobilistes, le véritable coût de transport subi par chaque automobiliste est égal à $C_a^f = \frac{dN_a}{K}$. On retrouve la même

valeur que le coût subi par les individus à l'équilibre sans péage à la différence près que la "structure" interne de ce coût n'est plus la même⁶⁹.

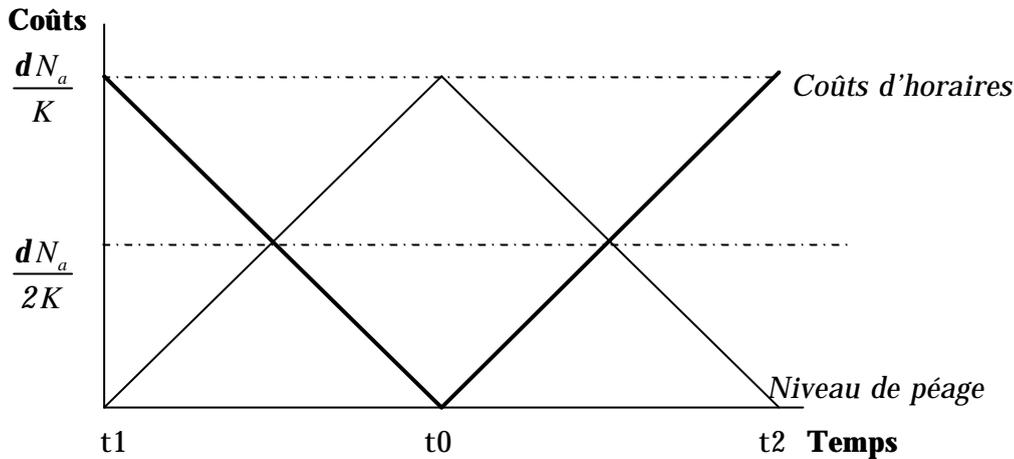


Figure 3 : Coûts d'horaires et niveau du péage

Dans ce cas, on retrouve la répartition modale obtenue dans la situation de référence (absence de péage et tarification des transports collectifs au coût marginal) soit :

$$\begin{cases} (N_a^f, N_b^f) = \left(\frac{cK}{d}, N - \frac{cK}{d} \right) & \text{si } N > N_s^f = N_s^{sp} \\ (N_a^f, N_b^f) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^f \end{cases} \quad (9)$$

La principale différence par rapport à la situation de référence (**sp**) est qu'à présent, la mise en place d'une tarification des infrastructures routières urbaines génère des recettes qui viennent diminuer le coût total supporté par la collectivité. A partir de la valeur moyenne du péage, on peut déduire les recettes :

$$Rf = \frac{d(N_a^f)^2}{2K} = \frac{dc^2K^2}{2Kd^2} = \frac{c^2K}{2d} \quad (10)$$

Comme le notent ARNOTT et al. (1994, p. 144), "le péage remplace le temps d'attente dans l'embouteillage comme mécanisme de régulation des horaires d'arrivées, laissant le coût de déplacement privé (y compris le péage) inchangé, mais améliorant le

⁶⁹ Les coûts de temps de déplacement disparaissent. Le véritable coût de déplacement subi par chaque automobiliste est en moyenne égal à la somme du coût d'horaire ($\frac{dN_a}{2K}$) et du coût financier du péage ($\frac{dN_a}{2K}$).

bien-être collectif du montant des recettes du péage". Ainsi on peut calculer le coût total net des recettes issues du péage :

$$CT_1^f = cN + F - \frac{c^2K}{2d} \quad \text{si } N > N_s^f \quad (11)$$

Dans le cadre du modèle présenté, lorsque le prix du billet dans les transports collectifs est fixé au coût marginal, les recettes du péage peuvent être redistribuées pour subventionner les déplacements en transports collectifs et diminuer ainsi le coût supporté par les passagers. Le prix du billet p à l'instant $t+1$ est alors égal à :

$$p(t+1) = c - \frac{\text{recettes}(t)}{N_b^f(t+1)} =$$

$$\Leftrightarrow p(t+1) = C_b^{f2}(t+1) = c - \frac{d(N - N_b^{f2}(t))^2}{2KN_b^{f2}(t+1)} \quad (12)$$

Dans ce cas, d'après le principe de Wardrop énoncée dans la première section, on obtient l'équilibre au temps " $t+1$ ":

$$C_a^{f2}(t+1) = C_b^{f2}(t+1) \quad \Leftrightarrow \quad \frac{d(N - N_b^{f2}(t+1))}{K} = c - \frac{d(N - N_b^{f2}(t))^2}{2KN_b^{f2}(t+1)} \quad (13)$$

On peut trouver la solution pour la répartition modale d'équilibre en introduisant le mécanisme de convergence vers l'équilibre lorsque les recettes du péage sont redistribuées. Si les conditions de stabilité sont vérifiées (cf. annexe 1) on obtient la solution d'équilibre stable suivante quelque soit la valeur de $N > 0$:

$$(N_a^{f2}, N_b^{f2}) = \left(N + \frac{cK}{d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2}{d^2}}, -\frac{cK}{d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2}{d^2}} \right) \quad (14)$$

Avant de calculer le nouveau coût total, on calcule C_a et C_b à l'équilibre après redistribution des recettes du péage et lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre :

$$\begin{cases} C_a^{f2} = c + \frac{dN}{K} - \frac{\sqrt{c^2K^2 + d^2N^2}}{K} \\ C_b^{f2} = c + \frac{dN}{K} - \frac{\sqrt{c^2K^2 + d^2N^2}}{K} \end{cases} \quad (15)$$

Le coût total à l'équilibre est alors égal à :

$$CT_1^{f2} = C_a^{f2}N_a^{f2} + C_b^{f2}N_b^{f2}$$

$$\Leftrightarrow CT_1^{f2} = cN + F + \frac{dN^2}{K} - \frac{N}{K}\sqrt{c^2K^2 + d^2N^2} \quad (16)$$

Et avec les formules (10) et (14), on peut déduire les recettes à l'équilibre :

$$Rf2 = \frac{(dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2})^2}{2dK} \quad (17)$$

Ces calculs nous permettent de mettre en avant les premiers résultats de notre analyse. Nous remarquons dans un premier temps que les recettes après redistribution ($Rf2$) sont inférieures à celles réalisées avant redistribution : $Rf2 < Rf$. De manière plus précise, il est possible de détailler le processus de convergence vers la répartition modale d'équilibre donnée dans la relation (14). L'instauration d'un péage en t entraîne un transfert modal en $t+1$ des automobilistes vers les transports collectifs, cet effet s'accompagnant d'une diminution des recettes du péage (liée à la baisse des usagers de la route). En $t+2$, les recettes étant plus faibles, le prix du billet des transports collectifs net des recettes augmente, entraînant un transfert modal dans l'autre sens (des usagers des transports collectifs vers l'automobile). Et ainsi de suite, jusqu'à l'équilibre où l'on obtient des recettes inférieures à la situation de départ et donc des usagers de la route moins nombreux ($N_a^{f2} < N_a^f$ et $N_b^{f2} > N_b^f$). La politique de redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs a donc un effet positif sur la baisse de l'usage de l'automobile en ville. Mais également, il importe de souligner que la redistribution des recettes du péage accroît le coût total ($CT_1^{f2} > CT_1^f$). En effet, les recettes étant inférieures dans la situation d'équilibre après redistribution et la demande de déplacement se distordant, le coût total n'en est que moins favorisé. Cependant, le coût individuel de déplacement est devenu inférieur après redistribution ($C_a^{f2} < C_a^f$).

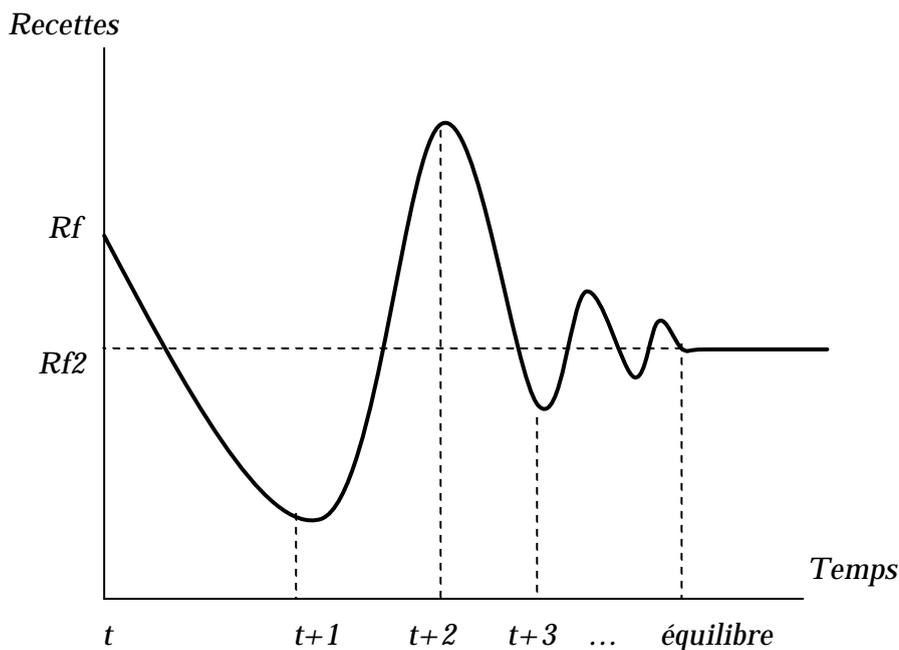


Figure 4 : Evolution du niveau des recettes dans le temps

2.3. Tarification uniforme

De la même façon qu'avec la tarification de pointe (2.2.), le cadre d'analyse est identique avec la tarification uniforme.

Dans une optique plus proche de la réalité les autorités peuvent faire le choix d'instaurer un péage uniforme sur la voirie, qui, dans une situation sans alternative, ajoute des coûts constants à chaque trajet et ne modifie donc pas la configuration des départs. Comme dans le cas du péage de pointe, l'usager est supposé subir le même coût de déplacement quelle que soit l'heure de départ du domicile et à ce coût il convient d'ajouter le prix du péage ($p^u = \frac{dN_a}{K}$), ainsi : $C_a = \frac{2dN_a}{K}$. Si le prix p du billet de transport collectif est égal au coût marginal et s'il existe un péage uniforme, alors la répartition modale d'équilibre se note :

$$\begin{cases} (N_a^u, N_b^u) = \left(\frac{cK}{2d}, N - \frac{cK}{2d} \right) & \text{si } N > N_s^u \\ (N_a^u, N_b^u) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^u \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{Avec } N_s^u = \frac{cK}{2d}.$$

Il y a ici deux différences par rapport à la situation initiale (sans péage), puisque le coût de déplacement en automobile a doublé et puisqu'à présent (comme dans la situation avec une tarification de pointe), la tarification uniforme génère des recettes qui diminuent le coût total supporté par la collectivité. On peut alors déduire les recettes :

$$Ru = \frac{d(N_a^u)^2}{K} = \frac{c^2K}{4d} \quad (19)$$

Et on peut déterminer le coût total net, avec les recettes du péage :

$$CT_1^u = cN + F - \frac{c^2K}{4d} \quad \text{si } N > N_s^u \quad (20)$$

Dans le cadre du modèle présenté, lorsque le prix du billet dans les transports collectifs est fixé au coût marginal, les recettes du péage peuvent être redistribuées pour subventionner les déplacements en transports collectifs et diminuer ainsi le coût supporté par les passagers. Le prix du billet p à l'instant $t+1$ est alors égal à :

$$p(t+1) = c - \frac{\text{recettes}(t)}{N_b^u(t+1)} =$$

$$\Leftrightarrow p(t+1) = C_b^{u2}(t+1) = c - \frac{d(N - N_b^{u2}(t))^2}{KN_b^{u2}(t+1)} \quad (21)$$

Dans ce cas, d'après le principe de Wardrop déjà évoqué, on a :

$$C_a^{u2}(t+1) = C_b^{u2}(t+1) \Leftrightarrow \frac{d(N - N_b^{u2}(t+1))}{K} = c - \frac{d(N - N_b^{u2}(t))^2}{KN_b^{u2}(t+1)} \quad (22)$$

On peut trouver la solution pour la répartition modale d'équilibre en introduisant le mécanisme de convergence vers l'équilibre lorsque les recettes du péage sont redistribuées. Si les conditions de stabilité sont vérifiées (cf. annexe 1) on obtient la solution d'équilibre stable suivante :

$$(N_a^{u2}, N_b^{u2}) = \left(N + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + 4d^2N^2}{4d^2}}, -\frac{cK}{2d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + 4d^2N^2}{4d^2}} \right) \quad (23)$$

Avant de calculer le nouveau coût total, on calcule C_a et C_b à l'équilibre après redistribution des recettes du péage et lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre :

$$\begin{cases} C_a^{u2} = c + \frac{2dN}{K} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + 4d^2N^2}{K^2}} \\ C_b^{u2} = c + \frac{2dN}{K} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + 4d^2N^2}{K^2}} \end{cases} \quad (24)$$

Le coût total à l'équilibre est alors égal à :

$$CT_1^{u2} = C_a^{u2}N_a^{u2} + C_b^{u2}N_b^{u2} \Leftrightarrow CST_1^{u2} + F = cN + F + \frac{2dN^2}{K} - \frac{N}{K}\sqrt{c^2K^2 + 4d^2N^2} \quad (25)$$

Et avec les formules (19 et (23), on peut déduire les recettes à l'équilibre :

$$Ru2 = \frac{(2dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + 4d^2N^2})^2}{4dK} \quad (26)$$

De la même façon qu'en 2.2., on peut présenter quelques résultats. Nous remarquons que les recettes après redistribution ($Ru2$) sont inférieures à celles réalisées avant redistribution : $Ru2 < Ru$. Les explications sont les mêmes que dans 2.2.. Ainsi, la politique de redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs a aussi un effet positif sur la baisse de l'usage de l'automobile en ville. Cela provient de l'effet de distorsion de la taxe. Soulignons que, comme avec le péage de pointe, la redistribution des recettes du péage accroît le coût total ($CT_1^{u2} > CT_1^u$).

2.4. Éléments de comparaisons

On peut maintenant comparer les résultats obtenus pour les deux types de péage après redistribution.

Lorsque l'on confronte le nombre d'usagers des transports collectifs avec péage de pointe et redistribution (N_b^{f2}) avec celui des usagers des transports collectifs avec péage uniforme et redistribution (N_b^{u2}), on constate que le péage uniforme a un effet plus fort sur la répartition modale ($N_b^{u2} > N_b^{f2}$). Ceci s'explique naturellement par le fait que le péage uniforme augmente constamment le coût de déplacement en automobile (et entraîne donc un transfert modal plus important). Ces résultats sont logiques, puisque avant la redistribution T. TABUCHI (1993) souligne déjà ces conséquences.

De manière logique, le coût de déplacement en automobile est plus élevé lorsque les recettes sont redistribuées et que l'on met en place un péage uniforme (par rapport au péage de pointe) ($C_a^{u2} > C_a^{f2}$).

T. TABUCHI (1993, p.429) affirmait "*que plus le péage est variable, plus le coût total est faible*" ($CT_1^u > CT_1^f$). Et, après redistribution, le coût total reste inférieur avec le péage de pointe ($CT_1^{u2} > CT_1^{f2}$). Enfin, après comparaisons, on peut écrire : $CT_1^{u2} > CT_1^{f2} > CT_1^u > CT_1^f$. C'est-à-dire qu'après redistribution, la demande de déplacement se distord, les recettes sont plus faibles, et donc le coût total est plus élevé. Toutefois, si l'on considère qu'il faut prendre en compte les recettes du péage pour le rendre plus acceptable, il est plus efficace d'un point de vue de la régulation de mettre en place un péage de pointe car le coût total est inférieur.

A ces comparaisons, il importe de souligner un élément contre-intuitif. Les recettes du péage uniforme (avant et après redistribution) restent inférieures à celle du péage de pointe alors que le péage uniforme est deux fois supérieur (en moyenne) à celui de pointe. Ceci s'explique par le fait que le nombre d'usagers de la route est très faible avec la tarification uniforme (N_a^u étant faible, les recettes engendrées sont faibles). On rejoint ainsi la remarque de Ken Livingstone, Maire de Londres : "*le péage a trop bien fonctionné*" car les recettes effectives ne sont pas celles escomptées.

| | N_a | N_b | Coût Total (CT) | Recettes (R) |
|--|--|---|---|--|
| Péage de pointe (f) | $\frac{cK}{d}$ | $N - \frac{cK}{d}$ | $cN + F - \frac{c^2K}{2d}$ | $\frac{c^2K}{2d}$ |
| Péage de pointe (avec redistribution) (f2) | $N + \frac{cK}{d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2}{d^2}}$ | $-\frac{cK}{d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2}{d^2}}$ | $cN + F + \frac{dN^2}{K} - \frac{N}{K}\sqrt{c^2K^2 + d^2N^2}$ | $\frac{(dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2})^2}{2dK}$ |
| Péage uniforme (u) | $\frac{cK}{2d}$ | $N - \frac{cK}{2d}$ | $cN + F - \frac{c^2K}{4d}$ | $\frac{c^2K}{4d}$ |
| Péage uniforme (avec redistribution) (u2) | $N + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + 4d^2N^2}{4d^2}}$ | $-\frac{cK}{2d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + 4d^2N^2}{4d^2}}$ | $cN + F + \frac{2dN^2}{K} - \frac{N}{K}\sqrt{c^2K^2 + 4d^2N^2}$ | $\frac{(2dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + 4d^2N^2})^2}{4dK}$ |

Tableau 5 : Récapitulatif des résultats avec $C_b = \text{Coût Marginal}$ (quand $N > N_{\text{seuil}}$)

Section 3. La tarification des transports collectifs au coût moyen : la redistribution des recettes du péage

Ici, nous considérons que le prix du billet des transports collectifs est fixé au coût moyen. Ce type de tarification permet de prendre en compte un autre phénomène : les rendements d'échelle croissants. En effet, le secteur des transports collectifs est un secteur à rendements d'échelle croissants ce qui justifie, dans la réalité, l'existence de fortes subventions dans le secteur. Il existe des économies d'échelle, qui résultent d'une utilisation plus intensive des transports en commun. De la même façon que dans la section 2, les N usagers se scindent en N_a et N_b . A l'équilibre, l'automobiliste est supposé subir le même coût de déplacement quelle que soit l'heure de départ du domicile⁷⁰; en reprenant ce qui est expliqué plus haut :

$$C_a = \frac{dN_a}{K} \quad (27)$$

Le coût de production du service par usager du transport collectif est cette fois donné par :

$$C_b = c + F/N_b \quad (28)$$

Où c est le coût marginal par usager du transport collectif, où F correspond au coût fixe.

Comme précédemment, à l'équilibre, les usagers sont indifférents entre les deux modes de transport proposés dans la mesure où les coûts du temps de déplacement qu'ils subissent en automobile et en métro sont les mêmes.

Les autorités peuvent alors orienter le choix des usagers en agissant soit sur le coût de déplacement en automobile (en instaurant différents types de péages), soit sur le coût de déplacement en transport collectif (en modifiant le prix du billet). Dans le cadre de ce modèle, nous nous intéresserons ici au cas où le prix du billet est égal au coût moyen. Ainsi, le paragraphe 3.1. présentera cette tarification sans péage urbain. Dans une deuxième sous-section nous analyserons la répartition modale avec un péage de pointe puis nous étudierons les effets de la redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs sur la répartition modale et le coût total. Dans un troisième paragraphe nous ferons de même avec le péage uniforme. Ensuite nous procéderons à des comparaisons entre les différents mode de tarification avant et après la redistribution.

⁷⁰ La situation d'équilibre est définie comme étant celle où aucun usager ne peut diminuer son coût de déplacement en modifiant l'heure de départ de son domicile.

3.1. La situation initiale : sans péage

Comme dans la section précédente, ce régime tarifaire constitue la situation de référence. Mais ici, dans cette situation les recettes des billets couvrent juste les coûts. L'autorité publique de la ville fixe alors le prix du billet ($p=C_b$) que chaque usager devra payer pour se déplacer en transports collectifs. L'équilibre se définit de la façon suivante :

$$C_a = C_b \Rightarrow \frac{d(N - N_b)}{K} = c + \frac{F}{N_b} \Rightarrow dN_b^2 + (cK - dN)N_b + FK = 0 \quad (29)$$

Cette équation n'admet de solution réelle que si le déterminant caractéristique est supérieur ou égal à zéro, c'est à dire si :

$$N \geq N_s^{sp} \quad \text{avec} \quad N_s^{sp} = \frac{cK}{d} + 2\sqrt{\frac{FK}{d}} \quad (30)$$

Lorsque $N < N_s^{sp}$, seule la route fonctionne, il n'est pas rentable pour les autorités de construire un réseau de transports collectifs car la demande serait trop faible. Toutefois, quand $N \geq N_s^{sp}$, la route et les transports collectifs fonctionnent. Simultanément N_s^{sp} peut alors être considéré comme le seuil au-dessus duquel il est économiquement raisonnable de construire un réseau de métro.

Sous cette condition et après calculs (cf. T. TABUCHI, 1993) on obtient la répartition modale d'équilibre associée au régime tarifaire (**sp**) :

$$\begin{cases} (N_a^{sp}, N_b^{sp}) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d}\right)^2 - \frac{FK}{d}}, \frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d}\right)^2 - \frac{FK}{d}} \right) & \text{si } N > N_s^{sp} \\ (N_a^{sp}, N_b^{sp}) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^{sp} \end{cases} \quad (31)$$

Dans ce cas, le coût total correspondant au coût moyen s'écrit :

$$\begin{cases} CT_1^{sp} = cN + \frac{N}{N_b^{sp}}F & \text{si } N > N_s^{sp} \\ CT_2^{sp} = \frac{dN^2}{K} & \text{si } N \leq N_s^{sp} \end{cases} \quad (32)$$

3.2. Tarification de pointe et redistribution des recettes vers les transports collectifs

Avec la mise en place d'un péage de pointe, le véritable coût de transport subi par chaque automobiliste est égal à $C_a = \frac{dN_a}{K}$. On retrouve la même valeur que le coût subi par les individus à l'équilibre sans péage à la différence près que la "structure" interne de ce coût n'est plus la même (la structure est identique à celle de la section précédente).

Dans cette seconde sous-partie, nous reprenons dans un premier temps les résultats exposés par R. DANIELIS et E. MARCUCCI (2002) avant la redistribution des recettes. Dans ce cas, on retrouve la répartition modale obtenue dans la situation de référence soit :

$$\begin{cases} (N_a^f, N_b^f) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} \right)^2 - \frac{FK}{d}}, \frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} \right)^2 - \frac{FK}{d}} \right) & \text{si } N > N_s^f = N_s^{fp} \\ (N_a^f, N_b^f) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^f \end{cases} \quad (33)$$

Le coût total supporté par l'ensemble de la population s'écrit finalement :

$$\begin{cases} CT_1^f = cN + \frac{N}{N_b^f} F & \text{si } N > N_s^f \\ CT_2^f = \frac{dN^2}{K} & \text{si } N \leq N_s^f \end{cases} \quad (34)$$

La principale différence par rapport à la situation de référence est qu'à présent, la mise en place d'une tarification des infrastructures routières urbaines génère des recettes qui viennent diminuer le coût total supporté par la collectivité. A partir de la valeur moyenne du péage, on peut déduire les recettes :

$$Rf = \frac{d(N_a^f)^2}{2K} \quad (35)$$

Ainsi on peut calculer le coût total net des recettes issues du péage :

$$CT_1^f = cN + \frac{N}{N_b^f} F - \frac{d(N_a^f)^2}{2K} \quad \text{si } N > N_s^f \quad (36)$$

Dans le cadre du modèle présenté, lorsque le prix du billet dans les transports collectifs est fixé au coût moyen, les recettes du péage peuvent être redistribuées pour subventionner les déplacements en transports collectifs et diminuer ainsi le coût supporté par les passagers. Le prix du billet p à l'instant $t+1$ est alors égal à :

$$\begin{aligned} p(t+1) &= c - \frac{\text{recettes}(t)}{N_b^f(t+1)} = \\ \Leftrightarrow p(t+1) &= C_b^{f2}(t+1) = c + \frac{F}{N_b^f(t+1)} - \frac{d(N - N_b^f(t))^2}{2KN_b^{f2}(t+1)} \end{aligned} \quad (37)$$

Ainsi, on obtient l'équilibre au temps " $t+1$ " :

$$C_a^{f2}(t+1) = C_b^{f2}(t+1) \Leftrightarrow \frac{d(N - N_b^{f2}(t+1))}{K} = c + \frac{F}{N_b^f(t+1)} - \frac{d(N - N_b^{f2}(t))^2}{2KN_b^{f2}(t+1)} \quad (38)$$

On obtient ainsi une équation récurrente non linéaire d'ordre 1. Lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre (N_a^{f2}, N_b^{f2}) , elle doit vérifier (voir le détail du calcul de la stabilité en annexe 2):

$$-d(N_b^f)^2 - 2cKN_b^f - 2FK + dN^2 = 0 \quad (39)$$

On résout cette équation du second degré en N_b^f et on obtient la solution d'équilibre suivante avec un nouveau niveau de ville seuil ($N_s^{f2} = \sqrt{\frac{2FK}{d}} \leq N_s^f$):

$$\begin{cases} (N_a^{f2}, N_b^{f2}) = \left(N + \frac{cK}{d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}{d^2}}, -\frac{cK}{d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}{d^2}} \right) & \text{si } N > N_s^{f2} \\ (N_a^{f2}, N_b^{f2}) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^{f2} \end{cases} \quad (40)$$

Avant de calculer le nouveau coût total, on calcule C_a et C_b à l'équilibre après redistribution des recettes du péage et lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre :

$$\begin{cases} C_a^{f2} = c + \frac{dN}{K} - \frac{\sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}}{K} \\ C_b^{f2} = c + \frac{dN}{K} - \frac{\sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}}{K} \end{cases} \quad (41)$$

Le coût total à l'équilibre est alors égal à :

$$\begin{cases} CT_1^{f2} = C_a^{f2} N_a^{f2} + C_b^{f2} N_b^{f2} & \text{si } N > N_s^{f2} \\ CT_2^{f2} = C_a^{f2} N & \text{si } N \leq N_s^{f2} \end{cases} \quad (42)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} CT_1^{f2} = cN + \frac{dN^2}{K} - \frac{N}{K} \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK} & \text{si } N > N_s^{f2} \\ CT_2^{f2} = \frac{dN^2}{K} & \text{si } N \leq N_s^{f2} \end{cases}$$

Et avec les formules (35) et (40), on peut déduire les recettes à l'équilibre :

$$Rf2 = \frac{(dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK})^2}{2dK} \quad (43)$$

Ici, de la même façon qu'avec un prix du billet des transports collectifs fixé au coût marginal, on obtient des comparaisons similaires concernant les recettes et la répartition modale. Tout d'abord, les recettes après redistribution ($Rf2$) sont inférieures à

celles réalisées avant redistribution : $Rf2 < Rf$.⁷¹ Ensuite, notons également que les usagers de la route sont moins nombreux : $N_a^{f2} < N_a^f$ et $N_b^{f2} > N_b^f$. La politique de redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs a donc un effet positif sur la baisse de l'usage de l'automobile en ville. Toutefois il est plus difficile de déterminer le signe de la différence entre le coût total avant et le coût total après redistribution. Elle dépend essentiellement de la variable F . Lorsque que F est petit⁷², le coût total avant redistribution est inférieur à celui après redistribution. Mais dès que le coût fixe est supérieur à \hat{F}^f , le coût total après redistribution est inférieur à celui avant redistribution. Ceci implique que plus le coût fixe est grand et plus son amortissement compense les effets de distorsion de la taxe sur demande. Ainsi, lorsque le coût de déplacement est élevé en raison de forts coûts fixes, la redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs diminue le prix du billet. De fait, plus le coût fixe est élevé, plus il est efficace d'un point de vue du coût total d'affecter les recettes vers les transports collectifs. Lorsque le coût fixe est proche de 0, on retrouve de manière logique une situation similaire à celle où le prix du billet est fixé au coût marginal.

3.3. Tarification uniforme

De la même façon qu'avec la tarification de pointe, nous reprenons les premiers résultats présentés par DANIELIS et MARCUCCI (2002) avant la redistribution des recettes du péage.

Dans un cadre plus proche de la réalité les autorités peuvent faire le choix d'instaurer un péage uniforme. Ici, l'usager est donc supposé subir le même coût de déplacement quelle que soit l'heure de départ du domicile et à ce coût il convient d'ajouter le prix du péage, ainsi : $C_a = \frac{2dN_a}{K}$. Si le prix p du billet de transport collectif est égal au coût moyen et s'il existe un péage uniforme, alors la répartition modale d'équilibre se note :

$$\begin{cases} (N_a^u, N_b^u) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{4d} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{4d} \right)^2 - \frac{FK}{2d}}, \frac{N}{2} - \frac{cK}{4d} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{4d} \right)^2 - \frac{FK}{2d}} \right) & \text{si } N > N_s^u \\ (N_a^u, N_b^u) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^u \end{cases} \quad (44)$$

⁷¹ Voir les explications du processus du transfert modal dans les conclusions du paragraphe 2.2. de la section 2.

⁷² C'est-à-dire lorsque qu'il est inférieur à $\hat{F}^f = \frac{(5dNcK - d^2N^2 + (6dN - 2cK)\sqrt{d^2N^2 - dNcK})}{dN}$

sachant que $\hat{F}^f > 0$.

$$\text{Avec } N_s^u = \sqrt{2} \sqrt{\frac{FK}{d}} + \frac{cK}{2d} \quad (45)$$

Il y a ici deux différences par rapport à la situation initiale (sans péage), puisque le coût de déplacement en automobile a doublé et puisqu'à présent (comme dans la situation avec une tarification de pointe), la tarification uniforme génère des recettes qui diminuent le coût total supporté par la collectivité. On peut alors déduire les recettes :

$$Ru = \frac{d(N_a^u)^2}{K} \quad (46)$$

Ainsi, on peut calculer le coût total net des recettes issues du péage :

$$CT_1^u = cN + \frac{N}{N_b^u} F - \frac{d(N_a^u)^2}{K} \text{ si } N > N_s^u \quad (47)$$

Dans le cadre du modèle présenté, lorsque le prix du billet dans les transports collectifs est fixé au coût moyen, les recettes du péage peuvent être redistribuées pour subventionner les déplacements en transports collectifs et diminuer ainsi le coût supporté par les passagers. Le prix du billet p à l'instant $t+1$ est alors égal à :

$$p(t+1) = c - \frac{\text{recettes}(t)}{N_b^u(t+1)} =$$

$$\Leftrightarrow p(t+1) = C_b^{u2}(t+1) = c + \frac{F}{N_b^u(t+1)} - \frac{d(N - N_b^u(t))^2}{KN_b^{u2}(t+1)} \quad (48)$$

Ainsi, on obtient l'équilibre au temps " $t+1$ " :

$$C_a^{u2}(t+1) = C_b^{u2}(t+1) \Leftrightarrow \frac{d(N - N_b^{u2}(t+1))}{K} = c + \frac{F}{N_b^u(t+1)} - \frac{d(N - N_b^{u2}(t))^2}{KN_b^{u2}(t+1)} \quad (49)$$

On obtient ainsi une équation récurrente non linéaire d'ordre 1. Lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre (N_a^{u2}, N_b^{u2}) , elle doit vérifier :

$$-d(N_b^u)^2 - cKN_b^u - FK + dN^2 = 0 \quad (50)$$

On résout cette équation du second degré en N_b^f (voir annexe 2) et on obtient la solution d'équilibre suivante avec un nouveau niveau de ville seuil ($N_s^{u2} = \sqrt{\frac{FK}{d}} \leq N_s^u$):

$$\begin{cases} (N_a^{u2}, N_b^{u2}) = \left(N + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + 4d^2N^2 - 4dFK}{4d^2}}, \frac{cK}{2d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + 4d^2N^2 - 4dFK}{4d^2}} \right) & \text{si } N > N_s^{u2} \\ (N_a^{u2}, N_b^{u2}) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^{u2} \end{cases} \quad (51)$$

Avant de calculer le nouveau coût total, on calcule C_a et C_b à l'équilibre après redistribution des recettes du péage et lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre :

$$\begin{cases} C_a^{u2} = c + \frac{2dN}{K} - \frac{\sqrt{c^2K^2 + 4d^2N^2 - 4dFK}}{K} \\ C_b^{u2} = c + \frac{2dN}{K} - \frac{\sqrt{c^2K^2 + 4d^2N^2 - 4dFK}}{K} \end{cases} \quad (52)$$

Le coût total à l'équilibre est alors égal à :

$$\begin{cases} CT_1^{u2} = cN + \frac{2dN^2}{K} - \frac{N}{K} \sqrt{c^2K^2 + 4d^2N^2 - 4dFK} \quad \text{si } N > N_s^{u2} \\ CT_2^{u2} = \frac{2dN^2}{K} \quad \text{si } N \leq N_s^{u2} \end{cases} \quad (53)$$

Et avec les formules (46) et (51), on peut déduire les recettes à l'équilibre :

$$Ru2 = \frac{(2dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + 4d^2N^2 - 4dFK})^2}{4dK} \quad (54)$$

Pour conclure avec cette sous-section, retenons que les résultats et les comparaisons sont du même ordre que ceux relevés dans la section 2 avec un prix du billet fixé au coût marginal. Les recettes après redistribution ($Ru2$) sont donc inférieures à celles réalisées avant redistribution : $Ru2 < Ru$. De la même façon, la politique de redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs a un effet positif sur la baisse de l'usage de l'automobile. Enfin, la redistribution des recettes du péage accroît le coût total lorsque le coût fixe est faible⁷³ ($CT_1^{u2} > CT_1^u$), au-delà d'un certain niveau le coût total après redistribution est inférieur à celui avant redistribution⁷⁴ ($CT_1^{u2} < CT_1^u$).

3.4. Eléments de comparaisons

Pour terminer avec cette section, on peut comparer les résultats obtenus pour les deux types de péage après redistribution. Concernant les recettes et la répartition modale, les comparaisons nous donnent des résultats similaires à la situation précédente ($p=Cm$).

⁷³ C'est-à-dire lorsque qu'il est inférieur à $\hat{F}^u = \frac{(10dNcK + 48d^2N^2 - (12dN + 2cK)\sqrt{4d^2N^2 - 2dNcK})}{4c^3N}$

⁷⁴ Voir les explications dans le paragraphe précédent.

Après redistribution et avec péage uniforme, le nombre d'usagers des transports collectifs est plus élevé que ceux avec le péage de pointe ($N_b^{u2} > N_b^{f2}$). L'explication vient du fait que le péage uniforme augmente en permanence le coût de déplacement en automobile (et entraîne donc un transfert modal plus important).

Quand F est faible, le coût de déplacement en automobile est plus élevé lorsque les recettes sont redistribuées et que l'on met en place un péage uniforme (par rapport au péage de pointe) ($C_a^{u2} > C_a^{f2}$). Et idem pour le coût total qui est plus faible lorsque le péage est variable car cela distord moins la demande $CT_1^u > CT_1^f$ et $CT_1^{u2} > CT_1^{f2}$.

Le tableau ci-après récapitule les résultats obtenus dans cette section.

| | Na | Nb | Coût Total (CT) | Recettes (R) |
|--|---|---|---|---|
| Péage de pointe (f) | $\frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d}\right)^2 - \frac{FK}{d}}$ | $\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d}\right)^2 - \frac{FK}{d}}$ | $cN + \frac{N}{N_b^f} F - \frac{d(N_a^f)^2}{2K}$ | $\frac{d(N_a^f)^2}{2K}$ |
| Péage de pointe (avec redistribution) (f2) | $N + \frac{cK}{d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}{d^2}}$ | $-\frac{cK}{d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}{d^2}}$ | $cN + \frac{dN^2}{K} - \frac{N}{K} \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}$ | $\frac{(dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK})}{2dK}$ |
| Péage uniforme (u) | $\frac{N}{2} + \frac{cK}{4d} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{4d}\right)^2 - \frac{FK}{2d}}$ | $\frac{N}{2} - \frac{cK}{4d} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{4d}\right)^2 - \frac{FK}{2d}}$ | $cN + \frac{N}{N_b^u} F - \frac{d(N_a^u)^2}{K}$ | $\frac{d(N_a^u)^2}{K}$ |
| Péage uniforme (avec redistribution) (u2) | $N + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + 4d^2N^2 - 4dFK}{4d^2}}$ | $-\frac{cK}{2d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + 4d^2N^2 - 4dFK}{4d^2}}$ | $cN + \frac{2dN^2}{K} - \frac{N}{K} \sqrt{c^2K^2 + 4d^2N^2 - 4dFK}$ | $\frac{(2dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + 4d^2N^2 - 4dFK})^2}{4dK}$ |

Tableau 6 : Récapitulatif des résultats avec $C_b =$ Coût Moyen (quand $N > N_{seuil}$)

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons mis en avant le fait qu'une affectation des recettes du péage vers les transports collectifs pourrait être un moyen de le rendre plus acceptable au regard des citoyens. Si les modèles présentés ici n'intègrent pas l'acceptabilité en tant que paramètre, nous supposons – et les enquêtes réalisées sur ce sujet vont dans ce sens – qu'une affectation des recettes du péage vers les modes de transports alternatifs à l'automobile le rend plus acceptable. L'orientation des recettes vers les transports collectifs a pour conséquence la distorsion de la demande de déplacement (il y a un fort report modal de la route vers les transports collectifs) et parfois l'accroissement du coût total. Mais ce coût total n'intègre pas les effets externes liés à l'environnement, et une réduction de l'usage de l'automobile permettrait de réduire en partie l'asphyxie des cités.

La section 2 insiste sur le cas où le prix du billet des transports collectifs est fixé au coût marginal. Les subventions correspondant aux coûts fixes ne sont intégrées dans le coût total qu'*ex-post*. Le coût total est toujours supérieur après redistribution plutôt qu'avant. La section 3 reprend ce modèle en fixant le prix du billet au coût moyen. Ici, lorsque F est faible, le coût total avant redistribution est inférieur à celui après redistribution. Dès que F devient plus important, le coût total après redistribution devient inférieur. Dans le prochain chapitre, nous reviendrons sur des comparaisons entre les deux modes de tarifications des transports collectifs.

Dans les deux cas le péage uniforme s'avère être plus efficace en terme de répartition modale. Cette politique est aussi celle qui génère un coût total plus élevé. Si l'on compare les deux modes de tarification des transports collectifs (CM et Cm), on constate qu'au coût marginal, et après redistribution des recettes, la répartition modale est plus favorable aux transports collectifs qu'au coût moyen. Ceci s'explique par le fait que le prix du billet n'intègre pas le coût fixe dans son tarif. Ainsi, le coût total, après affectation des recettes, est donc plus élevé au coût marginal qu'au coût moyen. Enfin, du fait que le nombre d'automobilistes est supérieur dans le cas d'une tarification au coût moyen, les recettes sont donc plus élevées. Ces remarques nous permettent de mettre en avant quatre arguments qui rendront plus acceptable le péage de pointe lorsque les recettes sont affectées vers les transports collectifs, et que le prix du billet est fixé au coût moyen :

1/ Il y a distorsion de la demande et diminution du nombre d'automobilistes. Ceci permet de réduire les externalités de l'automobile en ville ;

2/ D'un point de vue politique, les citoyens savent que les recettes du péage sont injectées dans le secteur des transports. Avec une politique d'information accompagnant la mise en œuvre du projet, les citoyens seront réceptifs à la transparence des pouvoirs publics ;

3/ Contrairement au coût marginal, il y a une diminution du coût total par rapport à la situation initiale ;

4/ Le péage est variable dans le temps, les automobilistes peuvent continuer à utiliser l'automobile en changeant d'horaire de départ. Contrairement au péage uniforme, les individus souhaitant se déplacer en voiture ne sont pas exclus.

Afin de mieux percevoir les portées d'une telle politique, il convient maintenant de considérer le cas où les recettes du péage sont affectées vers deux programmes (budget et transports collectifs ; et budget et routes).

ANNEXES DU CHAPITRE III

Annexe 1 : Calcul de la stabilité avec le prix du billet fixé au coût marginal

a. Avec le péage de pointe

Suite à l'égalisation des coûts de déplacement en $t+1$, on en déduit N_{bt+1} par rapport à N_{bt} :

$$N_{b_{t+1}} = \frac{dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 2cKdN + 3d^2N^2 - 4d^2NN_{b_t} + 2d^2x^2}}{2d}$$

On pose $x_{t+1} = f(x_t)$

$$\text{avec } f(x_t) = \frac{dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 2cKdN + 3d^2N^2 - 4d^2Nx + 2d^2x^2}}{2d}$$

Le domaine de définition de la fonction est défini si la racine carrée est supérieure ou égale à 0 et si d est différent de 0.

Donc,

$$A(x) = c^2K^2 - 2cKdN + 3d^2N^2 - 4d^2Nx + 2d^2x^2 = (cK - dN)^2 + 2d^2(N - x)^2 > 0$$

Ainsi f est définie sur $N_b = x \in [0, N]$ et $N > \frac{cK}{d}$: sur cet intervalle, la fonction est continue et dérivable.

Pour que la stabilité soit globale, démontrons d'abord que la fonction est monotone. Pour cela calculons la dérivée de $f(x)$:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{d(x - N)}{\sqrt{A(x)}} \leq 0$$

La fonction est donc décroissante sur son intervalle de continuité.

Montrons que $\left| \frac{df}{dx} \right| < 1$:

$$d(N - x) < \sqrt{c^2K^2 - 2cKdN + 3d^2N^2 - 4d^2Nx + 2d^2x^2}$$

$$\Leftrightarrow d^2(N - x)^2 - (cK - dN)^2 - 2d^2(N - x)^2 < 0$$

Ainsi $\left| \frac{df}{dx} \right| < 1$ est toujours vrai donc la stabilité est globale.

b. Avec le péage uniforme

Suite à l'égalisation des coûts de déplacement en $t+1$, on en déduit N_{bt+1} par rapport à N_{bt} :

$$N_{b_{t+1}} = \frac{2dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 4cKdN + 12d^2N^2 - 16d^2NN_b + 8d^2x^2}}{4d}$$

On pose $x_{t+1} = f(x_t)$

$$\text{avec } f(x_t) = \frac{2dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 4cKdN + 12d^2N^2 - 16d^2Nx + 8d^2x^2}}{4d}$$

$$\Leftrightarrow f(x) = \frac{N}{2} - \frac{cK}{4d} + \frac{\sqrt{A(x)}}{4d}$$

$$\text{avec } A(x) = (2dN - cK)^2 + 8d^2N^2 + 16d^2Nx + 8d^2x^2$$

$$\Leftrightarrow A(x) = (2dN - cK)^2 + 8d^2(N - x)^2 > 0$$

Ainsi f est définie sur $N_b = x \in [0, N]$ et $N > \frac{cK}{2d}$: sur cet intervalle, la fonction est continue et dérivable.

Pour que la stabilité soit globale, démontrons d'abord que la fonction est monotone. Pour cela calculons la dérivée de $f(x)$:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{2d(x - N)}{\sqrt{A(x)}} \leq 0$$

La fonction est donc décroissante sur son intervalle de continuité.

Montrons que $\left| \frac{df}{dx} \right| < 1$:

$$2d(x - N) \geq \sqrt{(2dN - cK)^2 + 8d^2(N - x)^2}$$

$$\Leftrightarrow 4d^2(x - N)^2 \geq (2dN - cK)^2 + 8d^2(N - x)^2$$

$$\Leftrightarrow (2dN - cK)^2 + 4d^2(N - x)^2 \geq 0$$

Ainsi $\left| \frac{df}{dx} \right| < 1$ est toujours vrai donc la stabilité est globale.

Annexe 2 : Calcul de la stabilité avec le prix du billet fixé au coût moyen

c. Avec le péage de pointe

De la même façon que pour la stabilité avec le prix du billet fixé au coût marginal, suite à l'égalisation des coûts de déplacement en $t+1$, on en déduit $N_{b_{t+1}}$ par rapport à N_{b_t} :

$$N_{b_{t+1}} = \frac{dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 2cKdN + 3d^2N^2 - 4d^2NN_{b_t} + 2d^2N_{b_t}^2 - 4dFK}}{2d}.$$

On pose :

$$x_{t+1} = f(x_t)$$

$$\text{avec } f(x_t) = \frac{dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 2cKdN + 3d^2N^2 - 4d^2Nx + 2d^2x^2 - 4dFK}}{2d}$$

$$\Leftrightarrow f(x_t) = \frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} + \frac{\sqrt{A(x)}}{2d}$$

$$\text{avec } A(x) = c^2K^2 - 2cKdN + 3d^2N^2 - 4d^2Nx + 2d^2x^2 - 4dFK$$

$$\Leftrightarrow A(x) > 0$$

La racine est donc positive.

Pour que la stabilité soit globale, démontrons que la dérivée de $f(x)$ est inférieure à 1 :

$$f'(x) = \frac{1}{d} \left(\frac{-2d(dN - dx)}{2\sqrt{A}} \right) = -\frac{d(N - x)}{\sqrt{A}} \leq 0 \text{ car } N > x$$

Donc $f'(x) \leq 1$ et la stabilité globale est bien vérifiée.

d. Avec le péage uniforme

De la même façon que pour la stabilité avec le prix du billet fixé au coût marginal, on déduit $N_{b_{t+1}} = f(N_{b_t})$:

$$N_{b_{t+1}} = \frac{2dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 4cKdN + 12d^2N^2 - 16d^2NN_{b_t} + 8d^2N_{b_t}^2 - 8dFK}}{4d}$$

On pose :

$$x_{t+1} = f(x_t)$$

$$\text{avec } f(x_t) = \frac{2dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 4cKdN + 12d^2N^2 - 16d^2Nx + 8d^2x^2 - 8dFK}}{4d}$$

$$\Leftrightarrow f(x_t) = \frac{N}{2} - \frac{cK}{4d} + \frac{\sqrt{A(x)}}{4d}$$

$$\text{avec } A(x) = c^2K^2 - 4cKdN + 12d^2N^2 - 16d^2Nx + 8d^2x^2 - 8dFK$$

$$\Leftrightarrow A(x) > 0$$

La racine est donc positive.

Pour que la stabilité soit globale, démontrons que la dérivée de $f(x)$ est inférieure

à 1 :

$$f'(x) = -\frac{2d(N-x)}{\sqrt{A}} \leq 0 \text{ car } N > x$$

Donc $f'(x) \leq 1$ et la stabilité globale est bien vérifiée.

CHAPITRE IV

LA TARIFICATION DE LA CONGESTION ET L'AFFECTION DES RECETTES DU PEAGE VERS DEUX PROGRAMMES

**CHAPITRE IV : LA TARIFICATION DE LA CONGESTION ET L'AFFECTATION
DES RECETTES DU PEAGE VERS DEUX PROGRAMMES**

Introduction

Le choix de l'affectation des recettes totales du péage vers les transports collectifs est une solution particulière de cas plus généraux. En effet, comme cela a été évoqué dans la première section par différents auteurs, les autorités peuvent faire le choix de n'orienter qu'une part des recettes du péage vers les transports collectifs et décider d'attribuer l'autre part vers d'autres programmes. Ainsi, nous allons analyser ces possibilités de politiques publiques à l'aide de deux modélisations. Dans le premier cas, en partant des modèles présentés dans les sections 2 et 3 nous considérerons une situation où le décideur peut orienter une partie des recettes du péage vers les transports collectifs, et l'autre vers le budget général de la collectivité. Dans un second cas, nous observerons la situation où une part des recettes est affectée au budget et une autre part aux automobilistes. Dans ces deux options, nous ne considérerons que le péage de pointe. En effet, cette solution permet d'exclure moins d'automobilistes par rapport au péage uniforme, rendant ainsi plus acceptable le péage. La troisième section permettra de comparer les résultats obtenus analytiquement et de les éclairer à l'aide d'une application numérique. Enfin dans une quatrième section, nous observerons la situation où les recettes du péage sont orientées vers la route et vers les transports collectifs.

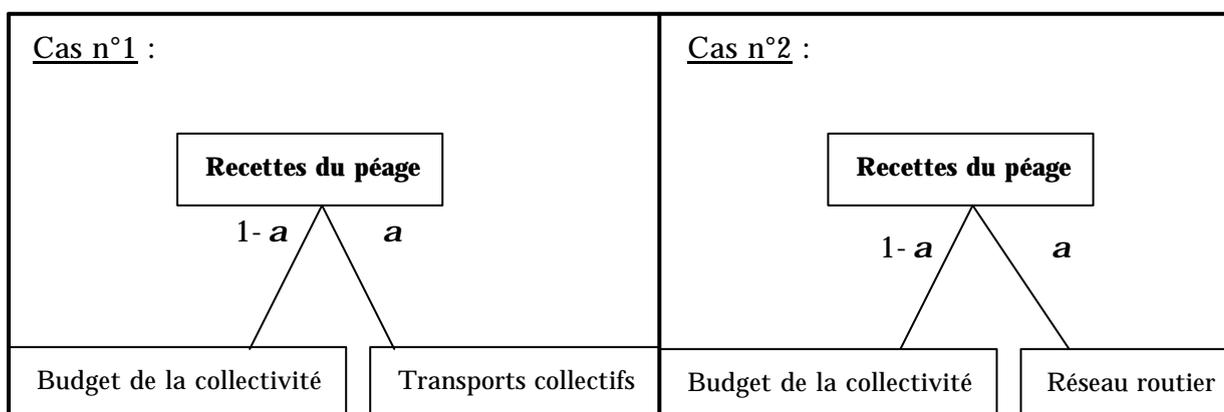


Figure 1 : Cas étudiés dans le chapitre IV

Section 1. La répartition des recettes entre les transports collectifs et le budget général

La méthode d'analyse restant identique à celle développée dans les deux sections précédentes, nous n'insisterons ici que sur deux cas avec le péage de pointe. Dans un premier temps nous considérerons la tarification des transports collectifs au coût marginal et ensuite nous la considérerons au coût moyen.

1.1. La tarification des transports collectifs au coût marginal

La situation avant redistribution, avec le péage de pointe, renvoie au cas présenté dans la section 2 et aux équations (9), (10) et (11) déjà évoquées par DANIELIS et MARCUCCI (2002) :

| N_a | N_b | Coût Total (CT) | Recettes (R) |
|----------------|--------------------|----------------------------|-------------------|
| $\frac{cK}{d}$ | $N - \frac{cK}{d}$ | $cN + F - \frac{c^2K}{2d}$ | $\frac{c^2K}{2d}$ |

Tableau 1 : Récapitulatif des résultats du paragraphe 2.2. avant redistribution

1.1.1. Affectation des recettes du péage vers deux programmes

Les autorités peuvent faire le choix d'orienter les recettes du péage vers les transports collectifs (part a , avec $a \in [0;1]$) ou vers le budget général de la collectivité (part $1-a$). Cette dernière part sera ensuite affectée vers d'autres secteurs que les transports. On suppose que les automobilistes ou les usagers des transports collectifs n'en seront pas particulièrement bénéficiaires. Nous obtenons ainsi un équilibre partiel.

Ainsi, après redistribution des recettes du péage les coûts individuels de déplacement s'écrivent (voir calcul de la stabilité en annexe 1) :

$$C_a = \frac{dN_a}{K} \tag{1}$$

$$C_b(t+1) = c - \frac{a \times \text{recettes}(t)}{N_b(t+1)} = c - \frac{adN_a^2(t)}{2K(N - N_a(t+1))}$$

Le coût de déplacement des automobilistes reste inchangé puisqu'ils ne sont pas concernés par l'affectation des recettes. Le prix du billet des transports collectifs (initialement fixé au coût marginal) se réduit d'une part a des recettes.

A l'équilibre, la répartition modale s'écrit :

$$(N_a^r, N_b^r) = \left(\begin{array}{l} \frac{-cK - dN + \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cKdaN}}{d(a - 2)}, \\ N + \frac{cK + dN - \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cKdaN}}{d(a - 2)} \end{array} \right) \quad (2)$$

Après avoir étudié les fonctions N_a et N_b ($\frac{\partial N_a^r}{\partial a} < 0$ et $\frac{\partial^2 N_a^r}{\partial^2 a} > 0$ et $\frac{\partial N_b^r}{\partial a} > 0$ et $\frac{\partial^2 N_b^r}{\partial^2 a} < 0$), on peut les déterminer graphiquement en fonction de a :

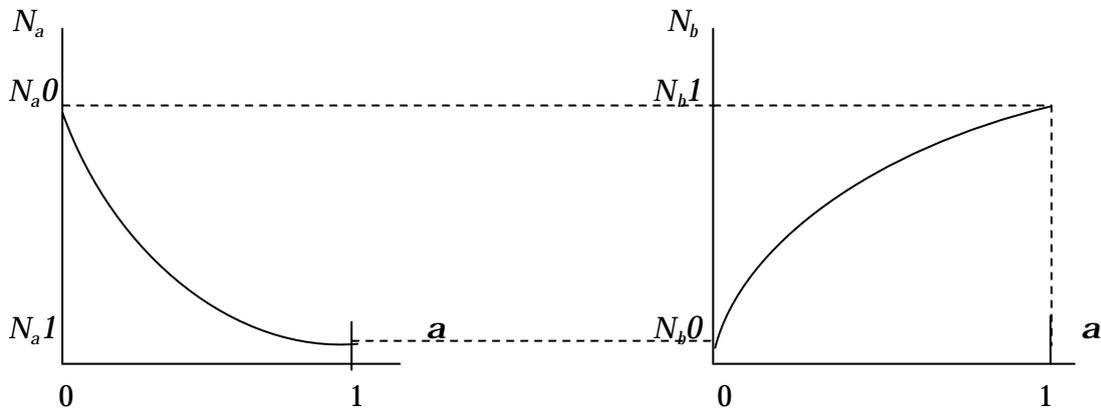


Figure 2 : La répartition modale en fonction de a

Nos calculs nous amènent à déterminer une valeur de a , $\hat{a} = \frac{4cK}{dN} - 2$, telle que $N_a^r = N_b^r$. Quand $a < \hat{a} \rightarrow N_a^r > N_b^r$, et quand $a > \hat{a} \rightarrow N_b^r > N_a^r$. Sur l'intervalle $a \in [0; 1]$, on a $\frac{1}{2} \leq \frac{cK}{dN} \leq \frac{3}{4}$. Si l'objectif des pouvoirs publics est d'inférer sur le comportement des individus, affecter une part $a > \hat{a}$ aux transports collectifs permettra d'en rendre plus nombreux les usagers. Les autorités peuvent agir sur les paramètres de cette valeur. Ainsi, une diminution de la capacité de la voirie (K) réduirait la possibilité d'avoir un nombre d'automobilistes supérieur au nombre d'usagers des transports collectifs. On remarque également qu'une augmentation de la population (N) accroît les potentialités d'avoir un nombre plus élevé d'usagers des transports collectifs.

Nous pouvons également calculer les solutions en coin. Lorsque $a = 1$, on retrouve les résultats de la section 2 du chapitre III avec l'intégralité des recettes orientée vers les transports collectifs. Dans le cas contraire ($a = 0$), l'intégralité des recettes est orientée vers le budget de la collectivité. La situation est ainsi assimilable à la situation

avant redistribution. Dans ce cas, l'orientation des recettes du péage n'affecte pas le comportement des individus.

• $a = 1 \rightarrow$

$$(N_a^r, N_b^r) = \left(N + \frac{cK}{d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2}{d^2}}, -\frac{cK}{d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2}{d^2}} \right) \quad (3)$$

• $a = 0 \rightarrow$

$$\begin{cases} (N_a^r, N_b^r) = \left(\frac{cK}{d}, N - \frac{cK}{d} \right) & \text{si } N > N_s^{r0} = N_s^f \\ (N_a^r, N_b^r) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^{r0} = N_s^f \end{cases} \quad (4)$$

Le calcul des recettes à l'équilibre se fait de la même façon que précédemment. On obtient ainsi :

$$R_m^r = \frac{[cK + dN - \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2cKdN + 2cKdaN}]^2}{2dK(a-2)^2} \quad (5)$$

Logiquement, plus a est grand et plus le nombre d'usagers des transports collectifs est élevé, réduisant ainsi le nombre d'automobilistes et donc le poids des recettes. Ainsi, sur l'intervalle $a \in [0;1]$, on a $\frac{\partial R_m^r}{\partial a} < 0$ et $\frac{\partial^2 R_m^r}{\partial^2 a} > 0$:

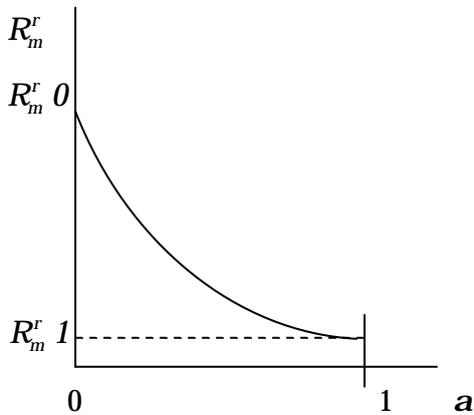


Figure 3 : Les recettes du péage en fonction de a

De la même façon qu'avec la répartition modale, on peut mettre en évidence de situations extrêmes. Avec $a = 1$, on retrouve les résultats de la section 2 quand l'intégralité des recettes est orientée vers les transports collectifs. Et avec $a = 0$, l'intégralité des recettes est orientée vers le budget de la collectivité. On retrouve la situation avant redistribution.

• $a = 1 \rightarrow$

$$R_m^r 1 = \frac{(dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2})^2}{2dK} \quad (6)$$

• $a = 0 \rightarrow$

$$R_m^r 0 = \frac{c^2K}{2d} \quad (7)$$

1.1.2. Calcul du coût total et du a optimal (a^*)

Nous allons déterminer le coût total quelque soit a , puis nous rechercherons le a optimal permettant de minimiser ce coût total. Ainsi ce a optimal, nous amènera à poser les valeurs optimales de la répartition modale et des recettes collectées.

Avant de calculer le nouveau coût total, on calcule C_a et C_b à l'équilibre après redistribution des recettes du péage et lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre :

$$C_a^r = C_b^r = \frac{-cK - dN + \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cKdaN}}{(a - 2)K} \quad (8)$$

A l'équilibre, le coût total s'écrit donc :

$$CT_m^r = \frac{N(-cK - dN + \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cKdaN})}{(a - 2)K} - \frac{(cK + dN - \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cKdaN})^2}{2dK(a - 2)^2} + F \quad (9)$$

Avec les deux solutions extrêmes :

• $a = 1 \rightarrow$

$$CT_m^r 1 = cN + F + \frac{dN^2}{K} - \frac{N}{K} \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2} \quad \text{si } N > N_s^{r1} = N_s^{f2} \quad (10)$$

• $a = 0 \rightarrow$

$$CT_m^r 0 = cN + F - \frac{c^2K}{2d} \quad \text{si } N > N_s^{r0} = N_s^f \quad (11)$$

On a donc $CT_m^r 1 > CT_m^r 0$ (cf. section 2, Chapitre III). Les calculs des dérivées première et seconde du coût total, permettent de déterminer la croissance et la convexité de la courbe :

$$\frac{\partial CT_m^r}{\partial a} > 0 \text{ et } \begin{cases} \frac{\partial^2 CT_m^r}{\partial^2 a} > 0 \text{ pour } 0 \leq a \leq \bar{a} \\ \frac{\partial^2 CT_m^r}{\partial^2 a} < 0 \text{ pour } \bar{a} \leq a \leq 1, \text{ quand } \bar{a} < 1 \end{cases}$$

Ainsi le coût total augmente avec a :

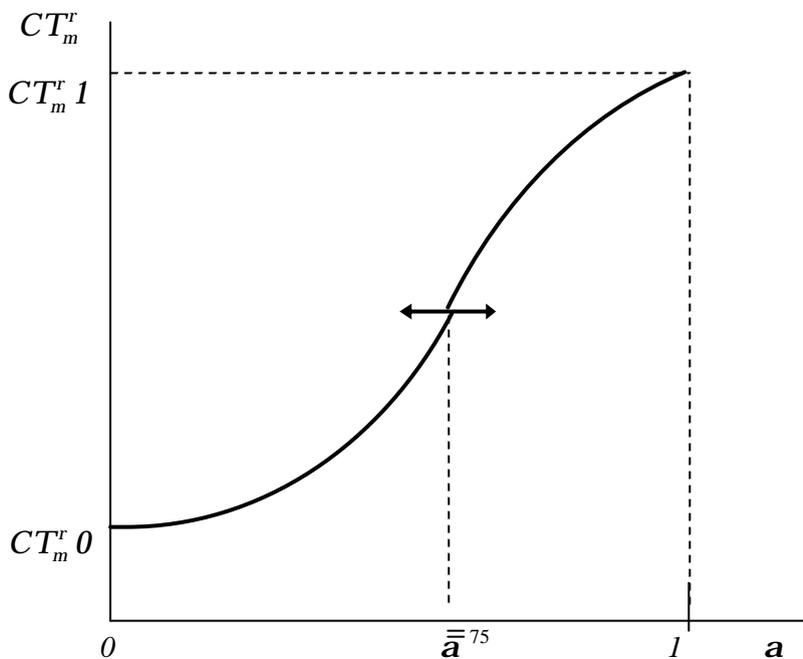


Figure 4 : L'évolution du coût total en fonction de a

Maintenant, on détermine le a optimal qui minimise le coût total à partir de la dérivée du coût total. On obtient, $a^* = 0$.

Les valeurs optimales sont donc celles déterminées ci-dessus avec $a = 0$.

La répartition modale optimale :

$$\begin{cases} (N_a^{r*}, N_b^{r*}) = \left(\frac{cK}{d}, N - \frac{cK}{d} \right) & \text{si } N > N_s^{r0} \\ (N_a^{r*}, N_b^{r*}) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^{r0} \end{cases} \quad (12)$$

Les recettes optimales:

$$R_m^{r*} = \frac{c^2 K}{2d} \quad (13)$$

⁷⁵ Avec $\bar{a} = \frac{d^2 N^2 - 2c^2 K^2 + Nd cK + (dN - cK) \sqrt{c^2 K^2 + 7d^2 N^2 - 8cKdN}}{3cKdN}$.

Le coût total optimal :

$$CT_m^{r*} = cN + F - \frac{c^2K}{2d} \quad \text{si } N > N_s^{r0} \quad (14)$$

1.1.3. Interprétation partielle des résultats

A l'optimum, les résultats sont logiquement les mêmes que ceux développés dans la section 2, paragraphe 2.2. du chapitre III. Ces calculs nous ont permis de remarquer que suivant la valeur de a , les recettes après redistribution sont inférieures ou égales à celles réalisées avant redistribution. Quand l'intégralité des recettes est orientée vers les transports collectifs, la répartition modale se distord fortement augmentant ainsi le coût total. Inversement, lorsque l'intégralité des recettes est intégrée dans le budget, il n'y a aucun effet sur le comportement des individus, et le coût total ne change pas. Il importe donc de souligner que plus grande est l'affectation des recettes vers les transports collectifs, et plus élevé sera le coût total du fait des effets de distorsion de la redistribution. Toutefois, suivant l'objectif recherché par les pouvoirs publics, la politique de redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs permet de diminuer l'usage de l'automobile en ville.

1.2. La tarification des transports collectifs au coût moyen

De la même façon que lors du paragraphe précédent (1.1.), nous reprenons la situation initiale avant redistribution des recettes du péage, dans le cas où le prix du billet des transports collectifs est fixé au coût moyen et lorsque le péage est un péage de pointe.

| N_a | N_b | Coût Total | Recettes |
|--|--|--|-------------------------|
| $\frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d}\right)^2 - \frac{FK}{d}}$ | $\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d}\right)^2 - \frac{FK}{d}}$ | $cN + \frac{N}{N_b^f} F - \frac{d(N_a^f)^2}{2K}$ | $\frac{d(N_a^f)^2}{2K}$ |

Tableau 2 : Récapitulatif des résultats du paragraphe 3.2. avant redistribution

1.2.1. L'affectation des recettes du péage vers deux programmes

De la même façon que précédemment, les autorités peuvent faire le choix d'orienter les recettes du péage soit vers les transports collectifs (part a), soit vers le budget général de la collectivité (part $1-a$).

Ainsi, après redistribution des recettes du péage les coûts individuels de déplacement s'écrivent (voir le calcul de la stabilité en annexe 1) :

$$C_a = \frac{dN_a}{K}$$

$$C_b(t+1) = c + \frac{F}{N_b(t+1)} - \frac{a \times \text{recettes}(t)}{N_b(t+1)} = c + \frac{F}{N_b(t+1)} - \frac{adN_a^2(t)}{2K(N - N_a(t+1))}$$

Le prix du billet des transports collectifs (initialement fixé au coût moyen) devient après redistribution de la part a des recettes.

A l'équilibre, la répartition modale devient:

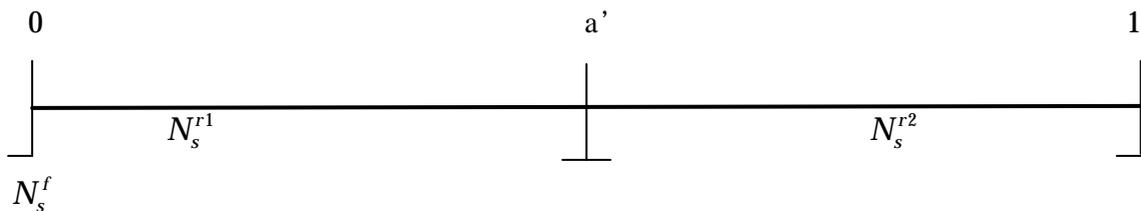
$$\left\{ \begin{array}{l} (N_a^r, N_b^r) = \left(\frac{-cK - dN + \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cKdaN - 4dFK + 2adFK}}{d(a-2)}, \right. \\ \left. \frac{adN + cK - dN - \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cKdaN - 4dFK + 2adFK}}{d(a-2)} \right) \quad \text{si } N > N_s^r \\ (N_a^r, N_b^r) = (N, 0) \quad \text{si } N \leq N_s^r \end{array} \right. \quad (15)$$

La définition de la taille seuil de la ville est complexe car elle dépend de la valeur attribuée à a . Ainsi :

$$\left\{ \begin{array}{l} N_s^r = N_s^f = \frac{cK + 2\sqrt{dFK}}{d} \quad \text{quand } a = 0 \\ N_s^r = N_s^{r1} = \frac{\sqrt{2adFK}}{ad} \quad \text{quand } 0 < a \leq a' \\ N_s^r = N_s^{r2} = \frac{cK(1-a) + \sqrt{c^2K^2(a^2 - 2a) + 2dFK(2-a)}}{d} \quad \text{quand } a' \leq a \leq 1 \end{array} \right.$$

$$\text{avec } a' = \left[1 + \frac{c^2K}{4dF} - \frac{c\sqrt{4c^2K^2 + 32FK}}{8dF} \right] \geq 0$$

Pour mieux visualiser N_s^r par rapport à a , on peut le présenter comme suit :



Nos calculs nous révèlent qu'il existe une valeur de \mathbf{a} , $\hat{\mathbf{a}} = \frac{4(2FK + cKN)}{dN^2} - 2$, telle que $\frac{1}{2} \leq \frac{2FK + cKN}{dN^2} \leq \frac{3}{4}$ pour laquelle $N_a^r = N_b^r$ et qui implique que quand $\mathbf{a} < \hat{\mathbf{a}} \rightarrow N_a^r > N_b^r$, et quand $\mathbf{a} > \hat{\mathbf{a}} \rightarrow N_b^r > N_a^r$.

De la même façon qu'avec le coût marginal, si l'objectif des pouvoirs publics est d'inférer sur le comportement des individus, affecter une part $\mathbf{a} > \hat{\mathbf{a}}$ aux transports collectifs permettra de rendre le nombre d'usagers plus important. $\hat{\mathbf{a}}$ est fonction de plusieurs paramètres sur lesquels les autorités peuvent agir. Ainsi, une diminution de la capacité de la voirie (K) – comme dans le cas précédent – mais également une diminution du coût fixe (F) de l'infrastructure des transports collectifs, augmenterait la possibilité d'avoir un nombre d'usagers des transports collectifs supérieur au nombre d'automobilistes. On remarque aussi qu'une augmentation du nombre d'individus (N) accroît les potentialités d'avoir un nombre plus élevé d'usagers des transports collectifs.

De la même façon que lors de la tarification au coût marginal, on remarque que le nombre d'usagers des transports collectifs augmente avec \mathbf{a} et que ceux de l'automobile diminuent avec \mathbf{a} .

Ceci nous permet de calculer les solutions extrêmes. Lorsque $\mathbf{a} = 1$, on retrouve les résultats de la section 3 du chapitre III avec l'intégralité des recettes orientée vers les transports collectifs. Dans le cas contraire ($\mathbf{a} = 0$), l'intégralité des recettes est orientée vers le budget de la collectivité. La situation est la même que celle avant redistribution. Avec cette option, l'orientation des recettes du péage n'affecte pas le comportement des individus : il n'y a pas de distorsion de la demande de déplacement.

• $\mathbf{a}=1 \rightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} (N_a^r, N_b^r) = \left(N + \frac{cK}{d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}{d^2}}, \right. \\ \left. -\frac{cK}{d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}{d^2}} \right) \quad \text{si } N > N_s^{r1} = N_s^{f2} \\ (N_a^r, N_b^r) = (N, 0) \quad \text{si } N \leq N_s^r = N_s^{f2} \end{array} \right. \quad (16)$$

• $a = 0 \rightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} (N_a^r, N_b^r) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} \right)^2 - \frac{FK}{d}}, \right. \\ \left. (N_a^r, N_b^r) = (N, 0) \right. \end{array} \right. \text{ si } N > N_s^r \quad (17)$$

$$\left. \begin{array}{l} \left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} \right)^2 - \frac{FK}{d}}, \right) \\ \text{ si } N \leq N_s^r \end{array} \right.$$

Le calcul des recettes à l'équilibre se fait de la même façon que précédemment. On obtient ainsi :

$$R_M^r = \frac{(cK + dN - \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cKdaN - 4dFK + 2adFK})^2}{2dK(a - 2)^2} \quad (18)$$

Logiquement, plus a est grand et plus le nombre d'utilisateurs des transports collectifs est élevé, réduisant ainsi le nombre d'automobilistes et donc le poids des recettes.

Comme avec la répartition modale, il existe deux solutions en coin. Avec $a = 1$, on retrouve les résultats du chapitre précédent quand l'intégralité des recettes est orientée vers les transports collectifs. Et avec $a = 0$, l'intégralité des recettes est orientée vers le budget de la collectivité. On retrouve la situation avant redistribution.

• $a = 1 \rightarrow$

$$R_M^r 1 = \frac{(dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK})^2}{2dK} \quad (19)$$

• $a = 0 \rightarrow$

$$R_M^r 0 = \frac{(dN + cK + \sqrt{(cK - dN)^2 - 4dFK})^2}{8dK} \quad (20)$$

1.2.2. Calcul du coût total et du a optimal (a^*)

Comme avec la tarification au coût marginal, avant de calculer le nouveau coût total, nous calculons C_a et C_b à l'équilibre après redistribution des recettes du péage et lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre :

$$C_a^r = C_b^r = \frac{-cK - dN + \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cKdaN - 4dFK + 2adFK}}{(a - 2)K} \quad (21)$$

A l'équilibre, le coût total quelque soit a s'écrit donc :

$$CT_M^r = \frac{N \left(-cK - dN + \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cK daN - 4dFK + 2adFK} \right)}{(a - 2)K} - \frac{\left(cK + dN - \sqrt{(cK - dN)^2 + 2cK daN - 4dFK + 2adFK} \right)^2}{2dK(a - 2)^2} \quad (22)$$

Avec les deux solutions en coin :

- $a=1 \rightarrow$

$$CT_M^r 1 = cN + \frac{dN^2}{K} - \frac{N}{K} \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK} \quad (23)$$

- $a=0 \rightarrow$

$$CT_M^r 0 = cN + \frac{N}{N_b} F - \frac{d(N - N_b)^2}{2K} \quad (24)$$

Les calculs des dérivées première et seconde du coût total, permettent de déterminer la forme et la convexité de la courbe :

| a | [0 | a^* | \hat{a} | 1] |
|--|----|-------|-----------|----|
| CT_M^r | | | | |
| $\frac{\partial CT_M^r}{\partial a}$ | - | ○ | + | + |
| $\frac{\partial^2 CT_M^r}{\partial^2 a}$ | + | + | ○ | - |

Tableau 3 : Tableau de variation du coût total

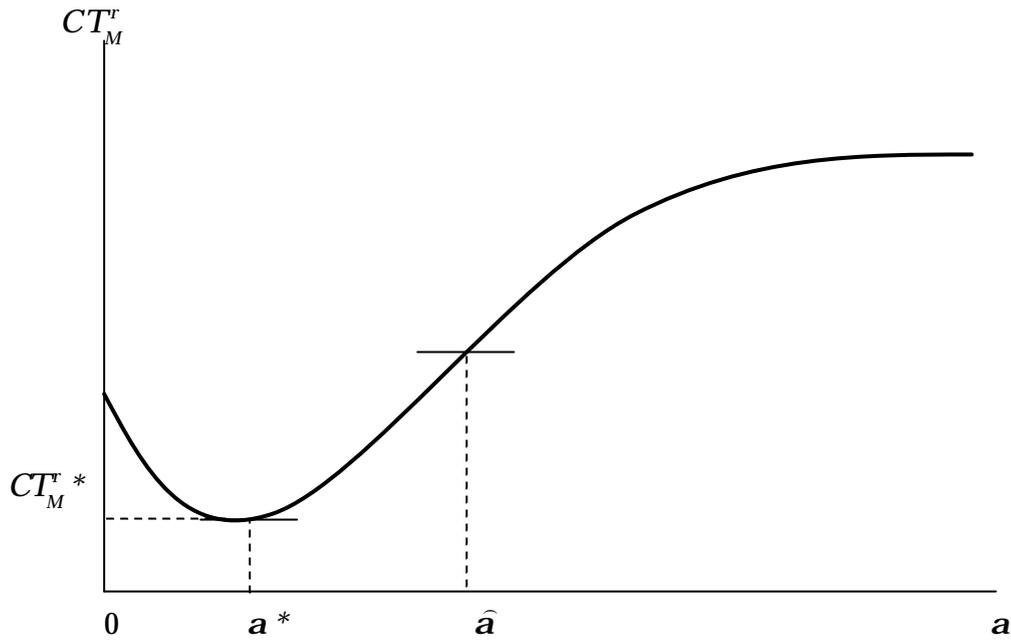


Figure 5 : Courbe du coût total en fonction de a

Il existe une valeur de a pour laquelle la dérivée du coût total est nulle. Cet a^* correspond au minimum de la fonction CST_M^r puisque sur cet intervalle, elle est convexe. Quand a est supérieur à \hat{a} , alors la fonction devient concave. Ceci dépend de la position de \hat{a} par rapport à 1⁷⁶.

Le a optimal qui minimise le coût total, et qui se calcule à partir de la dérivée du coût total, est $a^* = \min\left\{\frac{2dF}{c^2K}, 1\right\} > 0$.

La répartition modale optimale : (avec $a^* = \frac{2dF}{c^2K}$)⁷⁷

$$\begin{cases} (N_a^*, N_b^*) = \left(\frac{cK}{d}, N - \frac{cK}{d}\right) & \text{si } N > N_s^r \\ (N_a^*, N_b^*) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^r \end{cases} \quad (25)$$

⁷⁶ Le calcul de \hat{a} donne :

$$\hat{a} = \frac{(2Ndc + 4dF - 2c^2K^2)\sqrt{c^4K^2 + 7d^2N^2c^2 - 8c^3KdN + 22cFNd^2 - 10dFKc^2 + 16d^2F^2}}{9c^2Kd(F + cN)} - \frac{-c^4K^2 + d(19cdNF + c^2N^2d + Nc^3K + 16dF^2 + 5c^2KF)}{9c^2Kd(F + cN)}$$

⁷⁷ Dans le cas où $\frac{2dF}{c^2K} \geq 1$, $a^* = 1$. On retrouve les résultats en coin calculés avec $a = 1$.

Les recettes optimales : (avec $a^* = \frac{2dF}{c^2K}$)

$$R_M^r * = \frac{c^2K}{2d} \quad (26)$$

Le coût total optimal : (avec $a^* = \frac{2dF}{c^2K}$)

$$CT_M^r * = cN + F - \frac{c^2K}{2d} \quad (27)$$

1.2.3. Interprétation partielle des résultats

Ces résultats offrent aux pouvoirs publics un vaste champ d'application. Par exemple, si l'on souhaite que la part des recettes attribuée aux transports collectifs s'accroisse tout en maintenant une situation optimale (coût total minimum), il convient de réduire la capacité de la voirie (le a^* se décale vers la droite sur le graphique). De la même façon, une augmentation des coûts fixes entraînerait un résultat similaire. Si les coûts fixes augmentent, la redistribution des recettes permet d'accroître le nombre d'utilisateurs des transports en commun. Ceci entraîne un amortissement des coûts fixes, car F/N_b diminue. A contrario, une augmentation de la capacité du réseau routier, ainsi qu'une réduction des coûts fixes des transports collectifs, augmenterait la part des recettes attribuée au budget général.

1.3. Comparaison des résultats

A la lumière des résultats développés au cours des deux cas de figure, nous procédons ici à une étude plus poussée de la portée de notre analyse.

Dans un premier temps, rappelons que la tarification des transports collectifs au coût marginal ne prend en compte que les coûts de présence des usagers sur le réseau et n'intègre pas les coûts d'infrastructure (F). Ainsi la collectivité finance, par le biais de subventions, les infrastructures des transports collectifs. La mise en place d'un tarif au coût moyen permet d'éviter cette manœuvre budgétaire et faire payer les coûts d'infrastructure par les usagers exclusifs des transports collectifs.

Les résultats à l'optimum sont intéressants puisqu'ils sont les mêmes dans les deux modes de tarification. Avec le coût marginal, il faut que les recettes du péage soient intégralement reversées au budget général ($a=0$) si l'on veut que le coût total soit minimum. Au coût moyen, la répartition des recettes doit se faire de sorte que

$a^* = \min \left\{ \frac{2dF}{c^2K}, 1 \right\}$. Ainsi, plus les pouvoirs publics décident d'augmenter la part des recettes allant aux transports collectifs, et plus le coût total avec le prix du billet fixé au coût marginal augmentera. Inversement, le coût total avec le prix du billet fixé au coût moyen diminuera jusqu'à une valeur optimale. Du point de vue de l'acceptabilité populaire du péage de congestion, il est donc plus recommandé de mettre en place une tarification des transports collectifs au coût moyen et ensuite d'affecter une part optimale des recettes à ces mêmes transports. Ici, la part a^* correspond aux coûts fixes intégrés dans le prix du billet. Plus les coûts fixes sont élevés et plus le a^* est élevé.

Section 2. La répartition des recettes entre la route et le budget général

Comme précédemment, nous considérons une situation où les pouvoirs publics peuvent affecter une part des recettes vers deux programmes : le budget général et l'amélioration du réseau routier de sorte que le coût de déplacement des automobilistes diminue. Dans un premier temps nous considérerons la tarification des transports collectifs au coût marginal et ensuite nous la considérerons au coût moyen.

2.1. La tarification des transports collectifs au coût marginal

La situation avant redistribution, avec le péage de pointe, renvoie au cas présenté dans la section 2 et aux équations (9), (10) et (11) déjà évoquées par DANIELIS et MARCUCCI (2002) :

| N_a | N_b | Coût Total (CST) | Recettes (R) |
|----------------|--------------------|----------------------------|-------------------|
| $\frac{cK}{d}$ | $N - \frac{cK}{d}$ | $cN + F - \frac{c^2K}{2d}$ | $\frac{c^2K}{2d}$ |

Tableau 3 : Récapitulatif des résultats du paragraphe 2.2. avant redistribution

2.1.1. Affectation des recettes du péage vers deux programmes

Les autorités peuvent faire le choix d'orienter les recettes du péage vers les automobilistes (part a) ou vers le budget général de la collectivité (part $1-a$).

Ainsi, après redistribution des recettes du péage les coûts individuels de déplacement s'écrivent (voir stabilité en annexe 2) :

$$C_a(t+1) = \frac{dN_a(t+1)}{K} - \frac{a \times \text{recettes}(t)}{[N_a(t+1)]} = \frac{dN_a(t+1)}{K} - \frac{adN_a^2(t)}{2K(N_a(t+1))}$$

$$C_b = c$$

Le coût de déplacement des usages des transports collectifs reste inchangé puisqu'ils ne sont pas concernés par l'affectation des recettes. Le coût de déplacement des automobilistes diminue après redistribution d'une part a des recettes.

A l'équilibre, la répartition modale s'écrit (avec la taille de la ville seuil :

$$N_s^r = -\frac{2cK}{d(a-2)} > 0) :$$

$$\begin{cases} (N_a^r, N_b^r) = \left(\frac{-2cK}{a-2d}, N + \frac{2cK}{a-2d} \right) & \text{si } N > N_s^r \\ (N_a^r, N_b^r) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^r \end{cases} \quad (28)$$

On peut déterminer graphiquement N_b et N_a en fonction de a ($\frac{\partial N_a^r}{\partial a} > 0$ et $\frac{\partial^2 N_a^r}{\partial^2 a} > 0$ et

$$\frac{\partial N_b^r}{\partial a} < 0 \text{ et } \frac{\partial^2 N_b^r}{\partial^2 a} < 0):$$

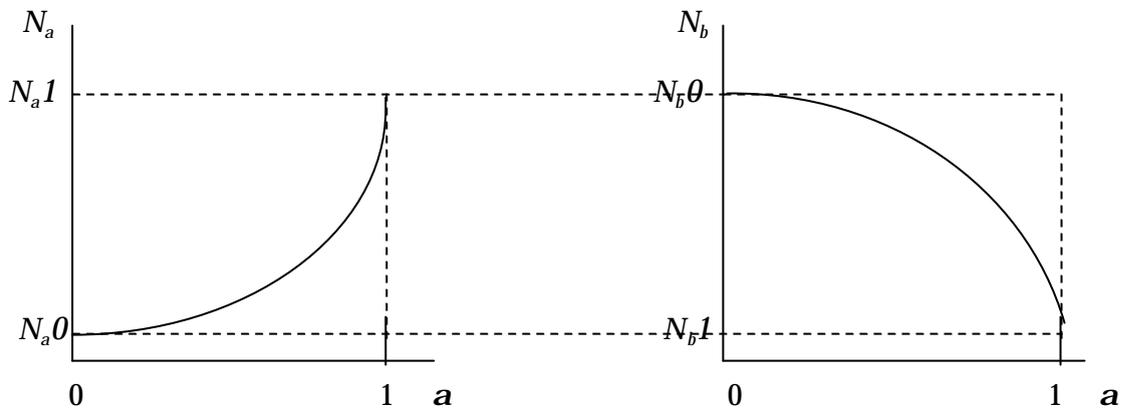


Figure 6 : La répartition modale en fonction de a

Nos calculs nous ont amenés à déterminer une valeur de a , $\hat{a} = 2d - \frac{4cK}{N}$, telle que $N_a^r = N_b^r$. Quand $a < \hat{a} \rightarrow N_b^r > N_a^r$, et quand $a > \hat{a} \rightarrow N_a^r > N_b^r$. Si l'objectif des pouvoirs publics est d'inférer sur le comportement des individus, affecter une part $a > \hat{a}$ aux automobilistes permettra d'en accroître le nombre. \hat{a} est fonction de plusieurs paramètres sur lesquels les autorités peuvent agir. Ainsi, une augmentation de la capacité de la voirie (K) réduirait la possibilité d'avoir un nombre d'utilisateurs des transports collectifs supérieur au nombre d'automobilistes. On remarque aussi qu'une augmentation du nombre d'individus (N) accroît les potentialités d'avoir un nombre plus élevé d'automobilistes.

De la même façon que précédemment, nous calculons les solutions extrêmes. Lorsque $a = 1$, l'intégralité des recettes est orientée vers la route : le péage est assimilable à un péage de financement. Si 100% des recettes sont affectées aux automobilistes, le péage n'influera pas sur le comportement des individus. Avec cette option particulière, on constate que le nombre d'utilisateurs de la route a doublé par rapport

à la situation initiale. A l'équilibre lorsque $a = 1$, le péage devient très incitatif puisque la circulation est fluide (péage de pointe) et les dépenses en péage sont remboursées aux automobilistes payeurs. Ici, c'est la période de pointe qui va être élargie. Cela peut se traduire par : "ce que je paie aujourd'hui, me revient en intégralité demain". Dans le cas contraire ($a = 0$), l'intégralité des recettes est orientée vers le budget de la collectivité. La situation est la même que la situation avant redistribution. Ici, l'orientation des recettes du péage n'affecte pas le comportement des individus.

• $a = 1 \rightarrow$

$$\begin{cases} (N_a^r, N_b^r) = \left(\frac{2cK}{d}, N - \frac{2cK}{d} \right) & \text{si } N > N_s^{r1} = \frac{2cK}{d} \\ (N_a^r, N_b^r) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^{r1} = \frac{2cK}{d} \end{cases} \quad (29)$$

• $a = 0 \rightarrow$

$$\begin{cases} (N_a^r, N_b^r) = \left(\frac{cK}{d}, N - \frac{cK}{d} \right) & \text{si } N > N_s^{r0} = N_s^f \\ (N_a^r, N_b^r) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^{r0} = N_s^f \end{cases} \quad (30)$$

Le calcul des recettes à l'équilibre se fait de la même façon que précédemment. On obtient ainsi :

$$R_m^r = \frac{2c^2 K}{d(a-2)^2} \quad (31)$$

Logiquement, plus a est grand et plus le nombre d'usagers des transports collectifs est faible, l'augmentation du nombre d'automobilistes entraîne donc une augmentation du poids des recettes. Dans le cas extrême où $a = 1$, les automobilistes sont les seuls à profiter des recettes du péage.

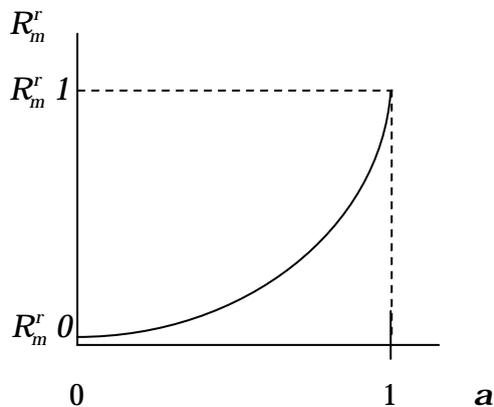


Figure 7 : Les recettes du péage en fonction de a

De la même façon qu'avec la répartition modale, il existe deux solutions extrêmes. Avec $\mathbf{a} = 1$, l'intégralité des recettes est orientée vers la route. Dans ce cas, nous pouvons préciser que les recettes à l'équilibre sont quatre fois supérieures à celles avant redistribution. Et avec $\mathbf{a} = 0$, l'intégralité des recettes est orientée vers le budget de la collectivité. Dans ce cas, on retrouve la situation avant redistribution.

- $\mathbf{a} = 1 \rightarrow$

$$R_m^r 1 = \frac{2c^2 K}{d}$$

- $\mathbf{a} = 0 \rightarrow$

$$R_m^r 0 = \frac{c^2 K}{2d}$$

2.1.2. Calcul du coût total et du \mathbf{a} optimal (\mathbf{a}^*)

Nous allons déterminer le coût total quelque soit \mathbf{a} , puis nous rechercherons le \mathbf{a} optimal permettant de minimiser le coût total. Ainsi ce \mathbf{a} optimal nous permettra de calculer les valeurs optimales de la répartition modale et des recettes.

Avant de calculer le nouveau coût total, on calcule C_a et C_b à l'équilibre après redistribution des recettes du péage et lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre :

$$C_a^r = C_b^r = c$$

A l'équilibre, le coût total s'écrit donc :

$$CT_m^r = cN + F - (1 - \mathbf{a}) \frac{2c^2 K}{d(\mathbf{a} - 2)^2} \quad (32)$$

Avec les deux solutions extrêmes :

- $\mathbf{a} = 1 \rightarrow$

$$CT_m^r 1 = cN + F$$

- $\mathbf{a} = 0 \rightarrow$

$$CT_m^r 0 = cN + F - \frac{c^2 K}{2d}$$

On a donc $CT_m^r 1 > CT_m^r 0$. Les calculs des dérivées première et seconde du coût total permettent de déterminer la croissance et la convexité de la courbe :

$$\frac{\partial CT_m^r}{\partial \mathbf{a}} > 0 \text{ et } \frac{\partial^2 CT_m^r}{\partial^2 \mathbf{a}} > 0$$

Ainsi le coût total augmente avec \mathbf{a} :

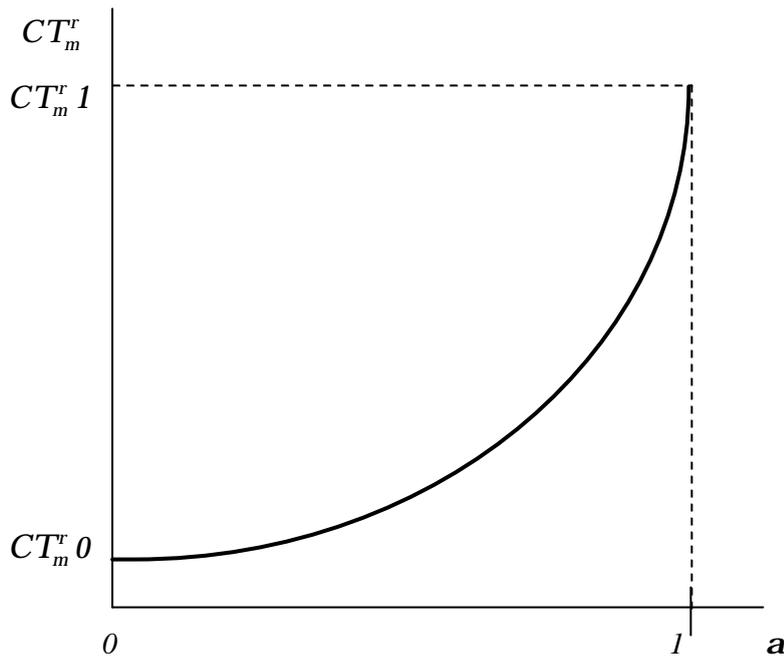


Figure 8 : L'évolution du coût total en fonction de a

Maintenant, on détermine le a optimal qui minimise le coût total à partir de la dérivée du coût total. On obtient, $a^* = 0$.

Les valeurs optimales sont donc celles déterminées ci-dessus avec $a = 0$.

La répartition modale optimale :

$$\begin{cases} (N_a^{r*}, N_b^{r*}) = \left(\frac{cK}{d}, N - \frac{cK}{d} \right) & \text{si } N > N_s^{r0} \\ (N_a^{r*}, N_b^{r*}) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^{r0} \end{cases} \quad (33)$$

Les recettes optimales:

$$R_m^{r*} = \frac{c^2K}{2d} \quad (34)$$

Le coût total optimal :

$$CT_m^{r*} = cN + F - \frac{c^2K}{2d} \quad \text{si } N > N_s^{r0} \quad (35)$$

2.1.3. Interprétation partielle des résultats

A l'optimum, les résultats sont logiquement les mêmes que ceux développés dans la section 2, paragraphe 2.2.. Ces calculs nous ont permis de remarquer que suivant la

valeur de a , les recettes après redistribution sont supérieures ou égales à celles réalisées avant redistribution. Il importe de souligner que plus grande est l'affectation des recettes vers les routes, et plus élevé est le coût total. Les pouvoirs publics n'ont pas intérêt à affecter les recettes vers les routes, car cela accroîtrait le coût total, cela aurait un effet néfaste sur la répartition modale et ainsi engendrerait une augmentation de toutes les externalités négatives liées à la route (pollution, bruit, accidents). Toutefois, dans le cas d'un projet de type autoroutier, affecter une part importante des recettes vers les routes permettra d'augmenter les recettes à l'équilibre.

2.2. La tarification des transports collectifs au coût moyen

De la même façon que lors du paragraphe précédent (2.1.), nous reprenons la situation initiale avant redistribution des recettes du péage, dans le cas où le prix du billet des transports collectifs est fixé au coût moyen et lorsque le péage est un péage de pointe.

| N_a | N_b | Coût Total | Recettes |
|--|--|--|-------------------------|
| $\frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d}\right)^2 - \frac{FK}{d}}$ | $\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d}\right)^2 - \frac{FK}{d}}$ | $cN + \frac{N}{N_b^f} F - \frac{d(N_a^f)^2}{2K}$ | $\frac{d(N_a^f)^2}{2K}$ |

Tableau 4 : Récapitulatif des résultats du paragraphe 3.2. avant redistribution

2.2.1. L'affectation des recettes du péage vers deux programmes (routes et budget général)

Comme précédemment, les autorités peuvent faire le choix d'orienter les recettes du péage soit vers le réseau routier (part a), soit vers le budget général de la collectivité (part $1-a$).

Ainsi, après redistribution des recettes du péage les coûts individuels de déplacement s'écrivent (pour la stabilité, voir annexe 2) :

$$C_a(t+1) = \frac{dN_a(t+1)}{K} - \frac{a \times \text{recettes}(t)}{[N_a(t+1)]} = \frac{dN_a(t+1)}{K} - \frac{adN_a^2(t)}{2K(N_a(t+1))}$$

$$C_b = c + \frac{F}{N_b(t)}$$

Le coût de déplacement en automobile est réduit de la part a des recettes.

A l'équilibre, lorsque les conditions de stabilité sont vérifiées⁷⁸, la répartition modale devient:

$$\left\{ \begin{array}{l} (N_a^r, N_b^r) = \left(\frac{-2cK - 2dN + adN}{2d(a-2)} + \frac{\sqrt{(2cK - 2dN)^2 + 4cKdaN - 16dFK + 8adFK - 4ad^2N^2 + a^2d^2N^2}}{2d(a-2)}, \right. \\ \left. N - \frac{-2cK - 2dN + adN}{2d(a-2)} + \frac{\sqrt{(2cK - 2dN)^2 + 4cKdaN - 16dFK + 8adFK - 4ad^2N^2 + a^2d^2N^2}}{2d(a-2)} \right), \quad \text{si } N > N_s^r \\ (N_a^r, N_b^r) = (N, 0) \quad \text{si } N \leq N_s^r \end{array} \right.$$

Le domaine de définition de N_a^r dépend de la taille seuil de la ville, mais aussi des valeurs de a pour lesquelles N_a^r et N_b^r ne sont pas définies. Ainsi lorsque l'on étudie la racine carrée de N_a^r , la fonction n'est pas définie avec :

$N_s^r \in \left[\frac{-2cK - 2\sqrt{2dFK(2-a)}}{d(a-2)}; \frac{-2cK + 2\sqrt{2dFK(2-a)}}{d(a-2)} \right]$. Il existe également des valeurs de a pour lesquelles N_a^r et N_b^r ne sont pas définis. Sur l'intervalle :

$$\mathbf{a}_s^M \in \left[\begin{array}{l} \mathbf{a}1_s^M = \frac{2(dN^2 - cKN - 2FK - 2\sqrt{cK^2NF + F^2K^2})}{dN^2}; \\ \mathbf{a}2_s^M = \frac{2(dN^2 - cKN - 2FK + 2\sqrt{cK^2NF + F^2K^2})}{dN^2} > 1 \end{array} \right]$$

Le tableau de variation ci-après permettra mieux de percevoir l'évolution du nombre d'automobilistes par rapport à a .

| a | $[0$ | $\min\{\mathbf{a}1_s^M; 1\}]$ |
|-------------------------------------|------|-------------------------------|
| N_a^r | | |
| $\frac{\partial N_a^r}{\partial a}$ | + | |

Tableau 5 : Tableau de variation du nombre d'automobilistes

⁷⁸ Ce qui n'est pas toujours le cas dans cette situation.

De la même façon que lors de la tarification au coût marginal, on remarque que le nombre d'automobilistes augmente avec a jusqu'à une certaine valeur de $a = \min\{a1_s^M; 1\}$. Notons également qu'il existe une valeur de a , $\hat{a} = 2 - \frac{4cKN + 8FK}{dN^2}$, pour laquelle $N_a^r = N_b^r$. Quand $a < \hat{a} \rightarrow N_b^r > N_a^r$, et quand $a > \hat{a} \rightarrow N_a^r > N_b^r$. Si l'objectif des pouvoirs publics est d'inférer sur le comportement des individus et si $a < a1_s^M$, affecter une part $a > \hat{a}$ aux automobilistes permettra d'en accroître le nombre. Dans cet intervalle, une augmentation de la capacité de la voirie (K), ou une augmentation du coût fixe (F), réduirait les possibilités d'avoir un nombre d'usagers des transports collectifs supérieur au nombre d'automobilistes (\hat{a} se déplace vers la droite sur le graphique). On remarque aussi qu'une augmentation du nombre d'individus (N) accroît les potentialités d'avoir un nombre plus élevé d'automobilistes.

Ces calculs nous permettent de déterminer les solutions extrêmes. Lorsque $a = 1$, l'intégralité des recettes est orientée vers la route. Dans le cas contraire ($a = 0$), l'intégralité des recettes est orientée vers le budget de la collectivité. La situation est la même que celle avant redistribution. Avec cette option, l'orientation des recettes du péage n'affecte pas le comportement des individus.

• $a=1 \rightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} (N_a^r, N_b^r) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \frac{\sqrt{(2cK - dN)^2 - 8dFK}}{2d}, \right. \\ \left. N - \frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \frac{\sqrt{(2cK - dN)^2 - 8dFK}}{2d} \right) \quad \text{si } N > N_s^r \\ (N_a^r, N_b^r) = (N, 0) \quad \text{si } N \leq N_s^r \end{array} \right.$$

• $a=0 \rightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} (N_a^r, N_b^r) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d}\right)^2 - \frac{FK}{d}}, \frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d}\right)^2 - \frac{FK}{d}} \right) \quad \text{si } N > N_s^r \\ (N_a^r, N_b^r) = (N, 0) \quad \text{si } N \leq N_s^r \end{array} \right.$$

Le calcul des recettes à l'équilibre se fait de la même façon que précédemment. On obtient ainsi :

$$R_M^r = \frac{\left(-2cK + dN(a - 2) + \sqrt{(2cK + dN)^2 + d(4cKaN - 16FK + 8aFK - 4dN^2a + dN^2a^2)}\right)^2}{8dK(a - 2)^2}$$

De la même façon qu'avec le nombre d'automobilistes, il existe des valeurs de a pour lesquelles la fonction des recettes n'est pas définie. Sur l'intervalle $a_s^M \in]a_1^M; 1[$, R_M^r n'est pas définie.

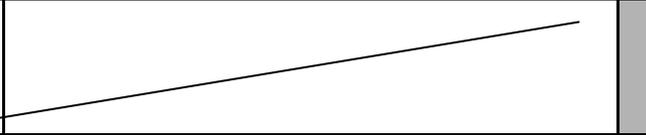
| a | [0 | $\min\{a_1^M; 1\}$] |
|-------------------------------------|--|----------------------|
| R_M^r |  | |
| $\frac{\partial R_M^r}{\partial a}$ | + | |

Tableau 6 : Tableau de variation des recettes

Logiquement, plus a est grand et plus le nombre d'automobilistes est élevé, augmentant ainsi le poids des recettes jusqu'à une certaine valeur de a .

De la même façon qu'avec la répartition modale, il existe deux solutions extrêmes. Avec $a = 1$, l'intégralité des recettes est affectée au usagers de la route. Et avec $a = 0$, l'intégralité des recettes est orientée vers le budget de la collectivité. On retrouve la situation avant redistribution.

- $a = 1 \rightarrow$

$$R_M^r 1 = \frac{\left(dN + 2cK - \sqrt{(2cK - dN)^2 - 8dFK}\right)^2}{8dK}$$

- $a = 0 \rightarrow$

$$R_M^r 0 = \frac{\left(dN + cK + \sqrt{(cK - dN)^2 - 4dFK}\right)^2}{8dK}$$

2.2.2. Calcul du coût total et du a optimal (a^*)

Comme avec la tarification au coût marginal, avant de calculer le nouveau coût total, nous calculons C_a et C_b à l'équilibre après redistribution des recettes du péage et lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre, c'est-à-dire pour les zones dans lesquelles la solution est stable :

$$C_a^r = C_b^r = \frac{2cK - dN(a - 2) - \sqrt{(2cK + dN)^2 + d(4cKaN - 16FK + 8aFK - 4dN^2a + dN^2a^2)}}{4K}$$

A l'équilibre, le coût total quelque soit a s'écrit donc :

$$CT_M^r = \frac{N \left(2cK - dN(a-2) - \sqrt{(2cK + dN)^2 + d(4cKaN - 16FK + 8aFK - 4dN^2a + dN^2a^2)} \right)}{4K} - \frac{\left(-2cK + dN(a-2) + \sqrt{(2cK + dN)^2 + d(4cKaN - 16FK + 8aFK - 4dN^2a + dN^2a^2)} \right)^2}{8dK(a-2)^2}$$

Avec les deux solutions extrêmes :

- $a=1 \rightarrow$

$$CT_M^r 1 = \frac{N \left(2c^2K - 2dF - cdN - c\sqrt{(2cK - dN)^2 - 8dFK} \right)}{\left(-dN + 2cK - \sqrt{(2cK - dN)^2 - 8dFK} \right)}$$

- $a=0 \rightarrow$

$$CT_M^r 0 = cN + \frac{N}{N_b} F - \frac{d(N - N_b)^2}{2K}$$

De la même façon que précédemment, il existe des valeurs de a pour lesquelles le coût total n'est pas défini. Sur l'intervalle $a_s^M \in]a_1^M; 1[$, CT_M^r n'est pas défini.

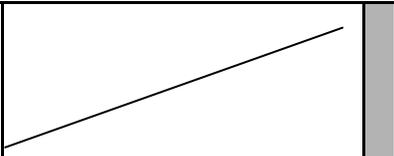
| a | $[0$ | $min \{a_1^M; 1\}]$ |
|--------------------------------------|---|---------------------|
| CT_M^r |  | |
| $\frac{\partial CT_M^r}{\partial a}$ | + | |

Tableau 7 : Tableau de variation du coût total

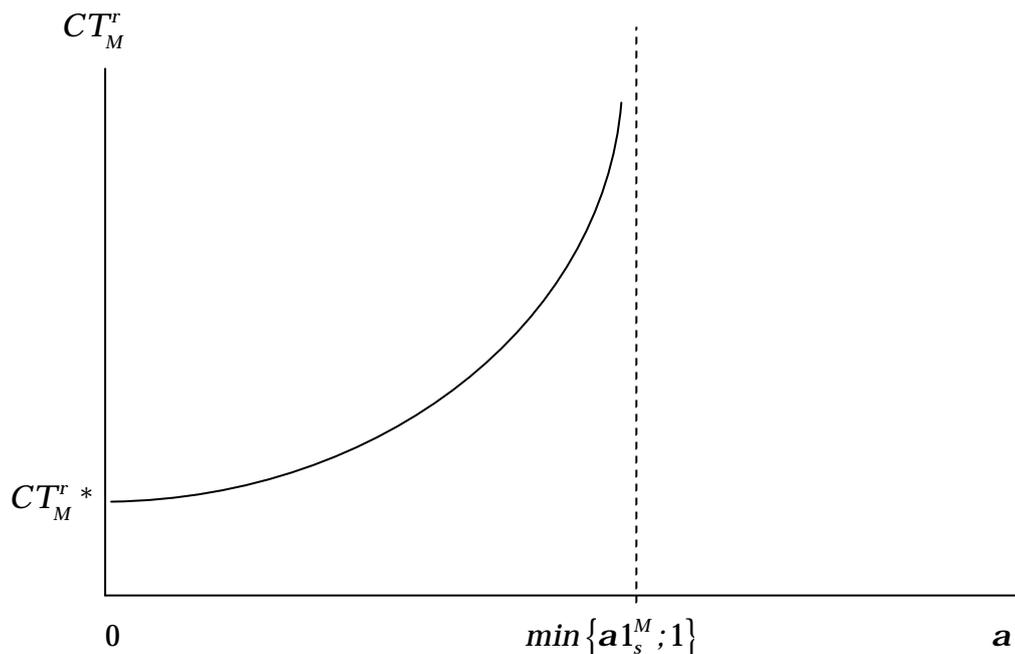


Figure 9 : L'évolution du coût total en fonction de a

Il existe une valeur de a pour laquelle la dérivée du coût total est nulle. Cet a^* correspond au minimum de la fonction CT_M^r puisque sur cet intervalle, elle est convexe.

Le a optimal qui minimise le coût total à partir de la dérivée du coût total est $a^* = \max \left\{ 0, \frac{-2dF}{c(dN - cK)} \right\}$, mais comme $dN > cK$, $\frac{-2dF}{c(dN - cK)} < 0$. Donc $a^* = 0$.

La répartition modale optimale :

$$\begin{cases} (N_a^*, N_b^*) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} \right)^2 - \frac{FK}{d}}, \frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} \right)^2 - \frac{FK}{d}} \right) & \text{si } N > N_s^* \\ (N_a^*, N_b^*) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^* \end{cases}$$

Les recettes optimales:

$$R_M^* = \frac{\left(dN + cK + \sqrt{(cK - dN)^2 - 4dFK} \right)^2}{8dK}$$

Le coût total optimal :

$$CT_M^{r*} = cN + \frac{N}{N_b} F - \frac{d(N - N_b)^2}{2K}$$

2.2.3. Interprétation partielle des résultats

A l'optimum, les résultats sont identiques à ceux développés dans la section 3, paragraphe 3.2. du chapitre III. Ces calculs nous ont permis de remarquer que suivant la valeur de a , les recettes après redistribution sont supérieures ou égales à celles réalisées avant redistribution. Il importe de souligner que plus grande est l'affectation des recettes vers les routes, et plus le coût total sera élevé. Ceci s'explique par le fait que les coûts de déplacement en transports collectifs augmentent car le rapport F/Nb diminue, et que les coûts de déplacement en automobile augmentent car les contraintes d'horaires sont plus élevées. De plus, les pouvoirs publics n'ont pas intérêt à affecter les recettes vers les routes, car cela aurait aussi un effet néfaste sur la répartition modale et ainsi cela engendrerait une augmentation de toutes les externalités négatives liées à la route (pollution, bruit, accidents) non prises en compte dans notre modélisation. Toutefois, dans le cas d'un projet de type autoroutier, affecter une part importante des recettes vers les routes permettra d'augmenter les recettes à l'équilibre.

La section 3 permettra d'approfondir les comparaisons entre les différentes politiques de tarification exposées au cours des deux premières sections.

Section 3 : L'affectation des recettes du péage vers deux programmes : comparaisons analytiques et application numérique

Les pouvoirs publics peuvent mettre en œuvre plusieurs politiques avec des objectifs différents. Nous retiendrons ici deux types de politique urbaine de déplacement : la régulation de la circulation automobile en rendant plus acceptable le péage de congestion et la régulation de la circulation automobile en maximisant les recettes afin de développer le réseau routier. De manière *ad hoc*, nous supposons que le péage est mieux accepté lorsque plusieurs critères sont réunis : le péage est variable dans le temps, le coût total est minimisé, le nombre d'utilisateurs de l'automobile est minimum, et les recettes sont réaffectées vers le secteur des transports et plus précisément vers les transports collectifs (à ce sujet voir l'enquête réalisée en Suisse dans le dernier Chapitre)⁷⁹. La mise en place d'un péage devra également s'accompagner d'une politique d'information des citoyens de grande envergure.

Afin de bien visualiser les résultats analytiques évoqués lors des conclusions de chacun des modèles exposés ci-dessus et retranscrites ici dans le cadre de comparaisons générales (3.1.), nous allons mettre en oeuvre des simulations numériques (3.2.). Suivant les objectifs mis en avant, les pouvoirs publics peuvent agir avec plus ou moins de difficultés sur plusieurs paramètres. Essentiellement, un paramètre est aux commandes du décideur politique : la capacité des routes (K). Les subventions des transports collectifs que nous traduisons ici par le coût fixe des infrastructures (F) est un paramètre à prendre en considération dans nos observations. Le coût marginal (c) et les coûts du temps et de déplacement (définis par d) sont des données exogènes. Enfin, la population qui se déplace (N) n'a pas de lien direct avec les pouvoirs publics. Nous étudierons 3 cas : une situation initiale, une situation où les autorités agissent sur les capacités de voirie, une autre situation où elles agissent sur les coûts fixes.

3.1. Comparaisons générales

Nous allons effectuer maintenant des comparaisons globales compte tenu des politiques de tarification des transports collectifs et des politiques d'affectation des recettes du péage sur trois niveaux : la répartition modale, le niveau des recettes et le coût total.

⁷⁹ Le choix de ces critères est justifié par différentes études et rapports abordant la question de l'acceptabilité du péage (PRIMA, 2000 ; CERTU, 2001 ; M. GLACHANT et B. BUREAU, 2004).

3.1.1. Comparaison du comportement des usagers

Certains des résultats que nous présentons ici sont intuitifs. Lorsque les recettes sont intégralement reversées vers le budget (assimilable au cas "avant redistribution"), le nombre d'usagers de la route avec la tarification des transports collectifs au coût moyen est supérieur au nombre d'automobilistes avec la tarification au coût marginal. Ensuite, quand la part a est affectée à la route, le nombre d'automobilistes (N_{aM}^R, N_{am}^R)⁸⁰ augmente avec a et le nombre d'utilisateurs des transports collectifs (N_{aM}^{TC}, N_{am}^{TC}) diminue avec a . Inversement, quand la part a est affectée aux transports collectifs, le nombre d'automobilistes diminue avec a et le nombre d'utilisateurs des transports collectifs augmente avec a .

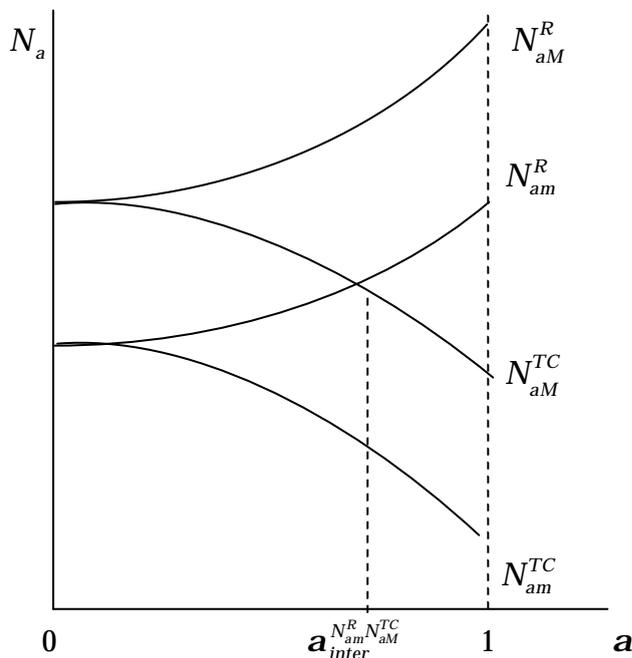


Figure 10 : Evolution du nombre d'automobilistes en fonction d' a

Comme nous le constatons sur la figure 10, il existe une valeur a qui correspond à l'intersection entre la courbe du nombre d'automobilistes, avec affectation des recettes vers la route et tarification des transports collectifs au coût marginal (N_{am}^R), et la courbe du nombre d'automobilistes, avec affectation des recettes vers les transports collectifs et

⁸⁰ On notera l'exposant R, lorsque les recettes sont affectées vers la route et le budget et l'exposant TC, lorsque les recettes sont orientées vers les transports collectifs et vers le budget. M indique que le prix du billet est fixé au coût moyen et m indique qu'il est fixé au coût marginal.

tarification des transports collectifs au coût moyen (N_{aM}^{TC}) : $\mathbf{a}_{inter}^{N_{am}^R N_{aM}^{TC}}$. Ainsi, avec

$\mathbf{a}_{inter}^{N_{am}^R N_{aM}^{TC}} = \frac{2F}{F + cN}$ et lorsque $N > F/c$ ⁸¹, on a :

$$\begin{cases} \mathbf{a} \in [0; \mathbf{a}_{inter}^{N_{am}^R N_{aM}^{TC}}[\Rightarrow N_{aM}^R > N_{aM}^{TC} > N_{am}^R > N_{am}^{TC} \\ \mathbf{a} = \mathbf{a}_{inter}^{N_{am}^R N_{aM}^{TC}} \Rightarrow N_{aM}^R > N_{aM}^{TC} = N_{am}^R > N_{am}^{TC} \\ \mathbf{a} \in]\mathbf{a}_{inter}^{N_{am}^R N_{aM}^{TC}}; 1] \Rightarrow N_{aM}^R > N_{am}^R > N_{aM}^{TC} > N_{am}^{TC} \end{cases}$$

Dans ce cas, et de manière évidente, la politique la plus efficace pour agir sur la répartition modale et diminuer le nombre d'automobilistes est celle qui consiste à redistribuer les recettes du péage vers les transports en commun et avec une tarification au coût marginal.

3.1.2. Comparaison des recettes

Lorsque les recettes sont intégralement reversées vers le budget, le niveau des recettes est plus élevé avec la tarification des transports collectifs au coût moyen. Ensuite, quand la part \mathbf{a} est affectée à la route, les recettes (R_M^R, R_m^R) augmentent avec \mathbf{a} et diminuent lorsqu'elles sont affectées aux transports collectifs (R_M^{TC}, R_m^{TC}). Ceci s'explique par le fait qu'une augmentation des usagers de la route génère nécessairement un accroissement des passages au péage et donc une augmentation globale des recettes.

De la même façon que précédemment il existe une valeur \mathbf{a} qui correspond à l'intersection entre la courbe des recettes, avec affectation des recettes vers la route et tarification des transports collectifs au coût marginal (R_m^R), et la courbe du nombre d'automobilistes, avec affectation des recettes vers les transports collectifs et tarification des transports collectifs au coût moyen (R_M^{TC}) : $\mathbf{a}_{inter}^{R_m^R R_M^{TC}}$. Ainsi, avec $\mathbf{a}_{inter}^{R_m^R R_M^{TC}} = \frac{2F}{F + cN}$ et lorsque $N > F/c$ ⁸², on a :

$$\begin{cases} \mathbf{a} \in [0; \mathbf{a}_{inter}^{R_m^R R_M^{TC}}[\Rightarrow R_M^R > R_M^{TC} > R_m^R > R_m^{TC} \\ \mathbf{a} = \mathbf{a}_{inter}^{R_m^R R_M^{TC}} \Rightarrow R_M^R > R_M^{TC} = R_m^R > R_m^{TC} \\ \mathbf{a} \in]\mathbf{a}_{inter}^{R_m^R R_M^{TC}}; 1] \Rightarrow R_M^R > R_m^R > R_M^{TC} > R_m^{TC} \end{cases}$$

⁸¹ Dans le cas contraire, lorsque $N < F/c$, les deux courbes ne se croisent pas sur l'intervalle $[0; 1]$.

⁸² Dans le cas contraire, lorsque $N < F/c$, les deux courbes ne se croisent pas sur l'intervalle $[0; 1]$.

Dans ce cas, la politique la plus efficace pour agir sur la répartition modale ($TC+ Cm$) est aussi celle qui génère le moins de recettes. C'est cette problématique qui est au cœur de tous les débats, et notamment à Londres à savoir, réduction de l'usage des automobiles en ville *versus* augmentation des recettes du péage.

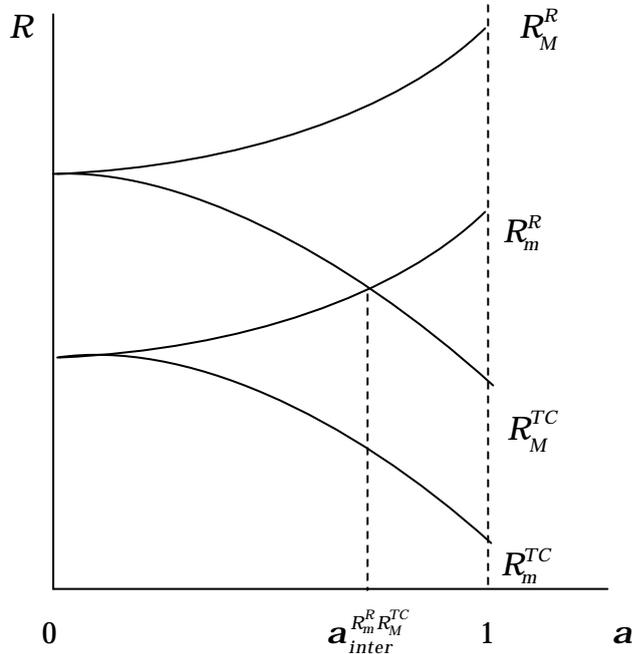


Figure 11 : Evolution des recettes en fonction d' a

3.1.3. Comparaison des coûts totaux

Quand l'intégralité des recettes est affectée au budget global, le coût total est plus élevé lorsque la tarification des transports collectifs est au coût moyen. Ensuite lorsque a augmente, les coûts totaux augmentent sauf quand la politique de redistribution est affectée une part des recettes vers les transports collectifs et de fixer le prix du billet au coût moyen (CT_M^{TC}). Dans ce cas le coût total diminue jusqu'à une valeur a^* optimale qui minimise le coût total. Cette valeur est identique à celle (minimale) correspondant aux cas où le prix du billet des transports collectifs est fixé au coût marginal avec $a = 0$. Avec a^* , la politique de redistribution des recettes vers les transports collectifs en fixant le prix du billet au coût moyen, permet de minimiser le coût total en distordant la demande. Ce choix politique rendra plus acceptable le péage de congestion, puisque le coût total est minimal, mais il permet aussi de réduire le nombre d'automobilistes, et ainsi de diminuer l'ensemble des externalités non prises en compte dans le modèle présenté ici. En effet, une réduction de l'usage de la voiture permet de maintenir une certaine qualité de l'air et de diminuer les effets sonores dans la ville.

Comme CT_M^{TC} diminue, il existe deux intersections avec les coûts totaux lorsque le prix du billet est fixé au coût marginal (CT_m^R, CT_m^{TC}). Quand $N > F/c$, l'intersection entre CT_M^{TC} et CT_m^R est déterminée par $a_{int}^1 = \frac{2F}{F + cN}$. Lorsque $N < F/c$, $a_{int}^1 = \frac{1}{2} + \frac{d(F - cN) - \sqrt{d^2 F^2 - 2d^2 N F c + d^2 N^2 c^2 + 4c^4 K^2 - 4c^3 d K N - 12d F c^2 K}}{4c^2 K}$. La valeur a_{int}^2 correspondant à l'intersection entre CT_M^{TC} et CT_m^{TC} étant très complexe, nous proposons de la déterminer numériquement avec les paramètres présentés lors de l'application numérique ci-après. Ainsi, dans le cas général de notre simulation (données dans le paragraphe suivant), $a_{int}^2 = 0,35$; lorsque $K=10000$, $a_{int}^2 = 0,29$; lorsque $K=6000$, $a_{int}^2 = 0,46$; lorsque $F=10000$, $a_{int}^2 = 0,47$; et lorsque $F=5000$, $a_{int}^2 = 0,23$. Voici les comparaisons des coûts totaux selon les valeurs de a :

$$\left\{ \begin{array}{l} a \in [0; a_{int}^1[\Rightarrow CT_M^R > CT_M^{TC} > CT_m^R > CT_m^{TC} \\ a = a_{int}^1 \Rightarrow CT_M^R > CT_M^{TC} = CT_m^R > CT_m^{TC} \\ a \in]a_{int}^1; a_{int}^2[\Rightarrow CT_M^R > CT_m^R > CT_M^{TC} > CT_m^{TC} \\ a = a_{int}^2 \Rightarrow CT_M^R > CT_m^R > CT_M^{TC} = CT_m^{TC} \\ a \in]a_{int}^2; 1] \Rightarrow CT_M^R > CT_m^R > CT_m^{TC} > CT_M^{TC} \end{array} \right.$$

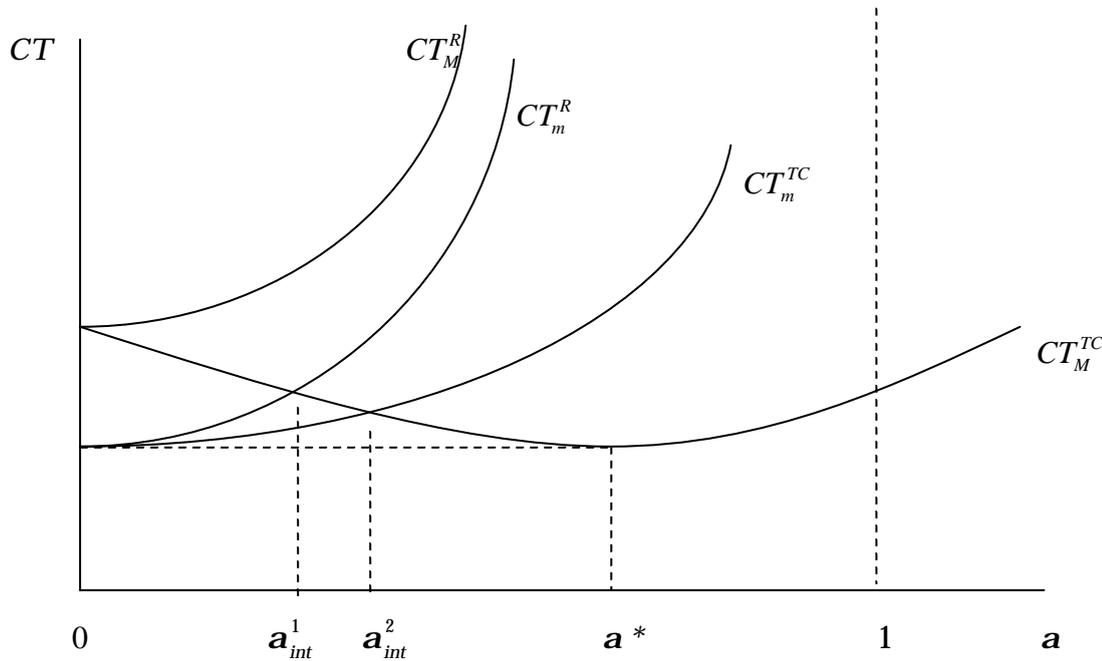


Figure 12 : Evolution des coûts totaux en fonction de a

Ces résultats nous permettent de souligner que selon les critères évoqués dans l'introduction de la section, la politique publique qui rendrait le plus acceptable le péage serait celle où le prix du billet est égal au coût moyen avec des recettes affectées vers les transports collectifs. En effet, à l'optimum, il existe un coût total minimum (égal à ceux de la politique de tarification au coût marginal lorsque les recettes sont reversées intégralement au budget), une part a^* des recettes qui est affectée au secteur des transports, et un nombre d'automobilistes plus faible. Toutefois, puisque les coûts fixes sont pris en compte dans le prix du billet, la tarification au coût marginal est plus efficace quant à la réduction de l'usage de l'automobile en ville.

3.2. Analyse numérique

L'intérêt d'une simulation numérique est de rendre plus pédagogique nos travaux de comparaisons, mais également de proposer une comparaison de nos résultats avec ceux des autres simulations (R. DANIELIS et E. MARCUCCI, 2002).

3.2.1. Situation initiale

Dans le cadre de cette simulation, nous allons reprendre les valeurs des paramètres suggérés par R. DANIELIS et E. MARCUCCI (2002)⁸³, les valeurs de a (ne pas confondre avec le a qui correspond à la part des recettes), b et g sont respectivement égales à 4,13€/h, 2,52€/h et 9,8 €/h. d qui correspond au rapport : $\frac{bg}{b+g} = 2$ €/h. Ensuite, N est égal à 24 100 individus, la capacité K équivaut à 8100 véhicules/h, le coût marginal c par usager est égal à 2,34€ et le coût fixe est égal à 7430 €. En appliquant ces valeurs dans les formules des sections précédentes, on obtient les résultats suivants pour trois valeurs de α ($\alpha = 0$, $\alpha = 1$ et α^*).

⁸³ Ces valeurs renvoient à des données actualisées par les auteurs. Elles sont en partie issues du Rapport Economique pour les Président des Etats-Unis (<http://www3.acces.gpo.gov/eop/>) et aussi des travaux de ARNOTT et al. (1993).

| Politique de tarification/politique d'affectation des recettes | Valeurs d' α | Na | Nb | Recettes | Coût Total |
|--|-------------------------------|--------------|--------|---------------|---------------|
| Cm/budget&TC | $\alpha^* = 0$ | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 52 736 |
| | 1 | 7 680 | 16 420 | 7 283 | 53 134 |
| CM/ budget&TC | 0 | 11 954 | 12 146 | 17 643 | 53 493 |
| | $\alpha^* = 0,67$ | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 52 736 |
| | 1 | 8 869 | 15 231 | 9 713 | 52 781 |
| Cm/ budget&R | $\alpha^* = 0$ | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 52 736 |
| | 1 | 18 954 | 5 146 | 44 352 | 63 824 |
| CM/ budget&R | $\alpha^* = 0$ | 11 954 | 12 146 | 17 643 | 53 463 |
| | $\alpha_{\text{seuil}} = 0,4$ | 17 969 | 6 131 | 39 862 | 61 639 |
| | 1 | - | - | - | - |

Tableau 8 : Résultats du cas général

Dans ce cas général, si l'objectif est de rendre plus acceptable le péage de congestion, on remarque qu'il existe trois situations similaires répondant à au moins deux des trois critères d'acceptabilité évoqués plus haut (coût total minimum, nombre d'automobilistes minimum, et affectation des recettes vers le secteur des transports). Les deux politiques de tarification au coût marginal lorsque l'intégralité des recettes est affectée au budget global permettent de minimiser le coût total, tout en maintenant un nombre d'automobilistes relativement faible. Dans le cas où la tarification des transports collectifs est fixée au coût moyen, et lorsque les recettes sont attribuées à 67% aux transports collectifs, la situation est similaire. Cette dernière option rend donc plus acceptable le péage de congestion, puisque les individus minimisent leur coût total, et savent que les recettes sont affectées au 2/3 vers les usagers des transports collectifs. Néanmoins, la politique Cm/budget&TC, permet de minimiser le nombre d'utilisateurs de l'automobile lorsque les recettes sont intégralement reversées vers les transports collectifs. Les recettes devenant dans ce cas minimales, le coût total reste supérieur aux situations optimales.

Si l'objectif des pouvoirs publics est la maximisation des recettes, il convient d'affecter 100% des recettes du péage vers la route. Ainsi avec une tarification des transports collectifs au coût marginal, on obtient des recettes maximales.

Dans le graphique ci-dessous, on remarque que le coût total augmente plus vite avec a , lorsque les recettes sont affectées vers la route. Il existe une valeur seuil de a au-delà de laquelle les solutions ne sont pas définies.

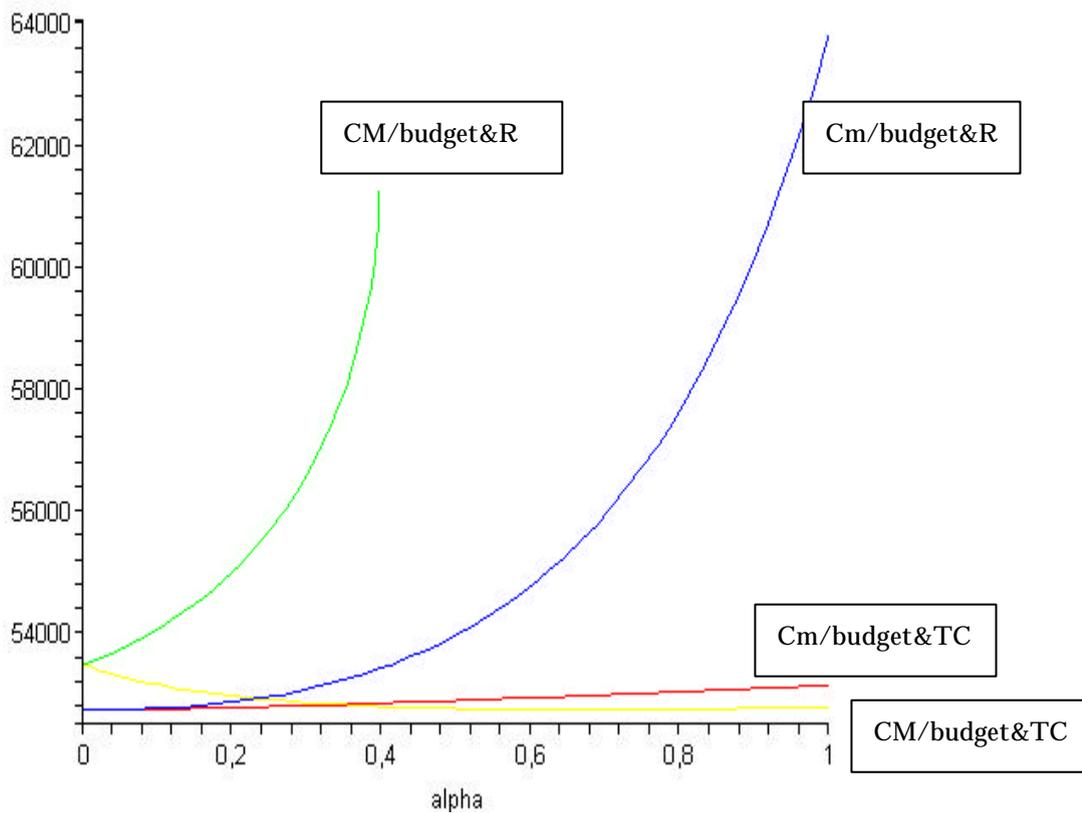


Figure 13 : Evolution des coûts totaux en fonction de a

Quand les recettes sont affectées entre le budget et la route, le nombre d'automobilistes croît avec a . Ceci génère des recettes croissantes. Inversement, lorsque les recettes sont orientées entre les transports collectifs et le budget général, le nombre d'automobilistes et le niveau des recettes décroît avec a .

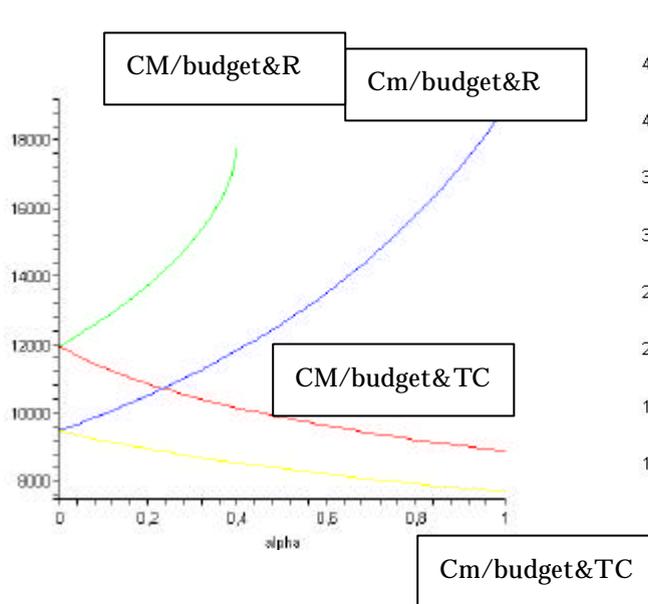


Figure 14 : Evolution du nombre d'automobilistes avec α

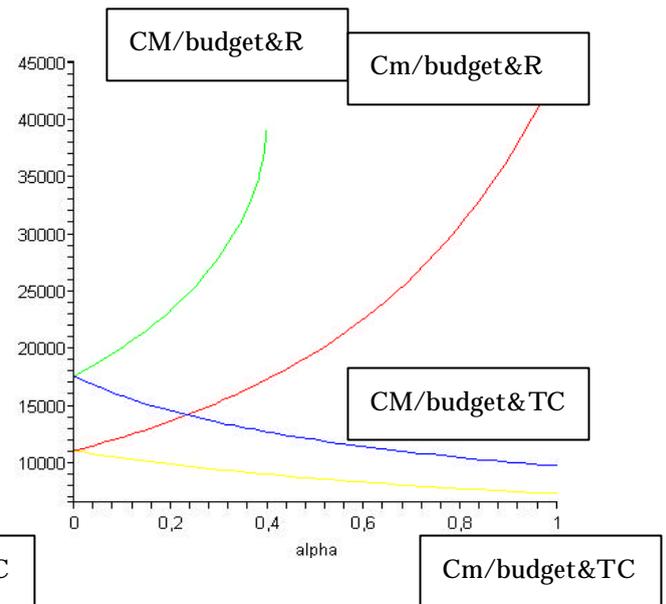


Figure 15 : Evolution des recettes avec α

3.2.2. Evolution de la capacité de voirie

Les pouvoirs publics peuvent agir sur le niveau global du réseau routier en augmentant ou en diminuant l'espace utilisable en voiture.

3.2.2.1. Augmentation de la capacité de voirie

Cette option permet de jouer sur le niveau d'utilisation de la voiture. En augmentant l'espace routier en ville, les autorités développent l'usage de la voiture et ainsi permettent d'obtenir des recettes supérieures.

Dans le tableau ci-dessous, on constate que le nombre d'automobilistes est supérieur à la situation initiale. Ceci entraîne nécessairement une hausse des recettes dans tous les cas. Avec la politique CM/budget&TC, la part des recettes affectée vers les transports collectifs est plus faible $\alpha^* = \frac{2dF}{c^2K} = 54,3\%$, puisque K a augmenté. Cette situation optimale qui minimise le coût total distord moins la demande de déplacement. Naturellement le coût total est donc inférieur dans tous les cas. Ceci s'explique également par le fait que la demande de déplacement globale est fixe et que la capacité de voirie augmente. Il y a plus de place pour les utilisateurs de l'automobile.

| Politique de tarification/politique d'affectation des recettes | Valeurs d' α | Na | Nb | Recettes | Coût Total |
|--|---------------------------------|--------------|--------|---------------|---------------|
| Cm/budget&TC | $\alpha^* = 0$ | 11 700 | 12 400 | 13 689 | 50 135 |
| | 1 | 9 010 | 15 090 | 8 118 | 50 859 |
| CM/ budget&TC | 0 | 16 764 | 7 336 | 28 104 | 52 670 |
| | $\alpha^* = 0,543$ | 11 700 | 12 400 | 13 689 | 50 135 |
| | 1 | 10 435 | 10 965 | 10 888 | 50 295 |
| Cm/ budget&R | $\alpha^* = 0$ | 11 700 | 12 400 | 13 689 | 50 135 |
| | 1 | 23 400 | 700 | 54 756 | 63 824 |
| CM/ budget&R | $\alpha^* = 0$ | 16 764 | 7 336 | 28 104 | 52 670 |
| | $\alpha_{\text{seuil}} = 0,023$ | 17 970 | 6 130 | 32 289 | 54 065 |
| | 1 | - | - | - | - |

Tableau 9 : Résultats lorsque $K = 10\ 000$

De la même façon que dans le cas initial, le coût total augmente plus vite avec a , lorsque les recettes sont affectées vers la route. Et quand les recettes sont affectées entre le budget et la route, le nombre d'automobilistes croît avec a . Ceci génère des recettes croissantes. Inversement, lorsque les recettes sont orientées entre les transports collectifs et le budget général, le nombre d'automobilistes et le niveau des recettes décroît avec a .

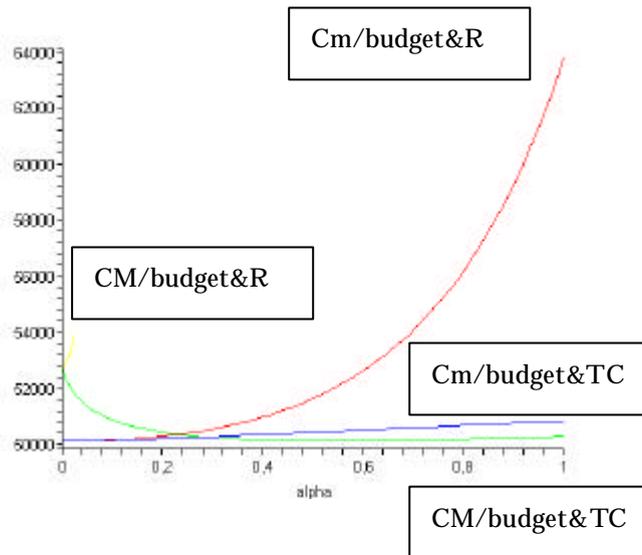


Figure 16 : Evolution des coûts totaux avec $K = 10000$

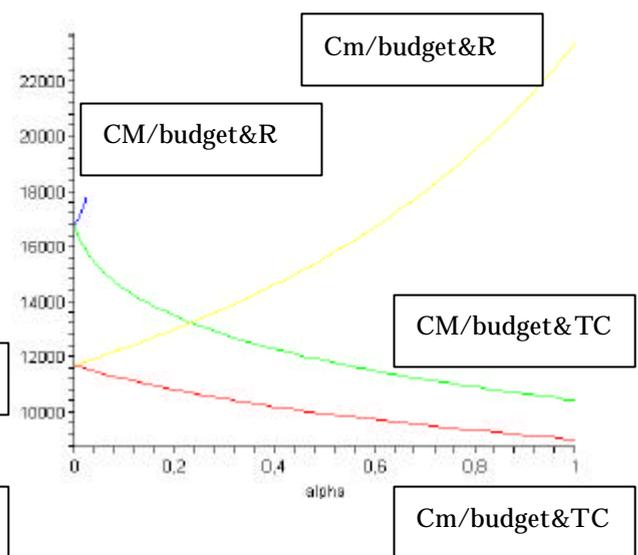


Figure 17 : Evolution du nombre d'automobilistes avec $K = 10000$

3.2.2.2. Diminution de la capacité de voirie⁸⁴

Le choix politique de réduction de l'espace routier urbain est un choix que l'on peut qualifier d'environnementaliste. En réduisant la capacité de voirie, les pouvoirs publics influent sur le comportement des automobilistes. Le nombre d'utilisateurs des transports collectifs augmente donc par rapport à la situation initiale (inversement le nombre d'automobiliste diminue). Cette option réduit donc les recettes perçues.

Avec la politique CM/budget&TC, la part des recettes affectées vers les transports collectifs est plus élevée $a^* = \frac{2dF}{c^2K} = 90\%$, puisque K a diminué. Cette situation optimale qui minimise le coût total distord fortement la demande de déplacement. Naturellement le coût total est donc supérieur dans tous les cas. Ceci s'explique également par le fait que la demande de déplacement globale est fixe et que la capacité de voirie diminue. Il y a moins de place pour les utilisateurs de l'automobile.

⁸⁴ Pour les graphiques des coûts totaux des cas à venir, se reporter à l'annexe 3.

| Politiques de tarification/politique d'affectation des recettes | Valeurs d' α | Na | Nb | Recettes | Coût Total |
|---|--------------------------------|--------------|--------|---------------|---------------|
| Cm/budget&TC | $\alpha^* = 0$ | 7 020 | 17 080 | 8 213 | 55 611 |
| | 1 | 6 018 | 18 082 | 6 037 | 55 778 |
| CM/ budget&TC | 0 | 8 444 | 15 656 | 11 883 | 55 948 |
| | $\alpha^* = 0,9$ | 7 020 | 17 080 | 8 213 | 55 611 |
| | 1 | 6 923 | 17 177 | 7 987 | 55 612 |
| Cm/ budget&R | $\alpha^* = 0$ | 7 020 | 17 080 | 8 213 | 55 611 |
| | 1 | 14 040 | 10 060 | 32 854 | 63 824 |
| CM/ budget&R | $\alpha^* = 0$ | 8 444 | 15 656 | 11 883 | 55 948 |
| | $\alpha \text{ seuil} = 0,814$ | 17 969 | 6 136 | 53 813 | 75 590 |
| | 1 | - | - | - | - |

Tableau 10 : Résultats avec $K = 6\ 000$

3.2.3. Evolution des coûts fixes

Il est également intéressant d'observer que l'augmentation ou la diminution des coûts fixes des transports collectifs influe sur la répartition modale. Dans les deux cas présentés ci-dessous, l'évolution de F n'influe pas sur la répartition modale et sur les recettes lorsque le prix du billet des transports collectifs est fixé au coût marginal. En effet, le coût fixe n'est pas pris en considération dans le calcul des coûts de déplacement. Il intervient a posteriori en tant que subvention dans le calcul du coût total.

3.2.3.1. Augmentation des coûts fixes ($F = 10\ 000$)

Avec une hausse des coûts fixes, les pouvoirs publics développent le réseau des transports collectifs (amélioration du service, augmentation des fréquences...). Mais le prix du billet augmente également. De ce fait, cela influe sur le comportement des automobilistes. Le nombre d'utilisateurs des transports collectifs diminue donc par rapport à la situation initiale

(inversement le nombre d'automobilistes augmente). Cette option augmente donc les recettes perçues.

Avec la politique CM/budget&TC, la part des recettes affectées vers les transports collectifs est plus élevée $\alpha^* = \frac{2dF}{c^2K} = 90,2\%$, puisque F a augmenté. Cette situation optimale qui minimise le coût total distord fortement la demande de déplacement. Naturellement le coût total est donc supérieur dans tous les cas.

| Politiques de tarification/politique d'affectation des recettes | Valeurs d' α | Na | Nb | Recettes | Coût Total |
|---|--------------------------------|--------------|--------|---------------|---------------|
| Cm/budget&TC | $\alpha^* = 0$ | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 55 306 |
| | 1 | 7 680 | 16 420 | 7 283 | 55 704 |
| CM/ budget&TC | 0 | 13 189 | 10 911 | 21 475 | 57 007 |
| | $\alpha^* = 0,902$ | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 55 306 |
| | 1 | 9 295 | 14 805 | 10 666 | 55 310 |
| Cm/ budget&R | $\alpha^* = 0$ | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 55 306 |
| | 1 | 18 954 | 5 146 | 44 352 | 66 394 |
| CM/ budget&R | $\alpha^* = 0$ | 13 189 | 10 911 | 21 474 | 57 007 |
| | $\alpha \text{ seuil} = 0,216$ | 17 362 | 6 738 | 37 214 | 62 981 |
| | 1 | - | - | - | - |

Tableau 11 : Résultats avec $F = 10\ 000$

3.2.3.2. Diminution des coûts fixes ($F = 5\ 000$)

Avec une diminution des coûts fixes, les pouvoirs publics influent sur le comportement des usagers des transports collectifs. Le prix du billet diminuant, le nombre d'usagers des transports collectifs augmente donc par rapport à la situation initiale (inversement le nombre d'automobilistes diminue). Cette option réduit donc les recettes perçues.

Avec la politique CM/budget&TC, la part des recettes affectées vers les transports collectifs est plus faible $a^* = \frac{2dF}{c^2K} = 40,6\%$, puisque F a diminué. Cette situation optimale qui minimise le coût total ne distord pas beaucoup la demande de déplacement. De ce fait, le coût total est donc inférieur dans tous les cas.

| Politique de tarification/politique d'affectation des recettes | Valeurs d' α | Na | Nb | Recettes | Coût Total |
|--|---------------------------------|--------------|--------|---------------|---------------|
| Cm/budget&TC | $\alpha^* = 0$ | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 49 806 |
| | 1 | 7 680 | 16 420 | 7 283 | 52 204 |
| CM/ budget&TC | 0 | 10 853 | 13 247 | 14 541 | 50 040 |
| | $\alpha^* = 0,406$ | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 49 806 |
| | 1 | 8 394 | 15 706 | 8 699 | 49 951 |
| Cm/ budget&R | $\alpha^* = 0$ | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 49 806 |
| | 1 | 18 954 | 5 146 | 44 352 | 60 894 |
| CM/ budget&R | $\alpha^* = 0$ | 10 853 | 13 247 | 14 541 | 50 040 |
| | $\alpha_{\text{seuil}} = 0,626$ | 18 949 | 5 151 | 44 328 | 60 882 |
| | 1 | - | - | - | - |

Tableau 12 : Résultats avec $F = 5\,000$

Pour conclure cette section, nous reprenons les résultats avec α^* lorsque la tarification des transports collectifs est égale au coût moyen et que les recettes du péage sont orientées vers les transports collectifs et vers le budget général de la collectivité. Cette politique est celle qui d'après nos critères ad hoc rendrait plus acceptable le péage de congestion.

Pour rendre plus acceptable le péage, et selon les critères choisis, les pouvoirs publics peuvent agir sur les recettes, la répartition modale, le coût total et la part optimale des recettes attribuées aux transports collectifs en modifiant la capacité de voirie. Il est aussi intéressant d'observer ces évolutions avec des modifications des coûts d'infrastructure.

| | a^* | Na | Nb | Recettes | Coût total |
|--------------------|------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Cas général | 0,67 | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 52 736 |
| K=10 000 | 0,543 | 11 700 | 12 400 | 13 689 | 50 135 |
| K= 6 000 | 0,9 | 7 020 | 17 080 | 8 213 | 55 611 |
| F= 10 000 | 0,902 | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 55 306 |
| F = 5 000 | 0,406 | 9 477 | 14 623 | 11 088 | 49 806 |

Tableau 13 : Résultats avec le coût moyen à l'optimum

Dans le cadre de cette application numérique, on peut revenir sur quatre points :

- Une augmentation de la capacité de voirie (K) accroît le niveau des recettes et entraîne une augmentation du nombre d'automobilistes et une baisse du coût total.
- La diminution de la capacité de voirie permet d'avoir une forte part des recettes attribuées aux transports collectifs et de réduire le nombre d'automobilistes. Ceci entraîne un accroissement du coût total.
- L'augmentation des coûts fixes (F) entraîne une forte augmentation du coût total et n'influe pas sur les recettes et la répartition modale. Toutefois, la part des recettes affectées aux transports collectifs est très élevée.
- Une diminution des coûts fixes engendre une baisse du coût total, une répartition modale identique et une faible part des recettes attribuées au secteur des transports.

Section 4. L'équilibre bimodal avec la redistribution des recettes du péage

Les comparaisons effectuées dans la section 3 soulignent que l'affectation d'une part a optimale des recettes vers les transports collectifs et une part $(1-a)$ vers le budget, lorsque le prix du billet des transports en commun est fixé au coût moyen, rendrait plus acceptable la mise en place du péage. Mais cette solution n'est pas satisfaisante pour les automobilistes captifs qui se sentent exclus. Pour rendre plus acceptable le péage au regard des automobilistes, une alternative peut consister à orienter une part $(1-a)$ des recettes vers ces usagers-là. Dans cette section, nous allons présenter deux cas lorsqu'un péage de pointe est instauré sur la voirie : la tarification des transports en commun au coût marginal et la tarification des transports collectifs au coût moyen.

4.1. La tarification des TC au coût marginal

La situation initiale renvoie au cas présenté dans la section 2 du chapitre précédent.

4.1.1. Affectation des recettes vers deux programmes

Dans le cas que nous étudions ici, les autorités peuvent faire le choix d'orienter les recettes du péage vers les transports collectifs (part a , avec $a \in [0;1]$) ou vers les utilisateurs de la route (part $1-a$).

Ainsi, après redistribution des recettes du péage en $t+1$, les coûts individuels de déplacement s'écrivent :

$$C_a(t+1) = \frac{dN_a(t+1)}{K} - (1-a) \frac{\text{Recettes}(t)}{N_a(t+1)} = \frac{dN_a(t+1)}{K} - \frac{(1-a)dN_a^2(t)}{2KN_a(t+1)}$$

$$C_b(t+1) = c - \frac{a \times \text{recettes}(t)}{N_b(t+1)} = c - \frac{adN_a^2(t)}{2K(N - N_a(t+1))}$$

Le coût de déplacement des automobilistes est diminué d'une part $(1-a)$. Le prix du billet des transports collectifs (initialement fixé au coût marginal) se réduit d'une part a des recettes.

A l'équilibre, dans les zones où la stabilité est assurée, la répartition modale s'écrit

$$\text{(avec un niveau de ville seuil : } N_s^{TCR} = \frac{cK(1-a + \sqrt{1-4a+a^2})}{4ad} \text{)} :$$

$$(N_a^{TCR}, N_b^{TCR}) = \left(\begin{array}{l} \frac{dN(1-a) - 2cK + \sqrt{(2cK - dN)^2 + daN(4cK + 2dN + daN)}}{2d}, \\ N - \frac{dN(1-a) - 2cK + \sqrt{(2cK - dN)^2 + daN(4cK + 2dN + daN)}}{2d} \end{array} \right)$$

Après avoir étudié les fonctions N_a et N_b ($\frac{\partial N_a^{TCR}}{\partial a} < 0$ et $\frac{\partial^2 N_a^{TCR}}{\partial^2 a} > 0$ et $\frac{\partial N_b^{TCR}}{\partial a} > 0$ et $\frac{\partial^2 N_b^{TCR}}{\partial^2 a} < 0$), on peut les déterminer graphiquement en fonction de a :

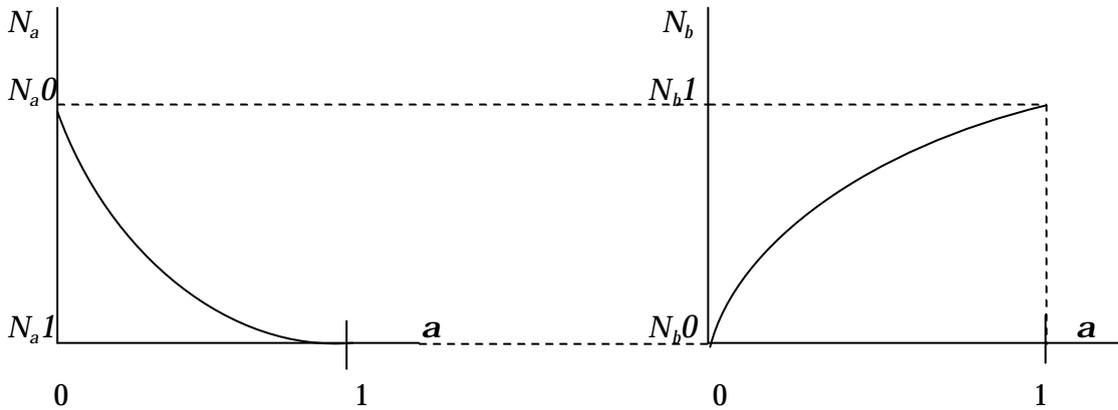


Figure 18 : La répartition modale en fonction de a

Nous pouvons également calculer les solutions extrêmes. Lorsque $a = 1$, on retrouve les résultats de la section 2 du chapitre III avec l'intégralité des recettes orientées vers les transports collectifs. Dans le cas contraire ($a = 0$), l'intégralité des recettes est orientée vers les routes. La situation est ainsi assimilable à la situation extrême de la section 2.

• $a = 1 \rightarrow$

$$(N_a^{TCR}, N_b^{TCR}) = \left(N + \frac{cK}{d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2}{d^2}}, -\frac{cK}{d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2}{d^2}} \right)$$

• $a = 0 \rightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} (N_a^{TCR}, N_b^{TCR}) = \left(\frac{2cK}{d}, N - \frac{2cK}{d} \right) \quad \text{si } N > N_s^{r1} = \frac{2cK}{d} \\ (N_a^{TCR}, N_b^{TCR}) = (N, 0) \quad \text{si } N \leq N_s^{r1} = \frac{2cK}{d} \end{array} \right.$$

Le calcul des recettes à l'équilibre se fait de la même façon que précédemment. On obtient ainsi :

$$R_m^{TCR} = \frac{\left(dN(1+a) + 2cK - \sqrt{(2cK - dN)^2 + daN(4cK + 2dN + daN)} \right)^2}{8dK}$$

Logiquement, plus a est grand et plus le nombre d'usagers des transports collectifs est élevé, réduisant ainsi le nombre d'automobilistes et donc le poids des recettes. Ainsi, sur l'intervalle $a \in [0;1]$, on a $\frac{\partial R_m^r}{\partial a} < 0$ et $\frac{\partial^2 R_m^r}{\partial^2 a} > 0$:

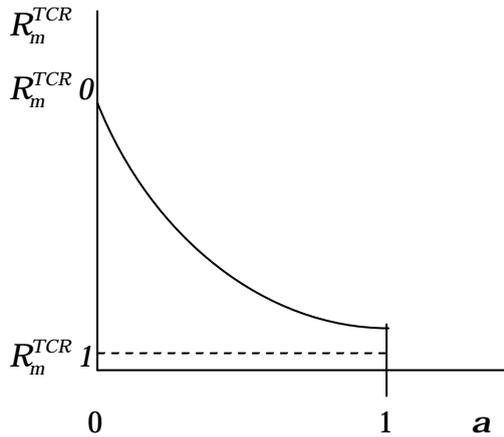


Figure 19 : Les recettes du péage en fonction de a

De la même façon qu'avec la répartition modale, il existe deux solutions extrêmes. Avec $a = 1$, on retrouve les résultats de la section 2 quand l'intégralité des recettes est orientée vers les transports collectifs. Et avec $a = 0$, l'intégralité des recettes est orientée vers les automobilistes.

- $a = 1 \rightarrow$

$$R_m^{TCR} 1 = \frac{\left(dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2} \right)^2}{2dK}$$

- $a = 0 \rightarrow$

$$R_m^{TCR} 0 = \frac{2c^2K}{d}$$

4.1.2. Calcul du coût total et du a optimal (a^*)

Nous allons déterminer le coût total quelque soit a , puis nous rechercherons le a optimal permettant de minimiser ce coût total. Ainsi cet a optimal, nous amènera à poser les valeurs optimales de la répartition modale et des recettes.

Avant de calculer le nouveau coût total, on calcule C_a et C_b à l'équilibre après redistribution des recettes du péage et lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre :

$$C_a^{TCR} = C_b^{TCR} = \frac{(1+a)(dN(1+a) + 2cK - \sqrt{(2cK - dN)^2 + daN(4cK + 2dN + daN)})}{4K}$$

A l'équilibre, le coût total s'écrit donc :

$$CT_m^{TCR} = \frac{N(1+a)(dN(1+a) + 2cK - \sqrt{(2cK - dN)^2 + daN(4cK + 2dN + daN)})}{4K} + F$$

Avec les deux solutions extrêmes :

• $a=1 \rightarrow$

$$CT_m^{TCR} 1 = cN + F + \frac{dN^2}{K} - \frac{N}{K} \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2} \text{ si } N > N_s^{f2}$$

• $a=0 \rightarrow$

$$CT_m^{TCR} 0 = cN + F$$

Maintenant, on détermine le a optimal qui minimise le coût total à partir de la dérivée du coût total. On obtient, $a^* = 1 - \frac{cK}{dN} > 0$ car $dN > cK$. Le niveau optimal du revenu distribué pour les usagers des transports collectifs dépend de la valeur des coûts d'horaires pour les automobilistes (coûts d'avance ou coûts de retard), de la capacité de la route, du coût marginal de l'utilisation des transports collectifs et de la taille N de la population. La valeur du niveau optimal de la répartition des recettes augmente avec la valeur des coûts d'horaire, avec le niveau de la population et diminue avec la capacité de la route et avec le coût marginal des transports collectifs. Ainsi une augmentation de la capacité de voirie va naturellement entraîner une diminution de la part des recettes affectées vers les transports collectifs.

Les valeurs optimales avec a^* sont donc celles déterminées ci-dessous (les résultats sont identiques à ceux avant redistribution).

La répartition modale optimale :

$$\begin{cases} (N_a^{r*}, N_b^{r*}) = \left(\frac{cK}{d}, N - \frac{cK}{d} \right) & \text{si } N > N_s^{r0} \\ (N_a^{r*}, N_b^{r*}) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^{r0} \end{cases}$$

Les recettes optimales:

$$R_m^{r*} = \frac{c^2K}{2d}$$

Le coût total optimal :

$$CT_m^{r*} = cN + F - \frac{c^2K}{2d} \quad \text{si } N > N_s^{r0}$$

4.1.3. Interprétation partielle des résultats

Ce résultat peut être clarifié avec des relations relativement simples et intuitives. On remarque que les effets indirects de a sur les coûts de permutation - d'un mode à l'autre - modifient le coût total. Dans ce cas, quand les coûts d'horaires augmentent pour les automobilistes, la part de C_a dans le coût total augmente. De la même manière, dans le cadre où l'on considère le prix du billet égal au coût marginal, l'élévation de la taille N de la population induit une augmentation de C_a par rapport à C_b . Ici, la part optimale du revenu alloué aux usagers des transports collectifs augmentera afin de permettre la réduction de C_a . Au contraire, l'augmentation de la capacité K de la voirie ou celle du coût marginal c nécessite une hausse relative de C_b par rapport à C_a .

4.2. La tarification des transports collectifs au coût moyen

De la même façon que lors du paragraphe précédent (4.1.), nous reprenons la situation initiale avant redistribution des recettes du péage, dans le cas où le prix du billet des transports collectifs est fixé au coût moyen et lorsque le péage est un péage de pointe.

4.2.1. L'affectation des recettes du péage vers deux programmes

De la même façon que précédemment, les autorités peuvent faire le choix d'orienter les recettes du péage soit vers les transports collectifs (part a), soit vers le réseau routier (part $1-a$).

Ainsi, après redistribution des recettes du péage les coûts individuels de déplacement s'écrivent :

$$C_a(t+1) = \frac{dN_a(t+1)}{K} - (1-a) \frac{Recettes(t)}{N_a(t+1)} = \frac{dN_a(t+1)}{K} - \frac{(1-a)dN_a^2(t)}{2KN_a(t+1)}$$

$$C_b(t+1) = c + \frac{F}{N_b(t+1)} - \frac{a \times recettes(t)}{N_b(t+1)} = c + \frac{F}{N_b(t+1)} - \frac{adN_a^2(t)}{2K(N-N_a(t+1))}$$

Le prix du billet des transports collectifs (initialement fixé au coût moyen) devient réduit de la part a des recettes et le coût de déplacement en voiture est réduit d'une part $(1-a)$.

A l'équilibre, dans les zones où la solution est stable, la répartition modale devient (avec un niveau de ville seuil : $N_s^{TCR} = \frac{2cK(1-a) + 2\sqrt{2dFK(a^2 + 2a + 1) - 4ac^2K^2}}{(a^2 + 2a + 1)d}$) :

$$(N_a^{TCR}, N_b^{TCR}) = \left(\begin{array}{l} \frac{dN(1-a) - 2cK + \sqrt{(2cK - dN)^2 + daN(4cK + 2dN + daN) - 8dKF}}{2d}, \\ N - \frac{dN(1-a) - 2cK + \sqrt{(2cK - dN)^2 + daN(4cK + 2dN + daN) - 8dKF}}{2d} \end{array} \right)$$

Ceci nous permet de calculer les solutions extrêmes. Lorsque $a = 1$, on retrouve les résultats de la section 3 du chapitre III avec l'intégralité des recettes orientée vers les transports collectifs. Dans le cas contraire ($a = 0$), l'intégralité des recettes est orientée vers les automobilistes. La situation est la même que celle évoquée dans la section 2.

• $a=1 \rightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} (N_a^{TCR}, N_b^{TCR}) = \left(N + \frac{cK}{d} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}{d^2}}, \right. \\ \left. -\frac{cK}{d} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}{d^2}} \right) \quad \text{si } N > N_s^{r1} = N_s^{f2} \\ (N_a^{TCR}, N_b^{TCR}) = (N, 0) \quad \text{si } N \leq N_s^r = N_s^{f2} \end{array} \right.$$

• $a=0 \rightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} (N_a^{TCR}, N_b^{TCR}) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \frac{\sqrt{(2cK - dN)^2 - 8dFK}}{2d}, \right. \\ \left. N - \frac{N}{2} + \frac{cK}{2d} - \frac{\sqrt{(2cK - dN)^2 - 8dFK}}{2d} \right) \quad \text{si } N > N_s^r \\ (N_a^{TCR}, N_b^{TCR}) = (N, 0) \quad \text{si } N \leq N_s^{r1} \end{array} \right.$$

Le calcul des recettes à l'équilibre se fait de la même façon que précédemment. On obtient ainsi :

$$R_M^{TCR} = \frac{\left(dN(1+a) + 2cK - \sqrt{(2cK - dN)^2 + daN(4cK + 2dN + daN) - 8dFK} \right)^2}{8dK}$$

Logiquement, plus a est grand et plus le nombre d'usagers des transports collectifs est élevé, réduisant ainsi le nombre d'automobilistes et donc le poids des recettes.

Comme avec la répartition modale, il existe deux solutions extrêmes. Avec $a = 1$, on retrouve les résultats du chapitre précédent quand l'intégralité des recettes est orientée vers les transports collectifs. Et avec $a = 0$, l'intégralité des recettes est orientée vers les automobilistes.

- $a = 1 \rightarrow$

$$R_M^{TCR 1} = \frac{\left(dN + cK - \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK} \right)^2}{2dK}$$

- $a = 0 \rightarrow$

$$R_M^{TCR 0} = \frac{\left(dN + 2cK - \sqrt{(2cK - dN)^2 - 8dFK} \right)^2}{8dK}$$

4.2.2. Calcul du coût total et du a optimal (a^*)

Comme avec la tarification au coût marginal, avant de calculer le nouveau coût total, nous calculons C_a et C_b à l'équilibre après redistribution des recettes du péage et lorsque la solution converge vers une répartition modale d'équilibre :

$$C_a^{TCR} = C_b^{TCR} = \frac{(1+a) \left(dN(1+a) + 2cK - \sqrt{(2cK - dN)^2 + daN(4cK + 2dN + daN) - 8dFK} \right)}{4K}$$

A l'équilibre, le coût total s'écrit donc :

$$C_M^{TCR} = \frac{N(1+a) \left(dN(1+a) + 2cK - \sqrt{(2cK - dN)^2 + daN(4cK + 2dN + daN) - 8dFK} \right)}{4K}$$

Avec les deux solutions extrêmes :

- $a=1 \rightarrow$

$$CT_M^{TCR} 1 = cN + \frac{dN^2}{K} - \frac{N}{K} \sqrt{c^2K^2 + d^2N^2 - 2dFK}$$

- $a=0 \rightarrow$

$$CT_M^{TCR} 0 = \frac{N(2c^2K - 2dF - cdN - c\sqrt{(2cK - dN)^2 - 8dFK})}{(-dN + 2cK - \sqrt{(2cK - dN)^2 - 8dFK})}$$

Il existe une valeur de a pour laquelle la dérivée du coût total est nulle. Ce a^* correspond au minimum de la fonction CST_M^{TCR} puisque sur cet intervalle, elle est convexe. Le a optimal qui minimise le coût total et qui se calcule à partir de la dérivée

$$\text{du coût total, est } a^* = \begin{cases} 1 + \frac{2dF - c^2K}{cdN} & \text{si } F < \frac{c^2K}{2d} \\ 1 & \text{si } F \geq \frac{c^2K}{2d} \end{cases} > 0.$$

Les valeurs optimales avec a^* sont donc celles déterminées ci-dessous (les résultats sont identiques à ceux avant redistribution lorsque le prix du billet des transports en commun est fixé au coût marginal).

La répartition modale optimale :

$$\begin{cases} (N_a^*, N_b^*) = \left(\frac{cK}{d}, N - \frac{cK}{d} \right) & \text{si } N > N_s^r \\ (N_a^*, N_b^*) = (N, 0) & \text{si } N \leq N_s^r \end{cases}$$

Les recettes optimales :

$$R_M^{TCR*} = \frac{c^2K}{2d}$$

Le coût total optimal :

$$CT_M^{TCR*} = cN + F - \frac{c^2K}{2d}$$

4.2.3. Interprétation partielle des résultats

Le niveau optimal du revenu distribué pour les usagers des transports collectifs dépend de la valeur des coûts d'horaires pour les automobilistes (coûts d'avance ou coûts de retard), de la capacité de la route, du coût marginal de l'utilisation des transports collectifs, du coût fixe des infrastructures et de la taille N de la population. La valeur du niveau optimal de la répartition des recettes augmente avec le niveau des coûts fixes. Elle

diminue avec le niveau de la population, avec la capacité de la route et avec le coût marginal des transports collectifs.

4.3. Comparaison des résultats avec la situation optimale précédente

Cette section nous a permis de mettre en relief un autre cas de redistribution des recettes du péage. Si l'on considère que le péage est mieux accepté lorsque les recettes sont affectées vers le secteur des transports, il semble pertinent d'envisager une modélisation où les recettes sont réparties entre les automobilistes et les utilisateurs des transports en commun. Comme le montrent de nombreuses études déjà citées (PRIMA, 2004 ; M. REYMOND, 2004a...), les automobilistes sont fortement opposés au péage et notamment lorsque les recettes ne leur sont pas réaffectées. Nous avons déjà évoqué qu'une redistribution totale des recettes vers les routes rendrait inefficace l'aspect désincitatif du péage. Toutefois, une orientation partielle des recettes vers les usagers-payeurs (avec une autre part vers le réseau des transports collectifs) rendrait nécessairement le péage plus acceptable.

Si l'on compare les situations optimales dans les trois cas de figures (redistribution des recettes vers le budget et les TC quand le prix du billet est fixé au coût moyen - $MTCB$, redistribution des recettes vers la route et les TC quand le prix du billet est fixé au coût marginal - $mTCR$ - et quand il est fixé au coût moyen - $MTCR$), on met en avant le fait que les résultats sont les mêmes (répartition modale, niveau des recettes et coût total). Ils correspondent à la situation avant redistribution lorsque le prix du billet est fixé au coût marginal. Au regard de ces trois options, le décideur politique peut choisir entre la situation $mTCR$ et la situation $MTCR$, toutes deux permettant d'avoir un niveau d'acceptabilité plus élevé chez les automobilistes. La différence entre les deux options viendra du fait que $a^{MTCR*} > a^{mTCR*} \Rightarrow 1 + \frac{2dF - c^2K}{cdN} > 1 - \frac{cK}{dN}$.

Conclusion

Avec une politique de tarification des transports collectifs au coût moyen, solution plus viable d'un point de vue de l'efficacité économique et sur un plan purement comptable, il importe de comparer le cas où les recettes sont affectées vers les transports collectifs et le budget, et celui où elles sont orientées vers la route et le budget.

Le coût total dans le premier cas est plus faible quelque soit la valeur de a . Ici, le décideur peut choisir entre deux politiques : l'une répondant à la célèbre injonction de Georges Pompidou : « *Il faut adapter la ville à l'automobile* », et l'autre à la pensée qui prédomine actuellement, à savoir se réapproprier l'espace urbain et au contraire, adapter la voiture à la ville.

Avec une affectation des recettes vers la route et le budget, le nombre d'automobilistes va nécessairement augmenter surtout lorsque les coûts fixes des transports collectifs augmentent, ou lorsque la capacité de la voirie augmente.

Si les recettes sont orientées vers les transports collectifs et le budget, le nombre d'automobilistes va décroître. Une augmentation des coûts fixes, ou une diminution de la capacité de voirie va générer un a optimal, permettant d'accroître la part des recettes attribuées aux transports collectifs. Ainsi, plus le a sera grand, plus la part des recettes affectées aux transports collectifs sera élevée, rendant ainsi plus acceptable la mise en place d'un péage de congestion.

Enfin, dans la section 4, nous avons présenté une situation "idéale" de redistribution des recettes du péage. Dans ce cas, les recettes sont affectées vers les transports collectifs et vers la route. Cette orientation partielle des recettes vers les usagers-payeurs (avec une autre part vers le réseau des transports collectifs) rendrait logiquement le péage plus acceptable.

ANNEXES DU CHAPITRE IV

Annexe 1: Calcul de la stabilité quand les recettes sont orientées vers les transports collectifs et vers le budget (la méthode est la même que dans le chapitre III)

a. Au coût marginal

Suite à l'égalisation des coûts de déplacement en $t+1$, on en déduit N_{bt+1} par rapport à N_{bt} :

$$N_{b_{t+1}} = f(N_{b_t})$$

$$= \frac{dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 2cKdN + d^2N^2 - 4ad^2NN_{b_t} + 2ad^2N_{b_t}^2 + 2ad^2N^2}}{2d}$$

On pose $x_{t+1} = f(x_t)$

$$\text{avec } f(x) = \frac{dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 2cKdN + d^2N^2 - 4ad^2Nx + 2ad^2x^2 + 2ad^2N^2}}{2d}$$

Le domaine de définition de la fonction est défini si la racine carré est supérieure ou égale à 0 et si d est différent de 0.

$$A(x) = c^2K^2 - 2cKdN + d^2N^2 - 4ad^2Nx + 2ad^2x^2 + 2ad^2N^2$$

Donc,

$$\Rightarrow (cK - dN)^2 + 2ad^2(N - x)^2 > 0$$

Ainsi f est définie sur $N_b = x \in [0, N]$ et $N > \frac{cK}{d}$

Pour que la stabilité soit globale, démontrons que la dérivée de $f(x)$ est inférieure ou égale à 0 :

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{da(x - N)}{\sqrt{A(x)}} \leq 0$$

Montrons que $\left| \frac{df}{dx} \right| < 1$:

$$da(N - x) < \sqrt{c^2K^2 - 2cKdN + d^2N^2 - 4ad^2Nx + 2ad^2x^2 + 2ad^2N^2}$$

$$\Leftrightarrow d^2a^2(N - x)^2 - (cK - dN)^2 - 2ad^2(N - x)^2 < 0$$

Ainsi $\left| \frac{df}{dx} \right| < 1$ est toujours vrai donc la stabilité est globale.

b. Au coût moyen

Suite à l'égalisation des coûts de déplacement en $t+1$, on en déduit N_{bt+1} par rapport à N_{bt} :

$$f(N_{b_t}) = \frac{dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 2cKdN + d^2N^2 + 2ad^2N^2 - 4d^2aN_{b_t} + 2d^2aN_{b_t}^2 - 4dFK}}{2d}$$

De la même façon que pour la stabilité avec le prix du billet fixé au coût marginal, on pose :

$$x_{t+1} = f(x_t)$$

$$\text{avec } f(x_t) = \frac{dN - cK + \sqrt{c^2K^2 - 2cKdN + d^2N^2 + 2ad^2N^2 - 4d^2aNx + 2d^2ax^2 - 4dFK}}{2d}$$

$$\Leftrightarrow f(x_t) = \frac{N}{2} - \frac{cK}{2d} + \frac{\sqrt{A(x)}}{2d}$$

$$\text{avec } A(x) = c^2K^2 - 2cKdN + d^2N^2 + 2ad^2N^2 - 4d^2aNx + 2d^2ax^2 - 4dFK$$

$$\Leftrightarrow A(x) > 0$$

La racine est donc positive.

Pour que la stabilité soit globale, démontrons que la dérivée de $f(x)$ est inférieure

à 1 :

$$f'(x) = -\frac{da(N-x)}{\sqrt{A}} \leq 0 \text{ car } N > x$$

Donc $f'(x) \leq 1$ et la stabilité globale est bien vérifiée.

Annexe 2 : Calcul de la stabilité quand les recettes sont orientées vers les routes et vers le budget

a. Au coût marginal

On pose $x_{t+1} = f(x_t)$ et $N_{a_{t+1}} = f(N_{a_t})$

$$\text{avec } f(x_t) = \frac{cK + \sqrt{c^2K^2 + 2ad^2x^2}}{2d}$$

Le domaine de définition de la fonction est défini si la racine carré est supérieure ou égale à 0.

$$\text{Donc, } A(x) = c^2K^2 + 2ad^2x^2$$

Ainsi f est définie sur $N_a = x \in [0, N]$ et $N > \frac{cK}{d}$

Pour que la stabilité soit globale, démontrons que la dérivée de $f(x)$ est inférieure en valeur absolue à 1 ; $\left| \frac{df}{dx} \right| \leq 1$:

$$\frac{da x}{\sqrt{c^2K^2 + 2ad^2x^2}} \leq 1$$

Ainsi $\left| \frac{df}{dx} \right| \leq 1$ est toujours vrai donc la stabilité est globale.

b. Au coût moyen

De la même façon que pour la stabilité avec le prix du billet fixé au coût marginal, on pose :

$$x_{t+1} = f(x_t) \text{ et } N_{a_{t+1}} = f(N_{a_t})$$

On égalise les coûts de déplacement : $C_a = C_b$

$$\frac{dN_{a_{t+1}}}{K} - \frac{adN_{a_t}^2}{2KN_{a_{t+1}}} = c + \frac{F}{N - N_{a_{t+1}}}$$

$$\Leftrightarrow 2dN_{a_{t+1}}^3 + (2cK - 2dN)N_{a_{t+1}}^2 + (2cKN - 2FK + adN_{a_t}^2)N_{a_{t+1}} + adNN_{a_t}^2$$

Pour que la stabilité soit globale, il faudrait résoudre cette équation du 3^{ème} degré et démontrer que la dérivée de $f(x)$ est inférieure à 1. Or, cette fonction est très complexe à résoudre. D'après nos calculs, si cette fonction connaît des discontinuités, on peut montrer que pour certaines zones, on a $\left| \frac{df}{dx} \right| \leq 1$.

Annexe 3 : Analyse numérique : évolution des coûts totaux dans les différents cas

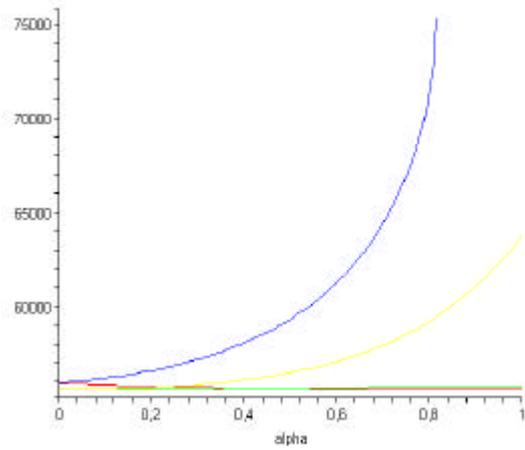


Figure 20 : Evolution des coûts totaux quand $K = 6\ 000$

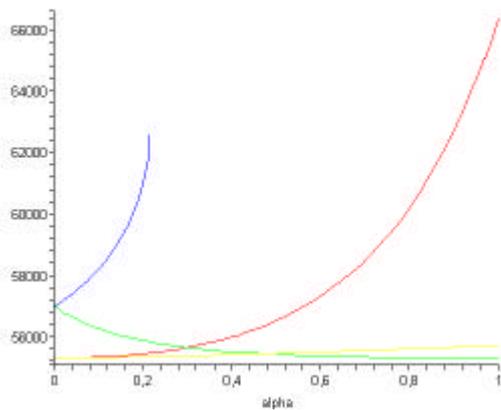


Figure 21 : Evolution des coûts totaux quand $F = 10\ 000$

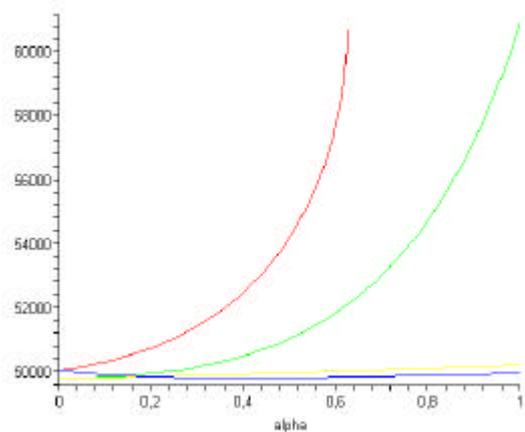


Figure 22 : Evolution des coûts totaux quand $F = 5\ 000$

BIBLIOGRAPHIE DE LA PARTIE II

ARNOTT R., A. DE PALMA et R. LINDSEY, 1990a : "Economics of a bottleneck", *Journal of Urban Economics*, n° 27, pp. 111-130.

ARNOTT R., A. DE PALMA et R. LINDSEY, 1993 : "A structural model of peak-period congestion: a traffic bottleneck with elastic demand", *American Economic Review*, 83, pp. 161-179.

C.E.M.T., 1994 : "Internaliser les coûts sociaux des transports", O.C.D.E. Paris.

C.E.R.T.U., 2001 : "Tarification des déplacements urbains : la question de l'acceptabilité", Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Lyon.

DAGANZO C.F., 1995 : "A Pareto optimum congestion reduction scheme", *Transportation Research*, 29B, pp. 139-154.

DAGANZO C.F. et R.C GARCIA, 2000 : "A Pareto improving strategy for time-dependent morning commute problem", *Transportation Science*, vol. 34, n° 3, pp. 303-311.

DAGANZO C.F. et Y. SHEFFI, 1977 : "On stochastic models of traffic assignment", *Transportation Science*, 11, pp. 253-274.

DANIELIS R. et E. MARCUCCI, 1999 : "Bottleneck congestion and modal split revisited", working paper n° 1999-5, *Fondazione Eni Enrico Mattei*.

DANIELIS R. et E. MARCUCCI, 2002 : "Bottleneck road congestion pricing with a competing railroad service", *Transportation Research Part E*, n°38, pp. 379-388.

GLACHANT M. et BUREAU B., 2004 : *Economie des effets distributifs de la tarification de la circulation en zone urbaine*, Paris, ARMINES – CERNA, 122 p.

GOMEZ-IBANEZ J., 1992 : "The Political Economy of Highway Tolls and Congestion Pricing," *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 46, n° 3, pp. 343-360.

GOODWIN P. B., 1989 : "The 'Rule of Three' : a possible solution to the political problem of competing objectives for road pricing", *Traffic Engineering and Control*, 30 (10), October, 495-497.

HAU T., 1992 : "Economic Fundamentals of Road Pricing", Infrastructure and Urban development, World Bank, Washington DC.

- HUANG H.J., 2000 : "Fares and tolls in a competitive system with transit and highway : the case with two groups of commuters", *Transportation Research Part E*, n°36, pp. 267-284.
- LANGMYRH T., 1997 : "Managing equity. The case of road pricing", *Transport Policy*, vol. 4, n° 1, pp. 25-39.
- LITMAN T., 1999 : "Using Road Pricing Revenue: Economic Efficiency and Equity Considerations", Working paper, *Victoria Transport Policy Institute*, (www.vtpi.org).
- MIRABEL F., 1998 : "Péages urbains : « efficacité modale » versus « efficacité temporelle »", MIMEO C.R.E.D.E.N..
- MIRABEL F., 2005 : "Les péages urbains pour une meilleure organisation des déplacements", *Cahier de Recherche C.R.E.D.E.N.* n°05-04-57.
- PARRY I. et A. BENTO, 2001 : "Revenue Recycling and the Welfare Effects of Road Pricing" *Scandinavian Journal of Economics*, n°103, pp. 645-671.
- PATS, 2000 : PATS Project, Socio-Economic Principles for Price Acceptability, Deliverable D2, European Commission DG VII.
- PIGOU A., 1920 : "Economics of welfare", 4th edition, Macmillan, London, 1932.
- PRIMA, 2000 : "Surveys, Interviews and Media Analysis", European Commission.
- RAUX C. et S. SOUCHE, 2001a : "L'acceptabilité des changements tarifaires dans le secteur des transports : comment concilier efficacité et équité ?", *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, n°4, pp. 539-558
- RAUX C. et S. SOUCHE, 2001b : "Comment concilier efficacité et équité dans la politique tarifaire des transports ? Le cas de TEO à Lyon", *les Cahiers Scientifiques du Transport*, n° 40, pp. 27-52.
- REYMOND M., 2003a : "De la congestion au péage urbain : entre régulation et gain de temps", *Transports*, n°417, pp. 31-42.
- REYMOND M., 2004a : "Les politiques d'accompagnement du péage urbain : étude sur l'acceptabilité en Suisse", *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, octobre 2004, n°4/2004, pp. 609-630.
- SMALL K., 1992 : "Using the revenues from congestion pricing", *Transportation*, 19 (4), pp. 359-381.

SOUCHE S., 2003 : "Péage urbain et équité: une revue de la littérature", *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°43, pp. 119-146.

TABUCHI T., 1993 : "Bottleneck congestion and modal split", *Journal of Urban Economics*, n° 34, pp. 414-431.

VICKREY W., 1963 : "Pricing in urban and suburban transport", *American Economic Review: Papers and Proceedings*, 53 (2), pp. 452-465.

VICKREY W.S., 1969 : "Congestion theory and transport investment", *American Economic Review (Papers and Proceedings)*, n° 59, pp. 251-260.

VIEGAS J.M. et R. MACARIO, 2001 : "Acceptabilité des prix dans les systèmes de transport", *les Cahiers Scientifiques du Transport*, n° 40, pp. 9-26.

WARDROP J., 1952 : "Some theoretical aspects of road traffic research", *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, n°1(II), pp. 325-378.

PARTIE III

L'ACCEPTABILITE DU PEAGE DE CONGESTION : EXPERIENCES ET ENQUETES

CHAPITRE V

LES EXPERIENCES DE PEAGE DE CONGESTION DANS LE MONDE

CHAPITRE V. LES EXPERIENCES DE PEAGE DE CONGESTION DANS LE MONDE

Introduction

Les chapitres II, III et IV ont permis de présenter des modèles théoriques de la tarification de la congestion. Or, la mise en place d'un péage s'inscrit dans un long processus, dont l'étape la plus difficile n'est certainement pas la préparation du projet, mais plutôt sa mise en œuvre concrète. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs, dont l'acceptabilité collective – déjà évoquée tout au long de la thèse – n'en est qu'un. La réalisation technique, la rentabilité économique, les contraintes juridiques sont également des éléments à prendre en considération par les autorités politiques.

L'analyse des expériences anciennes et récentes montre les atouts et inconvénients des différents péages de congestion mis en place. A ce sujet, le tableau 1 expose de façon non exhaustive quelques exemples de tarification des déplacements dans le monde qui s'avèrent être des applications concrètes des types de péage énoncés dans les chapitres précédents.

Au cours de ce chapitre, nous allons rendre compte de plusieurs expériences significatives de tarification des déplacements automobiles. Ces quelques exemples *"ouvrent des perspectives et montrent le champ de possible en matière d'objectifs politiques, de solutions technologiques, de démarches de mise en œuvre"* (CERTU, 2001, p.76).

Nous avons choisi d'approfondir la présentation de quatre expériences singulières. Dans un premier temps, le péage de Singapour, dont la mise en fonctionnement remonte à 1975, et qui est présenté par les spécialistes d'aujourd'hui comme un pionnier en la matière. De par sa tarification variable, il renvoie aux modèles présentés dans le chapitre II. Dans une seconde section, nous reviendrons sur l'exemple récent de Londres, en insistant, dans la lignée des chapitres III et IV, sur les effets de la redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs. Puis, dans la continuité des modèles avec voirie alternative présentés dans le chapitre II, nous présenterons le cas des routes de première classe californiennes (avec Orange County et San Diego). Enfin, dans la dernière section, nous exposerons une forme de tarification éloignée des modèles déjà présentés : le cas de la RPLP en Suisse.

| VILLES | TYPES DE PEAGE | OBJECTIFS |
|---|---|--|
| Californie : San Diego (autoroute I.15) Orange Country (autoroute SR.91) | <u>Tarification de second rang</u> avec péage variable (voie alternative payante) et voie gratuite réservée au covoiturage (HOV) | Gain de temps pour les usagers pressés ; Incitation au covoiturage ; |
| Singapour | <u>Péage de cordon</u> électronique, variable dans le temps | Réduction de la congestion dans le centre des affaires |
| Norvège (Bergen, Oslo, Trondheim) | <u>Péage de cordon</u> (situé aux différents points d'entrée de la ville), variable suivant les cas. | Maximisation des recettes afin de permettre le financement de projets urbains (routes ou transports collectifs) |
| Suisse (poids lourds) | <u>Taxation kilométrique</u> : Redevance à la tonne - kilomètre pour les poids lourds (tarification généralisée sur l'ensemble du territoire) | Diminuer les externalités environnementales ; ralentir la croissance du transport routier ; affectation d'une part des recettes au développement des chemins de fer |
| Londres | <u>Péage de zone</u> électronique, avec un tarif journalier | Réduction du trafic dans la zone concernée ; Financement des transports collectifs |
| Lyon Trans Est-Ouest (1997) | <u>Route de première classe</u> avec péage uniforme (voie alternative payante) | Gain de temps pour les usagers pressés ; Maximisation des recettes privées |
| Prado-Carénage (Marseille) | <u>Route de première classe</u> avec péage uniforme (voie alternative payante) | Gain de temps pour les usagers pressés ; Maximisation des recettes privées |

Tableau 1 : Les différentes expériences de tarification de la congestion dans le monde

Section 1. Le péage de Singapour : un pionnier en matière de tarification de la congestion⁸⁵

Au milieu des années soixante-dix, les autorités de Singapour instaurent le premier véritable péage urbain de congestion dont le but était principalement de réduire la circulation dans une zone de la ville, le centre des affaires.

Avant de présenter et de commenter le péage de Singapour, un bref retour sur la situation géographique de la ville s'impose. Elle est localisée dans la république du même nom, constituée de l'île de Singapour et d'une soixantaine de petites îles adjacentes au Sud-Est de l'Asie. Le manque de place est l'un des problèmes majeurs qui se pose à l'Etat. Les plaines littorales ont été étendues en créant des polders grâce à de sérieux travaux de remblaiement. Ces surfaces gagnées sur la mer représentent actuellement près de 10 % du territoire. La population de Singapour (ville+état) est d'environ 4,3 millions d'habitants en 2005. Les caractères démographiques se rapprochent de ceux des nations les plus industrielles, avec un taux de fécondité bas (1,7 enfant par femme) mais une natalité encore assez élevée en raison de la jeunesse de la population (16 %).

A cause de l'étroitesse du territoire, la population est fortement concentrée et, pour la quasi totalité, urbaine. Avec une forte activité économique, un espace restreint et une population croissante, la demande de voirie à Singapour a fortement augmenté. Un effort a été fait parallèlement pour mettre fin à la congestion (de l'automobile et des habitations) de la ville de Singapour, en créant des unités d'habitations modernes plus dispersées sur le reste du territoire et en développant des politiques de limitation de l'usage de l'automobile. Nous allons donc étudier quelles sont ces mesures (1.1.) et quelles en ont été les conséquences sur le comportement des automobilistes (1.2.).

1.1. Les enjeux des transports et le péage de zone à Singapour

Afin de réduire de manière drastique la circulation dans la cité, les autorités ont décidé de développer deux politiques de transport en parallèle⁸⁶, à savoir une politique de

⁸⁵ Une version similaire de cette section a été publiée dans la revue *Transports*, sous le titre : "Tarification de la congestion : l'expérience réussie du péage de Singapour" (2004c).

⁸⁶ Nous nous intéresserons ici seulement aux politiques mises en place sur les automobiles (il existe aussi des restrictions sur tous les autres types de véhicules).

restriction de la demande et de l'usage de la voiture et une tarification des zones encombrées.

1.1.1. Les politiques de restriction de la voiture à Singapour

Une décision a été prise en 1990 pour limiter les ventes de voitures en créant un système de quota de véhicule (*Vehicle Quota System*) en fonction de leur cylindrée. De ce fait, le gouvernement décide indirectement du nombre de véhicules qui seront en circulation à moyen terme en attribuant un certain nombre de *permis de droit à posséder un véhicule* par un système d'enchères. Tous les mois, les demandeurs de permis font une offre aux autorités, puis celle-ci range l'ensemble des offres dans l'ordre décroissant et les instigateurs des offres les plus élevées se voient attribuer un *permis de droit* valable 10 ans (ECONOMIC AND SOCIAL COMMISSION FOR ASIA AND THE PACIFIC, 2001, pp. 112-113). Le tableau ci-dessous présente le nombre de permis demandés par rapport au quota attribué par le gouvernement en février 2004 :

| | Catégorie A : Voitures de 1600 cc et moins | Catégorie B : Voitures de 1601 cc et plus | Catégorie C : Bus, Poids lourds | Catégorie D : Motos |
|---|---|--|--|--------------------------------|
| Quota | 1 339 | 663 | 582 | 877 |
| Nombre d'offres | 2 405 | 1 342 | 864 | 408 |
| Valeur minimum acceptée | 31,003 S\$ | 33,657 S\$ | 12,582 S\$ | 1 S\$ |
| Pourcentage d'offres satisfaites | 55,68% | 49,4% | 67,36% | 214,95% |

Tableau 2 : Résultats de l'attribution des permis de droit à posséder en février 2004 (Source : Land Transport Authority Singapore, www.lta.gov.sg)

Les autorités limitent également l'utilisation des véhicules en développant fortement les taxes d'immatriculation, les taxes d'importation d'automobiles et en créant une taxe annuelle de l'usage des routes. Les automobilistes sont ainsi contraints de payer

à plusieurs reprises en plus de l'acquisition du véhicule⁸⁷. Le tableau ci-dessous expose les valeurs de ces taxes⁸⁸ :

| Cylindrée du véhicule (=x) | x < 601 cc | 601 < x < 1001 cc | 1001 < x < 1601 cc | 1601 < x < 3001 cc | x > 3001 cc |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Taxe d'importation | 20% de l'OMV | | | | |
| Immatriculation | 130% de l'OMV + 140 S\$ | | | | |
| Taxe annuelle des routes | 400 S\$ | 400 S\$ + 0,25*(x-600) | 500 S\$ + 0,75*(x-1000) | 950 S\$ + 1,5*(x-1600) | 3 050 S\$ + 2*(x-3000) |

Tableau 3 : Les mesures de restrictions sur les voitures à Singapour en février 2004 (Source : Land Transport Authority Singapore, www.lta.gov.sg)

En plus de ces taxes, assimilables à un impôt progressif, il existe une taxe de « surcharge de la voirie » pour les véhicules de plus de 10 ans, proportionnelle à l'âge de l'automobile. Cette mesure met en avant la volonté des autorités d'évincer les véhicules polluants du parc automobile.

1.1.2. Une tarification de cordon pour la fluidité de la circulation

1.1.2.1. De la vignette au péage électronique

Parallèlement à ces mesures restrictives sur l'utilisation de la voiture, les autorités ont instauré, dès septembre 1975, un péage urbain sur la zone du centre des affaires de Singapour. L'objectif était alors de décongestionner cette zone en y donnant un droit d'accès moyennant l'achat d'une vignette. Au début, le péage concernait seulement les usagers entrant dans la zone restreinte pendant la période de pointe du matin, les taxis

⁸⁷ Et naturellement, en plus des coûts traditionnels liés à l'usage d'un véhicule : carburant et taxe sur carburant, assurance de la voiture, usure et réparation de l'automobile.

⁸⁸ Avec 1 dollar de Singapour (S\$) = 0,53 euro en février 2003. Signalons également que l'OMV (Open Market Value) correspond à l'évaluation d'une valeur basée sur les coûts et sur les charges de vente et d'achat de voiture à Singapour.

et automobiles avec 4 passagers étant exemptés de péage. A partir de 1989, le péage s'est étendu dans le temps et dans l'espace, avec l'instauration d'un péage sur la période de pointe du soir (1989), puis sur des voies rapides de Singapour (1990) et enfin entre les périodes de pointe (1994). En 1989, il s'est aussi élargi à tous les véhicules (excepté les véhicules d'urgence et les bus publics).

En 1998, le péage a encore évolué et est devenu électronique et sans barrières. Les personnes souhaitant circuler dans les zones payantes doivent posséder un équipement embarqué (gratuit pour les voitures construites avant 1998 et d'une valeur de 140 S\$ - soit 74 euros - pour les véhicules plus récents) et acheter une carte à puce rechargeable que l'on insère dans celui-ci. Ce nouveau système présente de multiples avantages :

- une plus grande facilité de contrôle (le taux de fraude est quasi nul)⁸⁹ ;
- une plus grande flexibilité des tarifs ;
- la possibilité pour les autorités de faire évoluer la grille tarifaire tous les trois mois (ce qui était plus difficile avec la vignette) ;
- pas de perte de temps aux points d'entrée dans la zone.

L'objectif premier de cette tarification est toujours de décongestionner le centre des affaires et non de prélever des fonds pour la collectivité puisque les recettes ne correspondent plus maintenant qu'à 60% de celles réalisées avec l'ancien système (C.E.R.T.U., 2001, p.79). Précisons par ailleurs que les nouveaux tarifs appliqués ont diminué pour 95% des passages. De plus chaque entrée est payante alors que le système avec vignette donnait accès à toute la zone pour la journée.

Nous pouvons souligner les grandes différences entre les deux systèmes de tarification et comparer les dispositifs antérieurs et postérieurs à 1998 :

⁸⁹ Il existe toutefois une « fraude involontaire » due à l'oubli de la carte, ou à son insertion trop tardive. Sur ce point, les autorités essayent de faire des efforts de tolérance.

| | Avant 1998 | Depuis 1998 |
|--------------------------------------|--|--|
| <i>Zone d'application</i> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Le centre des affaires (avec 33 points d'entrée) et 3 voies rapides | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Idem (on compte en février 2003, 45 portiques électroniques) |
| <i>Tarifs (pour les automobiles)</i> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 S\$/jour ▪ 60 S\$/mois | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entre 0.5 et 2.5 S\$ par passage en février 2003 (voir <i>infra</i>) |
| <i>Horaires d'application</i> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 7h30-19h00 en semaine ▪ 7h30-14h00 le samedi ▪ gratuit le reste du temps | <ul style="list-style-type: none"> ▪ idem |
| <i>Technologie</i> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vignette apposée sur le pare brise | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipement embarqué avec carte prépayée |
| <i>Contrôle</i> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Visuel par les policiers, aux différents points d'entrée | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatique, avec des vidéos aux points d'entrée |

Tableau 4 : Comparaison des dispositifs de péage avant et après 1998 (Source : C.E.R.T.U., 2001, p.80)

1.1.2.2. Vers une tarification optimale

Afin d'assurer un temps de parcours constant pour les usagers et de conserver une vitesse comprise entre 20 et 30 km/h pour le centre des affaires (figure 1, plus bas) et entre 45 et 65 km/h pour les voies rapides à péage⁹⁰, le niveau du prix du péage augmente graduellement jusqu'à la période de pointe maximale et ensuite fléchit progressivement. Nous allons considérer la grille tarifaire de cette zone avant d'observer celle de l'une des voiries rapides.

Les grilles tarifaires font ressortir la variabilité de la tarification et la recherche de la part des autorités d'obtenir un péage de pointe proche de celui présenté dans les modèles de file d'attente par ARNOTT et al. (1993). Ici, le péage varie au cours du temps toutes les demi-heures avec une phase de transition de 5 minutes avant chaque

⁹⁰ Comme nous l'avons précisé dans le tableau 4, il existe également trois voiries à péage dans la cité asiatique qui ne sont payantes que pendant la période de pointe du matin.

changement de tarif. Des panneaux électroniques situés avant les portails indiquent la valeur du péage pour chaque type de véhicule⁹¹.

| | | | | | | | | | |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| SS 2,50 | | | | | | | | | |
| SS 2,00 | | | | | | | | | |
| SS 1,50 | | | | | | | | | |
| SS 1,00 | | | | | | | | | |
| SS 0,50 | | | | | | | | | |
| | 7h30-8h00 | 8h00-8h05 | 8h05-8h30 | 8h30-9h00 | 9h00-9h25 | 9h25-9h30 | 9h30-9h55 | 9h55-10h | 10h-12h |

Tableau 5a : Grille tarifaire de la pointe du matin au 1^{er} juillet 2005⁹² (source : http://www.onemotoring.com.sg/publish/onemotoring/en/traffic/erp_rates/pasenger.html)

| | | | | | | | |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| SS 2,00 | | | | | | | |
| SS 1,50 | | | | | | | |
| SS 1,00 | | | | | | | |
| SS 0,50 | | | | | | | |
| | 12h00-12h30 | 12h30-17h30 | 17h30-18h00 | 18h00-18h25 | 18h25-18h30 | 18h30-18h55 | 18h55-19h00 |

Tableau 5b : Grille tarifaire de la pointe du soir au 1^{er} juillet 2005 (source : id.)

| | | | | | | |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| SS 1,50 | | | | | | |
| SS 1,00 | | | | | | |
| SS 0,50 | | | | | | |
| | 7h30-8h00 | 8h00-8h30 | 8h30-8h35 | 8h35-9h00 | 9h00-9h25 | 9h25-9h30 |

Tableau 5c : Grille tarifaire de la pointe du matin au 1^{er} juillet 2005 (sur la voie rapide Central Expressway) (source : id.)

⁹¹ Le site Internet de Land Transport Authority donne toutes les informations nécessaires sur l'évolution des tarifs en fonction du portail utilisé (<http://www.lta.gov.sg/>).

⁹² La lecture des grilles tarifaires se fait de la manière suivante : un automobiliste qui rentre dans la zone à péage, pendant un certain créneau horaire, doit payer une somme correspondante au plus haut palier indiqué. Par exemple, entre 8h30 et 9h00, le tarif du péage est de 2,50 SS.

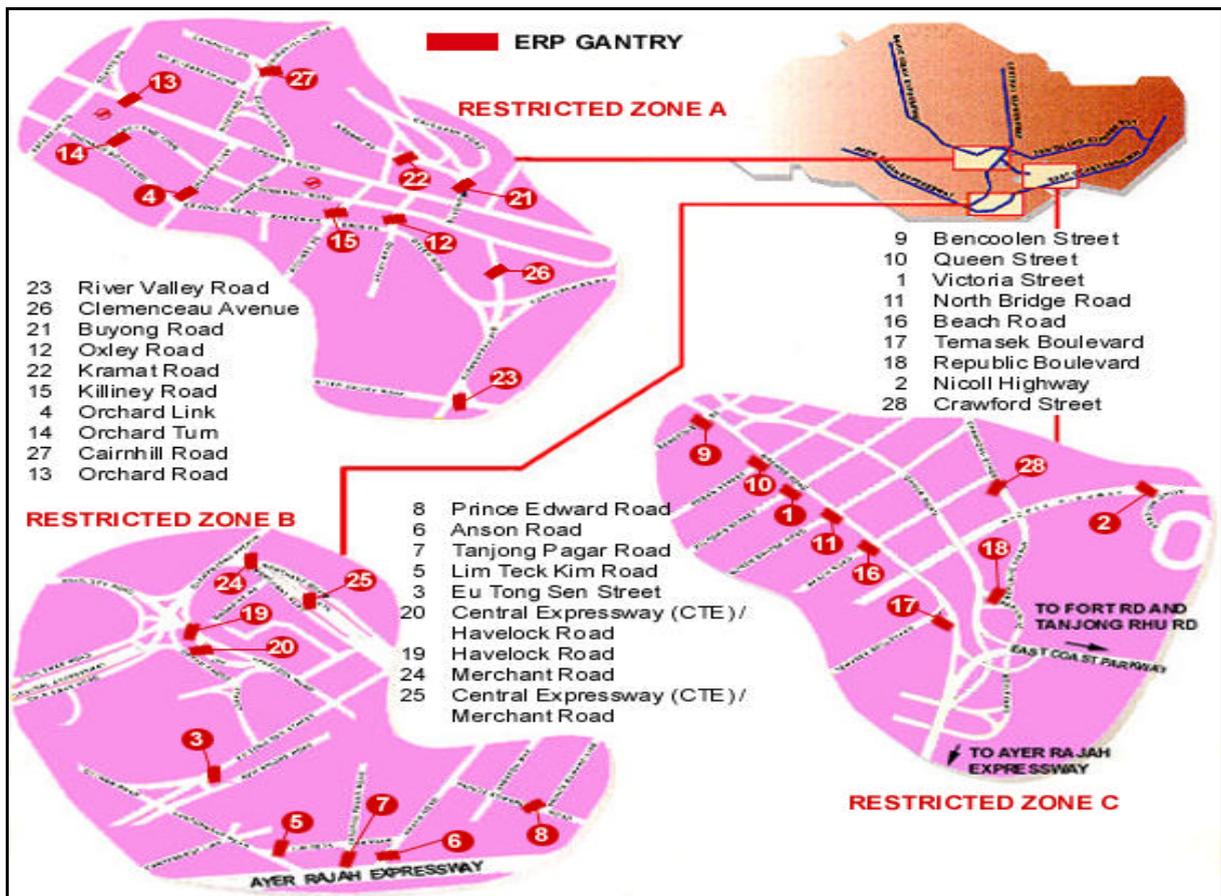


Figure 1 : Le centre des affaires de Singapour (<http://www.lta.gov.sg/>)

1.2. Effets du péage et acceptabilité

Le péage électronique a eu des effets positifs sur la congestion. En effet, le volume du trafic automobile dans le centre des affaires a diminué significativement pendant les périodes de pointe (8h00-9h00). Il y a un report de certains automobilistes vers les périodes moins coûteuses (7h30-8h00 et 9h00-9h30). Entre 1975 et 1991, la circulation a diminué de 45% dans la zone délimitée, et la vitesse moyenne aux heures de pointe a doublé en passant à 36 km/h. Puis, le trafic a encore diminué de 10 à 15% dans le centre des affaires depuis la mise en place du nouveau système. Ce changement de comportement correspond au fait que les automobilistes sont contraints de payer à chaque passage. Ainsi, ceux qui avaient l'habitude de faire de multiples déplacements, et donc de multiples entrées-sorties dans la zone à péage, ont significativement modifié l'usage de leur automobile.

Une des réussites de la tarification de Singapour est la centralisation de la gestion des politiques de transport. En effet le même organisme (Land Transport Authority) coordonne le management du péage urbain et celui des transports collectifs⁹³, avec pour objectif d'inciter les automobilistes à s'orienter vers d'autres moyens de déplacement. Le péage électronique est aussi très bien accepté par la majeure partie de la population⁹⁴ car le transport collectif est attrayant (bon marché, confortable et omniprésent) et l'idée même de la tarification de la congestion est comprise par les usagers. La visée de cette politique n'est pas le prélèvement de fonds mais l'application *stricto-sensu* du principe pigovien du *pollueur-payeur*. D'autre part, alors que le prix d'un abonnement annuel a diminué de 33%, les recettes du péage excèdent les coûts du réseau routier, ce qui permet d'accélérer le développement des transports publics.

La réussite de la mise en place du péage de Singapour nous permet de souligner qu'il est possible de se servir d'un instrument de la théorie économique dans le cadre d'une politique publique de grande ampleur. Et cette application peut être une réussite tant sur le plan de l'efficacité, avec une réduction significative de la congestion et un fort transfert modal vers les transports collectifs, que de l'acceptabilité (M. REYMOND, 2003b). Il convient de préciser que le régime politique de Singapour est démocratique mais que le contrôle social sur la population, très rigoureux, revêt un aspect autoritaire, qui limite les possibilités de l'opposition. De plus, les contraintes imposées aux automobilistes de Singapour dépendent aussi d'une situation particulière d'ordre géographique et culturel.

⁹³ Outre les bus de ville, il existe depuis 1987 un métro, le « Mass Rapid Transit System », transportant plus de 800 000 personnes par jour.

⁹⁴ Hormis les employeurs du centre des affaires qui encourent un coût supplémentaire en finançant les paiements de péage de leurs salariés. Certaines personnes se sont également plaintes de devoir payer à chaque entrée de la zone (à la différence de l'ancien système où les automobilistes ne payaient qu'une seule fois pour la journée).

Section 2. La "congestion charge" de Londres

Quelques années après la mise en place du péage de Singapour, Londres et son maire, Ken Livingstone, ont été séduits par l'expérience. Le succès politique du péage introduit le 17 février 2003 s'inscrit dans une logique que nous allons exposer ici. Face à une mobilité croissante et un accroissement des externalités, les autorités londoniennes se devaient de réagir et de mettre en place un instrument de régulation de l'automobile. En parallèle avec le péage, le maire de Londres a décidé de développer les transports collectifs, afin de proposer un mode alternatif aux automobilistes. Si la tarification uniforme revêt quelques inconvénients, la réduction de la congestion est significative. Toutefois, une question demeure : ce péage est-il réellement une réussite économique ?

2.1. Une mobilité croissante⁹⁵

2.1.1. Population et déplacements

Depuis le début des années 80, la population londonienne augmente constamment. Elle est passée de 6,75 millions d'habitants en 1981 à 7,38 millions en 2000, et de récentes études indiquent qu'elle pourrait atteindre les 8,1 millions d'ici 2016. Le centre-ville de Londres compte pour sa part 160 000 résidents et plus de 1,28 million d'emplois sur cette zone. En 2000, seulement 13% des travailleurs utilisaient la voiture pour se rendre sur le lieu de travail, contre 78% se déplaçant en transport collectif (11,5% en bus de ville, 38,5% en métro, 50% en train national). En plus, signalons que 4% marchaient pour se rendre à leur travail, 2% utilisaient le vélo et 2% la moto.

A Londres, le temps moyen de déplacement pour se rendre sur le lieu de travail était de 56 minutes (en 2002), soit le double de la moyenne nationale.

2.1.2. Répartition modale

La demande des transports collectifs londonien augmente fortement depuis les années 90. La mairie de Londres estime que la demande de métro va s'amplifier de 16% d'ici 2011,

⁹⁵ Les chiffres donnés dans ce paragraphe sont issus du rapport de la Mairie de Londres (TfL, 2001a).

celle du train national de 15% et celle des bus de 15%. Le réseau routier de Londres étant déjà fortement surchargé, il ne devrait pas y avoir d'évolution dans le centre-ville, mais le trafic automobile s'accroîtra sans doute de 4,5% dans le reste de la capitale britannique.

Aujourd'hui, 3 millions des déplacements quotidiens à Londres sont effectués en métro et 1,5 million en train national. Ces modes de transports sont également surchargés, ce qui entraîne, tout comme la congestion urbaine, des retards et des pertes de temps.

2.1.3. Congestion et externalités environnementales

Depuis plusieurs décennies la vitesse des déplacements en automobile, dans le centre-ville de Londres, diminue constamment (voir la figure 2). Aujourd'hui celle-ci est de 16 km/h. Selon les estimations, environ 250 000 véhicules circulent chaque jour à Londres.

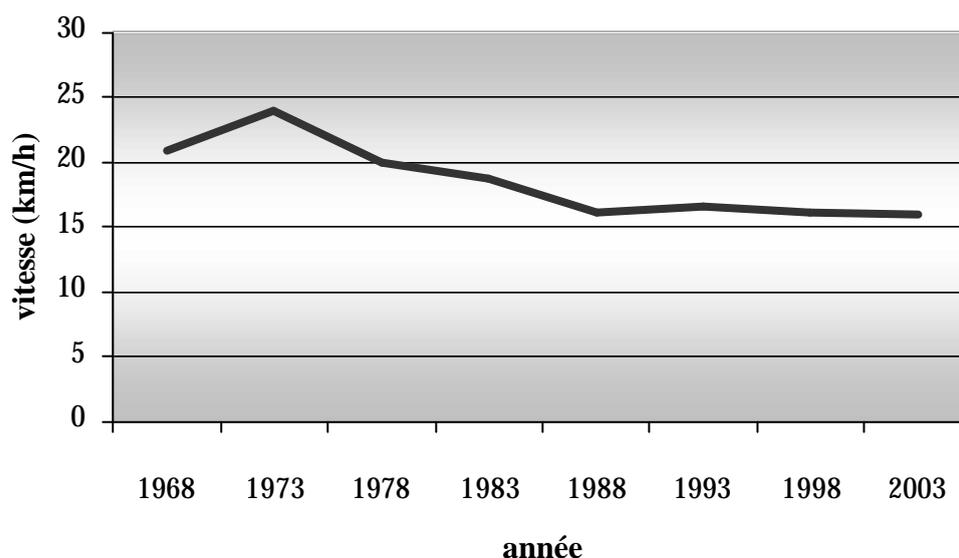


Figure 2 : Vitesse du trafic londonien pendant la période de pointe du matin (Source : TfL, 2001a)

Les autorités estiment que le niveau de congestion dans la ville est plus élevé de 50% par rapport aux autres grandes villes anglaises. Lors des déplacements en automobile dans le centre ville, les individus sont à l'arrêt la moitié du temps de parcours. Le coût de ces embouteillages pour les acteurs économiques est élevé : 2 à 4

millions de livres⁹⁶, en moyenne, chaque semaine. Cela comporte des effets pervers sur les transports collectifs routiers (le bus de ville) qui subissent également de fortes pertes de temps.

A ces externalités de congestion, on peut ajouter les effets externes sur l'environnement. Outre le bruit, les transports urbains (voitures + transports collectifs) sont également responsables de la pollution croissante de la cité londonienne⁹⁷. Le trafic urbain est responsable de 20% des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) produites en ville, de l'émission de 52% d'oxyde d'azote (NO_x), des émissions du dioxyde de soufre (SO₂) à raison de 38%, et du monoxyde de carbone (CO) à 93%. De plus, 70% des émissions de particules fines (PM₁₀) sont aussi émises par les transports urbains.

Pour réduire l'intensité de ces externalités et réguler la circulation automobile dans le centre ville de Londres, le maire travailliste Ken Livingstone a décidé de mettre en place une politique de tarification de la congestion de zone dont le modèle pourrait bien être le péage de Singapour, d'avant 1998, présenté ci-dessus.

2.2. La "congestion charge" comme tarification zonale du centre-ville

Pour que l'acceptabilité du péage urbain de congestion soit maximale, il est nécessaire d'instaurer des politiques d'accompagnement, ou plus exactement de proposer aux automobilistes lésés, qui subissent un "*coût de changement*", un mode de transport alternatif. D'où l'exigence de développer des transports collectifs au plus bas prix pour offrir une véritable alternative aux anciens automobilistes. L'objectif de ce péage électronique est donc double : réguler la circulation et réduire la congestion, puis financer et développer les transports urbains collectifs.

2.2.1. Une tarification de la congestion uniforme

Depuis le 17 février 2003, il faut désormais compter 5 livres (7 euros en 2003)⁹⁸ pour circuler au cœur de la capitale britannique entre 7 heures et 18 heures 30, du lundi au vendredi - sauf les jours fériés - dans une zone de 22 km² délimitée par Tower Bridge à l'est et Hyde Park à l'ouest, par Vauxhall Bridge au sud et la gare de King's Cross au

⁹⁶ Soit entre 3 et 6 millions d'euros (taux de change au 1^{er} juillet 2005 : 1 livre = 1,48 euro).

⁹⁷ Les chiffres indiqués ci-après sont présentés dans le rapport de la Mairie de Londres (TfL, 2001a).

⁹⁸ A compter du mois de juillet 2005, ils devront s'acquitter de 8 livres (11,80 euros en 2005).

nord. Si cette zone à péage ne représente qu'un infime espace du grand Londres (environ 1,5% de la superficie), la municipalité envisage cependant de quasiment la doubler en augmentant sa surface de 75%. De plus, 5,2% des Londoniens habitent dans cet espace et 26% des emplois s'y trouvent. Il y a donc de nombreuses entrées-sorties dans la zone, même si cela ne concerne environ que 1,7% de la circulation automobile (en véhicules*km) de la capitale britannique. La "*congestion charge*" a pour premier objectif de réduire la circulation de 10 à 15 % (soit transférer 25 à 30 000 automobilistes vers les transports collectifs). La taxe peut être acquittée de nombreuses manières, par téléphone ou Internet, dans les bureaux de poste ou dans certaines stations services, le jour même, avant 22 heures⁹⁹. Un abonnement est possible pour une semaine, un mois ou un an (1250 livres, environ 1810 euros). Les résidents du centre-ville bénéficient d'une réduction de 90 %. Les payeurs sont les automobilistes et les conducteurs de poids lourds. Sont exemptés les voitures "*propres*" (GPL ou électriques), les motos, mobylettes, les taxis, les médecins et les handicapés.

Pour les personnes concernées, le péage est donc uniforme sur toute la journée de 7 heures à 18 heures 30. Concernant l'efficacité de ce type de tarification appliquée à une zone, on peut émettre différentes remarques :

- en premier lieu, ce péage correspond à un forfait qui autorise l'automobiliste à circuler dans cette zone toute la journée pour la somme de 5 livres, l'effet est positif puisque l'automobiliste (ayant une valeur du temps inférieure au péage) sera incité à ne pas entrer dans cette zone en voiture ;
- ce constat nous permet de souligner le défaut majeur de ce type de tarification : l'automobiliste circulant toute la journée dans cette zone n'aura pas à s'acquitter d'un péage plus élevé que celui effectuant un simple aller-retour dans le centre-ville, en d'autres termes le forfait est journalier et non kilométrique (le risque peut être d'assimiler ce péage comme un péage d'octroi)¹⁰⁰ ;

⁹⁹ Les retardataires ont jusqu'à minuit, chaque soir, pour payer une taxe majorée (10 livres au lieu de 5). Après minuit, ils sont passibles d'une contravention de 80 livres (120 euros). Pour le contrôle, il y a environ 800 caméras reliées à un ordinateur central afin de lire les plaques d'immatriculation et de vérifier que les automobilistes sont en règle.

¹⁰⁰ Le ministre des Transports britannique, Alistair Darling, suggère de faire payer l'usage de toutes les routes du pays en instaurant une taxation kilométrique variant en fonction des lieux et des horaires. Pour ce type de tarification, se reporter à la section 4 consacré à la présentation de la RPLP en Suisse.

- le principe même de tarification forfaitaire uniforme n'a pas pour finalité la régulation du trafic, puisqu'il n'y a pas de péage en fonction de l'heure de pointe ;
- enfin, il est important de mettre en exergue le fait que les résidents du centre-ville sont exemptés à 90% du péage. Pour ces automobilistes-là, il n'y a donc qu'une très faible incitation à changer de comportement et à éviter les allers-retours de courte distance.

Ces trois inconvénients majeurs de la tarification londonienne peuvent laisser supposer que l'objectif premier était en fait de récolter des fonds pour entretenir et développer les transports collectifs urbains.

2.2.2. Un péage de financement des transports collectifs

Comme nous venons de le souligner, l'autre objectif mis en avant par le maire de Londres est de financer les transports collectifs. Il semble en effet qu'un effort est à faire dans l'entretien du vieux métro londonien, vétuste, toujours bondé et dont le prix des billets est très élevé (1,5 à 3,5 livres), ainsi que dans la prolifération des bus de ville dont la ponctualité est aléatoire.

La "*congestion charge*" devrait rapporter quelque 130 millions de livres (soit environ 210 millions d'euros) par an à l'Autorité du Grand Londres – gestionnaire du péage - chargée de les investir dans l'amélioration des infrastructures de transport de la capitale. Ainsi, la quantité de l'offre de transport collectif pourrait augmenter et le prix des tickets diminuer.

2.3. La "*prise de risque*" politique : le rôle du décideur

Les premières études portant sur le péage de congestion de Londres remontent à 1962, et le premier plan évoqué date de 1974 (C.E.R.T.U., 2001, p. 81). Le maire de Londres, Ken Livingstone élu en mai 2000, avait le projet ambitieux de résorber le problème de la congestion dans le centre de la capitale. Pour cela, il est nécessaire pour lui "*d'inciter les automobilistes à abandonner leur voiture en faveur des transports publics*" (Transport public, 2000). Il évoquait déjà que deux tiers des habitants de Londres approuveraient une taxe anti-embouteillages à condition "*qu'elle s'accompagne d'améliorations supplémentaires dans le transport public*". Une fois élu, il a procédé – en septembre 2000 -

à une grande phase de concertation auprès des citoyens de la ville en les incitant à donner leur opinion sur différents points :

- ❑ la délimitation de la zone à péage ;
- ❑ le niveau du tarif ;
- ❑ les horaires et les jours d'application du péage ;
- ❑ les groupes d'automobilistes exemptés de paiement ;
- ❑ le statut des deux-roues motorisés ;
- ❑ les éventuelles réductions pour les habitants de la zone concernée ;
- ❑ le niveau de l'amende en cas de non paiement ;
- ❑ l'affectation des recettes aujourd'hui et à plus long terme.

Une fois que les grandes lignes du projet furent déterminées, les pouvoirs publics ont lancé une enquête téléphonique auprès de 2003 habitants de Londres en avril 2001 (TfL, 2001b). Dans cette étude, il ressort que 64% des personnes interrogées sont pour une rénovation du métro londonien, et 93% sont pour une augmentation de la fréquence des passages et du nombre de connexions. De la même façon, s'agissant des bus de ville, 84% sont pour un accroissement du nombre d'arrêts de bus et du nombre de passages et 71% souhaitent que la quantité de bus augmente. La quasi totalité des personnes interrogées se sentent particulièrement concernées par les problèmes d'encombrement et par les externalités de congestion (95%).

Toutefois, le point de vue de la population sur le péage de congestion est mitigé même si une opinion somme toute favorable semble se dessiner. Les résultats nous permettent d'observer que les personnes les plus opposées à l'instauration d'une telle politique résident en périphérie de la ville (41%), et le pourcentage d'individus défavorables diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche de la zone concernée (35%). Ces résultats ont permis aux opposants de la "*congestion charge*" de comparer cette "*taxe*" à l'obsolète péage d'octroi. Face à cette prise de position quelque peu démagogique, la mairie de Londres a répondu que le péage de congestion a pour but de faire prendre conscience aux automobilistes qu'un changement de comportement (ici, un changement de mode) peut être bénéfique pour la collectivité et pour eux-mêmes. De plus le péage d'octroi avait pour vocation de récolter des fonds pour la ville, tel un impôt. A Londres, Ken Livingstone propose d'instaurer une « taxe » (dés)incitative dont les

recettes iraient directement vers les transports collectifs, à savoir vers les usagers qui ont changé de comportement.

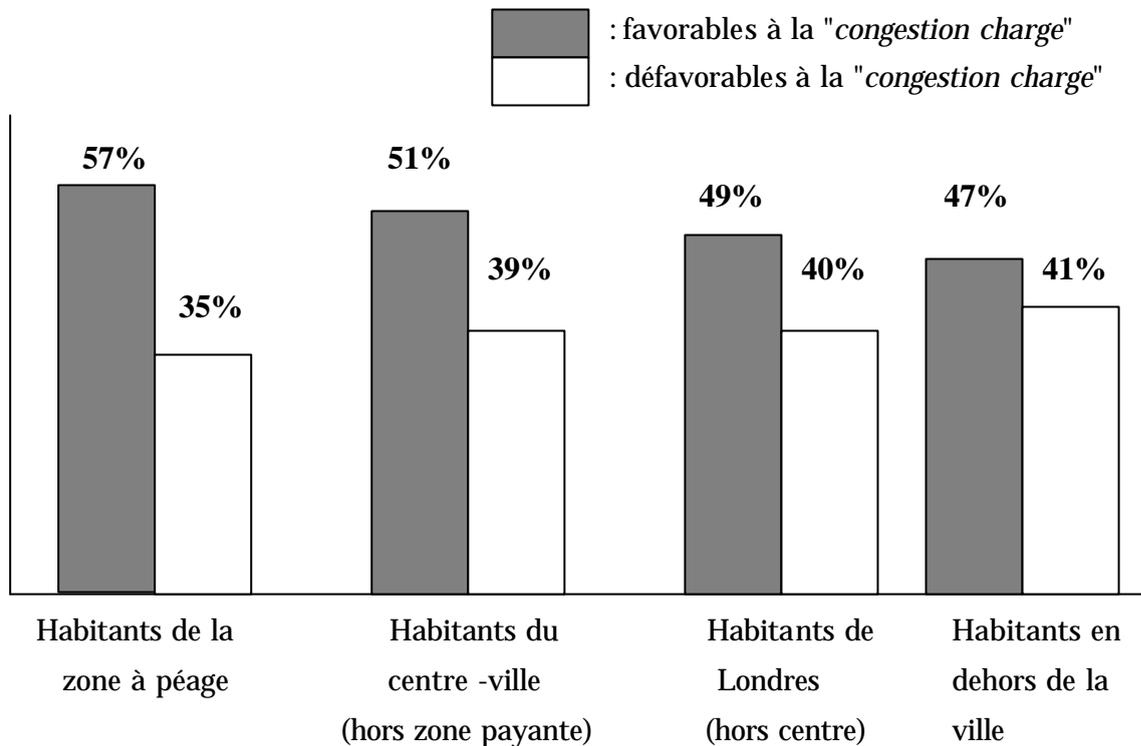


Figure 3 : Pourcentage d'habitants favorables (et défavorables) au péage de congestion en fonction du lieu de résidence

2.4. Une réussite en demi-teinte

Si les objectifs initiaux du péage étaient ambitieux, les résultats demeurent partagés. Les effets en terme de réduction de la congestion et en terme de répartition modale s'avèrent positifs, mais les coûts mis en œuvre pourraient bien être exorbitants.

2.4.1. Des résultats incontestables

2.4.1.1. Sur la congestion et la circulation

Le niveau de congestion est défini par la mairie de Londres, comme étant l' "excès de retard" mesuré en minute par kilomètre. Il était de 2,3 en février 2002 et de 3,5 en septembre 2002. Après la mise en place du péage, cet excès est passé à 1,4 min/km en mars 2003, puis à 1,6 en février 2005, soit une baisse de près de 30% de la congestion par rapport à la situation initiale (février 2002).

Il est nécessaire de souligner un élément supplémentaire : il n'y pas eu de report temporel de la circulation. C'est-à-dire que le temps de trajet a également diminué pendant les périodes précédant (6h-7h) et suivant (18h30-20h) la phase payante (7h-18h30).

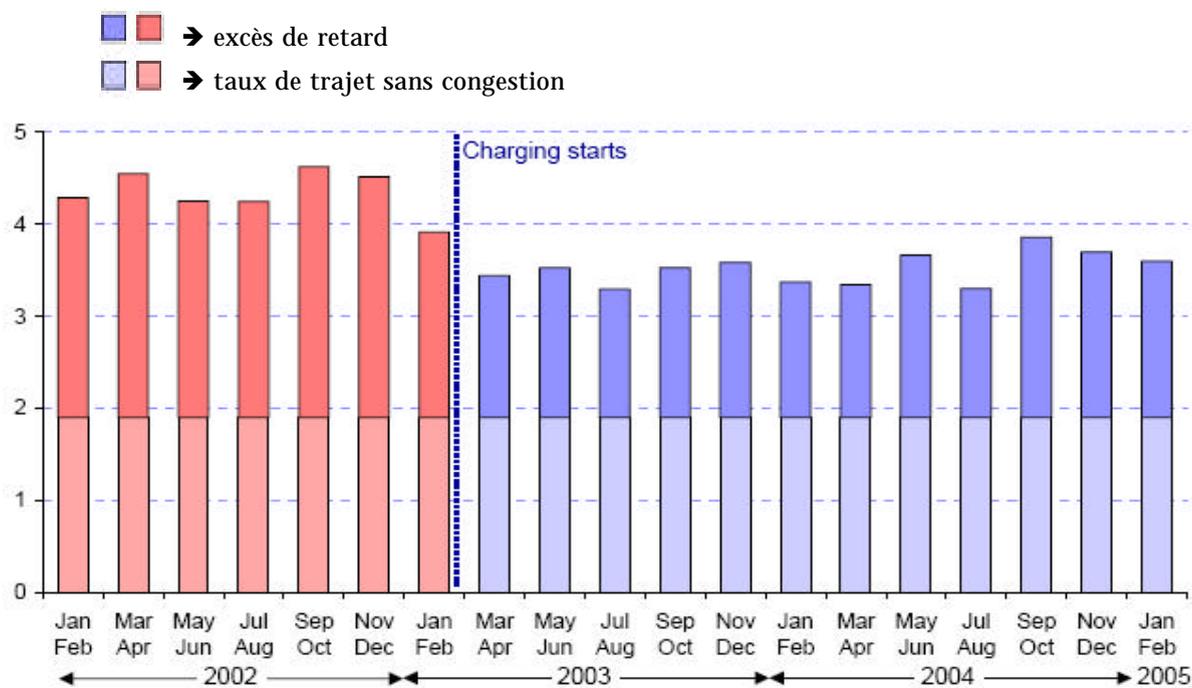


Figure 4 : Niveau de congestion pendant les périodes payantes (Source : TfL, 2005, p. 15)

Dans les zones encadrant l'espace à péage, la circulation a également diminué, mais dans une moindre mesure. Toutefois, le péage n'a pas eu d'effet sur le niveau de circulation dans le reste de Londres. De plus, la vitesse moyenne a augmenté de 20 à 30% - selon les mois étudiés, à savoir qu'elle est passée de 13 km/h à 17 km/h alors qu'il était prévu une hausse seulement de 10 à 15%.

Concernant le trafic automobile à proprement parler, on constate une réduction des entrées et sorties dans la zone à péage, passant de 195 000 à l'automne 2002 à 130 000 à l'automne 2004 pour les entrées, et de 185 000 à l'automne 2002 à 119 000 à l'automne 2004 pour les sorties, soit respectivement une diminution de 33% et de 35%. Le trafic routier dans le centre de Londres a plus précisément baissé de 16% et les déplacements automobiles quotidiens, à l'intérieur de la zone, sont passés de 390 000 à 240 000 soit une baisse de 39% pour la période payante.

2.4.1.2. Sur la répartition modale

Le transfert des automobilistes vers l'autobus est net puisque le nombre d'usagers des bus a augmenté de 14% (en parallèle avec l'accroissement de l'offre) et celui du métro de 1%. D'après les calculs de R. PRUD'HOMME et J. P. BOCAREJO (2005, pp. 73-81.), l'augmentation de la vitesse des bus de ville est moins significative que celle des voitures : *"les utilisateurs des autobus, au nombre de 356 000, gagnent 1,34 minute par personne et par jour ce qui fait 31 millions d'euros par an."*

Le transfert des automobilistes a lieu également vers les autres modes de transport. On remarque, une nette augmentation de l'usage des taxis, du vélo et de la marche à pied.

2.4.1.3. Sur l'environnement

Peu d'éléments concernant les effets sur l'environnement ont été relevés par les rapports de la Mairie de Londres. Ceci est, en partie, expliqué par R. PRUD'HOMME et J. P. BOCAREJO (2005, p. 77) : *"les véhicules*km de la zone péagère représentent une fraction très faible (moins de 1%) des véhicules*km de l'agglomération londonienne. La qualité de l'air à Londres dépend des rejets polluants émis dans l'ensemble de l'agglomération."* Deux résultats sont cependant à prendre en compte. Tout d'abord, la réduction du nombre de véhicules par kilomètre permet de réaliser un bénéfice de 1,7 million d'euros par an¹⁰¹. Puis, le fait que les véhicules roulent plus vite entraîne une réduction des rejets polluants de 34% (soit un bénéfice supplémentaire de 2,8 millions d'euros par an) et une diminution des rejets de dioxyde de carbone permettant un bénéfice supplémentaire de 0,4 million d'euros par an. Au total les bénéfices environnementaux sont estimés à 4,9 millions d'euros par an (R. PRUD'HOMME et J. P. BOCAREJO, 2005, p. 78).

2.4.2. Un coût de mise en œuvre élevé

Si les gains en terme de régulation automobile sont évidents, il n'en demeure pas moins que les coûts de mise en place et de fonctionnement du péage sont élevés.

Le programme a été prévu pour obtenir les coûts et les revenus présentés dans le tableau ci-dessous entre 2000 et 2008, en comptant trois ans de développement et cinq

¹⁰¹ En prenant la valeur du rapport BOITEUX (2001) pour le coût de la pollution (29 euros pour 1 000 véhicules*km)

ans d'opération (T. LITMAN, 2005). Toutefois, les revenus du péage ont été inférieurs à ceux escomptés et ceux des infractions plus élevés que prévu. Les autorités londoniennes projettent que les recettes de 2004/05 augmentent et atteignent 190 millions de livres (280M d'€). Ainsi, avec 92 millions (135M d'€) de dépenses, cela permettrait d'avoir un bénéfice net de 97 millions de livres (145M d'€).

| | Total | Par année (sur 5 ans) |
|---|--------------|----------------------------------|
| Coûts de mise en œuvre | £180M | £36M |
| Coûts de fonctionnement | £320M | £64M |
| Coûts totaux | £500M | £100M (€148M) |
| Recettes du péage | £690M | £138M |
| Recettes des infractions | £110M | £22M |
| Total annualisé des recettes | £800M | £160M (€236M) |

Tableau 6 : Prévion des coûts et des recettes du programme de la "congestion charge" (Source : T. LITMAN, 2005, p. 5)

Une observation plus approfondie des réels coûts et bénéfices du péage londonien revient à relativiser ces résultats. En effet, les recettes du péage proviennent des automobilistes s'acquittant de la somme prévue à cet effet. La question est donc : les bénéfices liés au péage (réduction des coûts de congestion automobile, augmentation des vitesses des transports collectifs, diminution des effets négatifs sur l'environnement) justifient-ils l'ensemble des coûts du péage ?

A ce sujet, R. PRUD'HOMME et J. P. BOCAREJO estiment le gain en réduction des coûts de congestion à 69 millions d'euros par an (selon l'approche "économique" évoquée dans la section 1 du premier chapitre). Cependant, ce résultat serait égal à 296 millions d'euros d'après les définitions dites "naïve" ou "arbitraire" de la congestion par R. PRUD'HOMME (les coûts de congestion sont égaux à la différence entre la vitesse mesurée et la situation de fluidité). Cet écart rend donc flou les réels bénéfices du péage en terme de congestion. Ainsi, en supposant que les recettes du péage équivalent à une somme nulle (€236M dépensés par les automobilistes et €236M perçus par les pouvoirs publics), le bénéfice net, calculé selon l'approche "économique" est négatif de 73 millions d'euros. Alors qu'avec l'approche "naïve" le bénéfice devient positif avec 157 millions d'euros.

Comme le suggèrent R. PRUD'HOMME et J. P. BOCAREJO il convient de relativiser le succès du péage londonien. Si sa réussite politique et technique est évidente, sa réussite économique est à nuancer, puisqu'elle dépend de la définition que l'on attribue aux coûts de congestion.

2.5. Les redistributions du péage

2.5.1. L'affectation des bénéfices nets du péage

Outre la régulation de la circulation, le péage de Londres a aussi pour but de transférer une part des automobilistes vers les transports collectifs. Pour cela, les autorités londoniennes ont choisi d'affecter une grande part des bénéfices dans ce sens. Concrètement, il est prévu d'affecter les recettes 2004/2005 du péage comme suit :

| | |
|---|------------|
| Investissement dans le réseau de bus: Augmentation de la fréquence des autobus et accroissement des voies réservées afin de supporter le transfert des automobilistes vers les transports collectifs. | 80% |
| Sécurité routière : Contribution à des programmes de recherche afin de réduire les accidents automobiles. Campagnes d'information, avec pour objectif de réduire de 40% les accidents à Londres d'ici 2013. | 11% |
| Marche à pied et vélo : Développement d'espaces réservés à ces deux modes. Campagnes d'information. | 6% |

| | |
|--|-------------|
| Sécurité auprès des écoles Contributions pour réduire les accidents impliquant des enfants à proximité des écoles. | 2% |
| Distribution et fret : Rendre la distribution des marchandises dans et autour de Londres plus soutenable. | 1% |
| TOTAL | 100% |

Tableau 7: Affectation des recettes du péage (Source : TfL, 2005)

2.5.2. "Les gagnants et les perdants"

Si l'affectation des recettes est un élément de redistribution à prendre en compte pour rendre compte du niveau d'acceptabilité d'une telle mesure tarifaire, on peut toutefois distinguer les principaux gagnants et perdants du péage de Londres.

Dans un premier temps, chez les automobilistes, nous relevons quatre groupes touchés par la "*congestion charge*". Chez les gagnants, les premiers sont sans doute les automobilistes résidents qui ne paient que 10% du tarif du péage. Ils se déplacent plus rapidement et bénéficient des améliorations environnementales. Ensuite les automobilistes riches dont la valeur du temps est très élevée (supérieure au tarif du péage) apparaissent également gagnants. A l'opposé, les automobilistes moins riches et ayant donc une valeur du temps plus faible, sont assurément les premiers perdants du péage de Londres. Les automobilistes circulant ou résidant en dehors de la zone à péage peuvent également pâtir des débordements de circulation, dus à des transferts d'itinéraires.

Dans un second temps, les bénéficiaires du péage sont les usagers des autres modes de transports. Les utilisateurs des transports collectifs se déplacent maintenant plus vite sans payer plus cher. Les usagers des taxis se déplacent également plus vite et paient moins. Enfin, piétons et cyclistes bénéficient d'une part (infime) des recettes du péage et voient leur bien-être s'accroître.

Concernant les gagnants de ces deux groupes d'individus (automobilistes et usagers d'autres modes), "*la question se pose de savoir si les gains de temps sur des déplacements liés au travail profitent aux salariés ou à leurs entreprises.*" (R. PRUD'HOMME et J. P. BOCAREJO, 2005, p. 79)

En effet, les entreprises sont en général bénéficiaires, mais certains commerces, qui étaient essentiellement accessibles en voiture, ont pu perdre des clients. Les entreprises de taxis sont quant à elles très bénéficiaires puisque, exonérées du péage, elles ont diminué leurs coûts de trajets de 20 à 40% (T. LITMAN, 2005) et ont augmenté leurs nombres de courses.

| | Gagnants | Perdants |
|---------------------------------|--|---|
| ○ Automobilistes | Automobilistes résidents | Automobilistes/résidents en dehors de la zone |
| | Automobilistes avec une valeur du temps élevée | Automobilistes avec une valeur du temps faible |
| ○ Usagers d'autres modes | Usagers des transports collectifs | - |
| | Usagers des taxis | - |
| | Piétons et cyclistes | - |
| ○ Entreprises | La plupart des entreprises | Les commerces accessibles en voiture et non accessibles en transports en commun |
| | Entreprises de taxis | - |

Tableau 8 : "Les gagnants et les perdants" du péage de Londres

Il est encore trop tôt pour tirer des conclusions supplémentaires sur le succès – ou non – de la "congestion charge". On sait cependant d'ores et déjà que les portées du péage ont dépassé l'effet escompté puisque il a réduit la congestion de 30% (or l'objectif était de 20 %) dans la zone centrale. De plus, la vitesse moyenne a augmenté de 30%. Par ailleurs, d'autres villes anglaises sont prêtes à tenter l'expérience si celle de Londres réussit.

La réussite économique mitigée n'empêche pas les londoniens d'approuver le maire et de soutenir son action. Et il ne serait pas étonnant de voir cette tendance se confirmer à travers la hausse de 60% du prix du péage (de 5 à 8 livres par jour). Ken Livingstone s'est notamment engagé à affecter les recettes à l'amélioration des autobus.

Section 3. Les expériences californiennes de "routes de première classe"

Afin de proposer aux automobilistes pressés un service de qualité avec une circulation fluide, les pouvoirs publics peuvent mettre en œuvre des voies à péage ("*routes de première classe*") en parallèle aux voies initiales gratuites.

Nous allons voir au cours de cette section que la mise en place d'une telle politique peut être bien acceptée si l'information des usagers est maximale et si ceux-ci ne se sentent pas lésés. Nous étudierons les expériences de mises en place de voiries alternatives réalisées aux Etats-Unis, dans deux comtés de la Californie : Orange County (3.1.) et San Diego (3.2.).

3.1. Le péage d'Orange County

Située au sud de Los Angeles, la SR-91 (California State Route 91) permet aux habitants de la zone résidentielle de Riverside County de rejoindre le centre des affaires situé dans Orange County.

3.1.1. Présentation générale de la SR-91

L'utilisation de la SR-91 s'est fortement accrue durant deux décennies. En 1995, le temps de trajet sur cette voie était estimé à une heure par déplacement (soit trois fois le temps moyen national). Depuis décembre 1995, des voies expresses payantes ont été mises en place parallèlement aux voies déjà existantes. Ce sont les premières routes de "*première classe*" instaurées aux USA. Les voies concernées s'étalent sur une quinzaine de kilomètres (six voies dont deux payantes dans chaque sens).

Les voies expresses sont ouvertes en permanence. Dans un premier temps, la mise en place des voies alternatives étant trop chère pour la collectivité, l'autorité de transport d'Orange County (OCTA) a fait appel à une entreprise privée la CPTC (California Private Transportation Company) qui a obtenu une concession de 35 ans, après quoi la gestion devait devenir publique. La CPTC avait initialement comme autre objectif de promouvoir le covoiturage en permettant l'accès gratuit aux voies rapides pour les automobilistes accompagnés d'au moins deux passagers : "*HOV 3+ lanes*" (High Occupancy Vehicles). En 1998, le covoiturage (HOV 3+) est rendu payant à 50% du niveau du péage.

Les voies expresses à péage, "*HOT lanes (high occupancy toll)*", sont réservées aux abonnés qui doivent s'équiper d'une unité embarquée (dont le coût s'élève à 50 dollars US, mais qui est offerte pour les usagers fréquents des voies expresses). A chaque passage le compte de l'abonné est débité¹⁰².

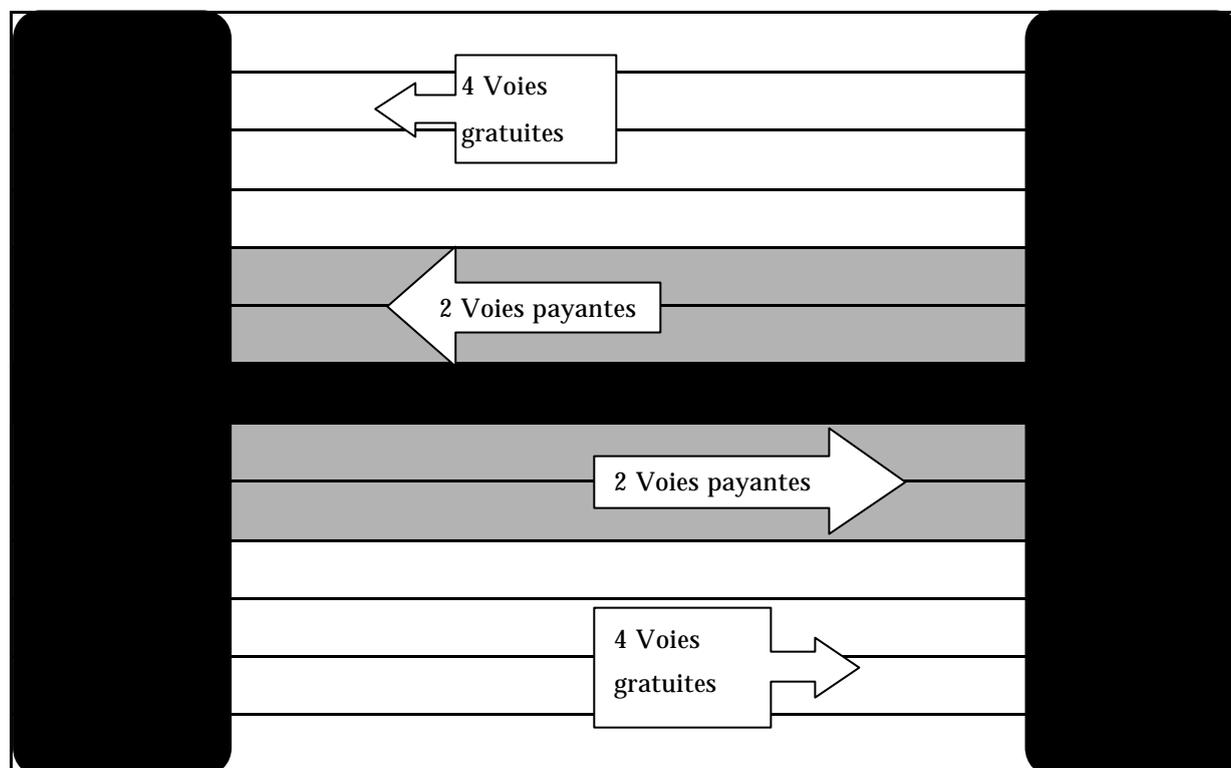


Figure 5 : Schéma de la SR 91

Le coût de cette infrastructure s'est élevé à 126 millions de dollars pour la CPTC, et en 1998, les recettes couvraient les coûts d'exploitation. Le 3 janvier 2003, l'organisme public OCTA reprend en charge la gestion des voies expresses en rachetant la franchise à la CFTC pour 207 millions de dollars (170 millions d'euros 2005).

3.1.2. La tarification de second rang

L'objectif est de trouver une tarification permettant d'avoir une circulation fluide sur les voies payantes, avec un péage qui évolue chaque heure. De plus, les usagers sont informés en permanence du temps de trajet gagné en empruntant la voirie payante.

¹⁰² Notons qu'il existe des réductions significatives suivant les caractéristiques des abonnés : véhicule propre, personnes handicapées...

En septembre 1997, un changement de mode de tarification intervient sur les voies rapides : les autorités modifient le péage et le rendent quasi-variable (le prix du trajet évoluant toutes les heures), alors qu'il était uniforme en période de pointe. Les tarifs fluctuent entre 1 et 6,25 dollar US (en 1995, l'écart était compris entre 0,5 et 2,75 dollars US). L'opérateur privé pouvait modifier le niveau du péage avec toutefois une contrainte sur les profits : un plafond flexible du taux de retour sur investissement était négocié avec l'Etat de Californie (C. RAUX et S. SOUCHE, 2001, p. 549). Nous pouvons observer les tarifs du péage sur les voies payantes en fonction des heures et des jours¹⁰³ :

| | Dimanche | Lundi | Mardi | Mercredi | Jeudi | Vendredi | Samedi | |
|---------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------|-------------|
| minuit | 1.05 | 1.05 | | | | | | 1.05 |
| 1h00 | | | | | | | | |
| 2h00 | | | | | | | | |
| 3h00 | | | | | | | | |
| 4h00 | | | | | | | | |
| 5h00 | | | | | | | | |
| 6h00 | | | | | | | | |
| 7h00 | 1.40 | 1.75 | | | | | | 1.75 |
| 8h00 | | | | | | | | |
| 9h00 | | | | | | | | |
| 10h00 | 2.10 | | | | | | | 2.10 |
| 11h00 | | | | | | | | |
| 12h00 | 2.50 | 1.75 | | | | | 2.60 | 2.50 |
| 13h00 | | 2.35 | | | | 2.60 | 4.05 | |
| 14h00 | | 3.40 | | | | 3.50 | | |
| 15h00 | 2.10 | 3.65 | | 3.90 | | | 6.25 | |
| 16h00 | | 4.40 | 5.00 | | 6.25 | | | |
| 17h00 | | 4.95 | 5.50 | 5.50 | | | | |
| 18h00 | | 3.65 | 3.80 | | 4.10 | 4.40 | 2.10 | |
| 19h00 | | 2.60 | | | | 3.70 | 3.95 | 1.75 |
| 20h00 | 1.75 | | | | 2.35 | 3.70 | | |
| 21h00 | 1.75 | | | | 1.75 | 2.35 | | |
| 22h00 | 1.05 | | | | | 1.75 | 1.05 | |
| 23h00 | | | | | | | | 1.05 |

Tableau 9a : Péage sur la SR 91 dans le sens travail-domicile (au 1.09.2004)

¹⁰³ Cette grille est fixe avec des prix pré-établis (à San Diego les prix évoluent de façon dynamique).

| | Dimanche | Lundi | Mardi | Mercredi | Jeudi | Vendredi | Samedi |
|---------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------|
| minuit | 1.05 | | | | | | |
| 1h00 | | | | | | | |
| 2h00 | | | | | | | |
| 3h00 | | | | | | | |
| 4h00 | 1.05 | 2.00 | | | | 3.20 | 1.05 |
| 5h00 | | 3.30 | | | | | |
| 6h00 | | 3.40 | | | | | |
| 7h00 | | 3.75 | | | | 3.65 | 1.50 |
| 8h00 | 1.50 | 3.40 | | | | 3.30 | 1.75 |
| 9h00 | 2.75 | | | | | 1.75 | 2.10 |
| 10h00 | 2.10 | 1.75 | | | | | 2.40 |
| 11h00 | | | | | | | |
| 12h00 | | | | | | | |
| 13h00 | 2.40 | | | | | | |
| 14h00 | | | | | | | |
| 15h00 | | | | | | | |
| 16h00 | 2.55 | | | | | | 2.10 |
| 17h00 | | | | | | | |
| 18h00 | | 2.50 | 2.10 | | | | |
| 19h00 | 2.10 | 1.05 | | | | 1.75 | |
| 20h00 | | | | | | | |
| 21h00 | | | | | | 1.05 | |
| 22h00 | | | | | | | |
| 23h00 | 1.05 | | | | | | |

Tableau 9b : Péage sur l'autoroute SR 91 dans le sens domicile-travail (au 1.09.2004)

3.1.3. Acceptabilité et effets du péage

Depuis la reprise du management des voies à péage par l'OCTA, plusieurs modifications ont eu lieu et notamment, en mai 2003, le retour à la gratuité lors de la plupart des trajets pour les véhicules avec trois passagers et plus. Ceci a eu un effet positif sur le taux d'occupation des voitures (passant de 1,38 à 1,48 passagers par voiture). Les trajets en covoiturage (HOV3+) ont ainsi augmenté de 43,3% en 2004 par rapport à l'année 2003 passant de 1,5 à 2,2 millions de trajets. Les effets du péage sur la circulation sont

significatifs puisque le temps de trajet moyen qui était estimé à 58 minutes avant la mise en place des voies à péage est actuellement de 13,5 minutes sur les voies rapides.

En million US\$

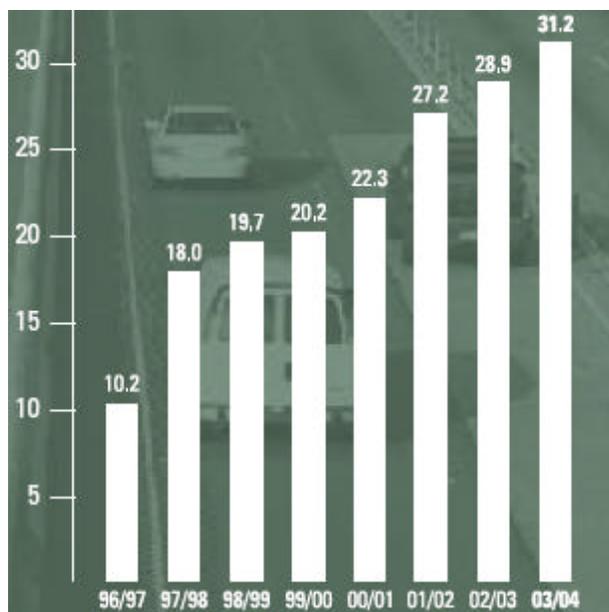


Figure 6 : Les recettes totales du péage (Source : OCTA, 2004, p. 10)

Une étude réalisée en 2003 (OCTA, 2004) sur la perception des voies express par les automobilistes rendait compte que celles-ci avaient en priorité permis de gagner du temps pour 36% des personnes interrogées. Ensuite, la mise en œuvre de ces infrastructures avait contribué à réduire le trafic sur les voies gratuites (31%), à augmenter la vitesse (14%) et à offrir plus de sécurité (5%).

Au regard des personnes interrogées, le gain de temps est évident puisque plus de la moitié estiment avoir gagné plus de 21 minutes par trajet, et parmi eux un tiers plus d'une demi-heure et un quart plus de 45 minutes.

L'acceptabilité actuelle de cette "route de première classe" s'inscrit parfaitement dans la lignée des études réalisées dès la mise en place des voies express. En 1995, une majorité des individus soutenait déjà l'idée de ces routes à péage. Les raisons de cette acceptabilité sont liées à plusieurs motifs :

- la réalisation des voies express n'interfère pas sur les autres voies existantes (pas de restriction) ;
- les usagers de la section gratuite ne se voient pas contraints de changer de comportement (pas d'augmentation des coûts de déplacement) ;

- la tarification de la valeur est efficace : l'automobiliste pressé connaît son temps de trajet *ex ante* ;
- les coûts d'exploitation et de remboursement de l'infrastructure sont couverts par les usagers : la collectivité ne paie donc pas pour faire gagner du temps aux automobilistes pressés ;

On remarque un changement de comportement chez les usagers pressés. En effet, ceux-ci ayant une forte valeur de temps partaient plus tôt ou plus tard de leur domicile (afin d'éviter l'encombrement de la période de pointe) avant que les voies alternatives payantes n'aient été mises en place. Maintenant, ils circulent en période de pointe en utilisant les routes à péages et ainsi effectuent le trajet domicile-travail en autant de temps qu'avant. Le nombre global d'usagers par jour n'a pas été modifié, il a simplement augmenté en période de pointe et diminué en période creuse.

Pour conclure, il convient de signaler que les voiries à péages sont utilisées simplement comme une alternative ; c'est à dire que les usagers ne projettent pas d'employer quotidiennement ces routes. Mais on note un accroissement permanent du nombre d'automobilistes sur les voies rapides car celles-ci proposent en permanence un temps de trajet plus faible, un maximum de confort et un taux plus faible d'accident.

Cela nous permet de souligner l'objectif premier de cette route à péage : proposer un bien différent à des usagers pressés. Ici, le but visé n'est donc pas la réduction de la congestion, ni l'internalisation des externalités environnementales.

3.2. Le péage de San Diego¹⁰⁴

3.2.1. Des "HOV lanes" aux "HOT lanes"

Depuis quelques années, certaines régions des Etats-Unis favorisent le covoiturage en se dotant de voies spéciales gratuites nommées "*HOV lanes*" (High Occupancy Vehicles) réservées initialement aux véhicules avec un ou plusieurs passagers. La sous-utilisation de ces voies a incité les autorités à ouvrir ces routes aux voitures sans passagers moyennant

¹⁰⁴ L'expérience du péage de San Diego étant similaire à celle d'Orange County, nous ne présenterons ici que les grandes étapes de la mise en œuvre.

paiement ("*HOT lanes*" : High Occupancy Toll). Ici, nous allons étudier le cas de San Diego, similaire à celui d'Orange County.

En 1988, deux voies alternatives ont été aménagées à San Diego en Californie sur un tronçon d'environ 13 kilomètres, sur l'autoroute I-15 qui était particulièrement congestionnée en période de pointe. Pour réduire la circulation, la première politique a été d'inciter les usagers à effectuer du covoiturage en leur offrant une voie parallèle, gratuite et rapide. Ces voies étant sous-occupées, l'accès a été également ouvert, en décembre 1996, aux conducteurs seuls à bord moyennant un forfait mensuel de 70 dollars US (programme ExpressPass). Dans un second temps, en 1998, le forfait s'est transformé en un péage de pointe géré électroniquement par FasTrak (Programme FasTrak)¹⁰⁵. Les souscripteurs de FasTrak sont équipés de transpondeurs permettant l'identification automatique du véhicule. Les deux voies sont ouvertes seulement aux heures de pointe dans un sens pour le matin (vers le sud), et dans l'autre sens pour le soir (vers le nord).

3.2.2. La tarification de pointe

Concernant les péages, le principe est proche du péage de pointe, il est modulable en temps réel en fonction de l'intensification de la circulation. De la même manière qu'à Orange County, le niveau du péage a été mis en place durant les périodes de pointe du matin et du soir et ceci afin d'assurer un temps de parcours constant pour les usagers. En effet, le péage peut varier toutes les demi-heures et dépend ainsi de la fluidité de la circulation sur les voies. Des panneaux électroniques situés avant l'entrée de l'autoroute I-15 permettent d'informer les usagers sur le niveau du péage de la voie rapide et sur le temps du trajet qu'ils vont effectuer. De fait, ils sont libres de choisir la voie qui minimise leur coût total de déplacement¹⁰⁶. Toutes les six minutes, les tarifs sont ajustés

¹⁰⁵ Lien vers FasTrak I-15 : <http://fastrak.sandag.org/>.

¹⁰⁶ Au cours d'une expérience, à Cambridge, le projet fut mal accepté par la population car les automobilistes n'étaient informés du montant du péage qu'une fois entrés dans l'espace payant.

automatiquement¹⁰⁷. De plus, les voies alternatives sont fermées les week-ends et les jours fériés ainsi que de sept heures du soir à cinq heures quarante cinq du matin¹⁰⁸ :

| | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| \$ 4,00 | | | | | | | | |
| \$ 3,00 | | | | | | | | |
| \$ 2,50 | | | | | | | | |
| \$ 2,00 | | | | | | | | |
| \$ 1,50 | | | | | | | | |
| \$ 1,00 | | | | | | | | |
| \$ 0,75 | | | | | | | | |
| \$ 0,50 | | | | | | | | |
| | 5h45- 6h00 | 6h00- 6h30 | 6h30- 7h00 | 7h00- 7h30 | 7h30- 8h00 | 8h00- 8h30 | 8h30- 9h00 | 9h00- 11h |

Tableau 10a : Exemple de grille tarifaire de la pointe du matin¹⁰⁹

| | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| \$ 4,00 | | | | | | | | |
| \$ 3,00 | | | | | | | | |
| \$ 2,50 | | | | | | | | |
| \$ 2,00 | | | | | | | | |
| \$ 1,50 | | | | | | | | |
| \$ 1,00 | | | | | | | | |
| \$ 0,75 | | | | | | | | |
| \$ 0,50 | | | | | | | | |
| | 12h00- 13h00 | 13h00- 15h30 | 15h30- 16h00 | 16h00- 16h30 | 16h30- 17h00 | 17h00- 17h30 | 17h30- 18h00 | 18h00- 18h30- 19h00 |

Tableau 10b : Exemple de grille tarifaire de la pointe du soir (du lundi au jeudi)

¹⁰⁷ C'est la principale différence avec la SR-91 d'Orange County où les tarifs sont fixés à l'avance, réduisant ainsi l'incertitude au sujet du paiement.

¹⁰⁸ En temps normal, le péage n'excède pas les 4 dollars US. Mais pour maintenir une situation de fluidité sur les voies rapides, le tarif peut monter jusqu'à 8 dollars US durant les périodes de forte congestion.

¹⁰⁹ La lecture des grilles tarifaires se fait de la même façon que celles du péage de Singapour. Ainsi sur la tranche horaire de 6h30 à 7h00, le tarif est de 2 \$.

| | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| \$ 4,00 | | | | | | | | | |
| \$ 3,00 | | | | | | | | | |
| \$ 2,50 | | | | | | | | | |
| \$ 2,00 | | | | | | | | | |
| \$ 1,50 | | | | | | | | | |
| \$ 1,00 | | | | | | | | | |
| \$ 0,75 | | | | | | | | | |
| \$ 0,50 | | | | | | | | | |
| | 12h00- 13h00 | 13h00- 15h30 | 15h30- 16h00 | 16h00- 16h30 | 16h30- 17h00 | 17h00- 17h30 | 17h30- 18h00 | 18h00- 16h30 | 18h30- 19h00 |

Tableau 10c : Exemple de grille tarifaire de la pointe du vendredi soir

3.2.3. Acceptabilité et effets du péage

Cette tarification de second rang s'avère économiquement rentable (les coûts correspondent à 41% des recettes). Les revenus nets sont attribués à l'amélioration des transports publics (Bus express) situés le long du corridor de l'I-15. Et parmi les effets notables de la mise en place des HOT lanes, signalons que sur la période d'octobre 1996 à octobre 2001, le covoiturage a augmenté de 71,4 % sur les voies rapides. Enfin, de nombreuses études soulignent que ce programme est très populaire chez les usagers de voies payantes et que la variabilité du péage est une mesure "acceptable". Le péage de San Diego s'avère être une réussite et demeure relativement bien accepté par les usagers, du fait du choix d'utilisation qui est proposé, n'entraînant aucune obligation pour l'utilisateur. La route initiale congestionnée demeure utilisable et les automobilistes peuvent l'emprunter.¹¹⁰

Dans les deux cas que nous venons de présenter, il ressort un élément essentiel déjà évoqué dans les modèles théoriques : la tarification de la valeur. En effet, les deux expériences californiennes, et plus particulièrement celle de San Diego, soulignent l'intérêt porté au service offert. Le péage a ici pour objectif final de maintenir un niveau élevé de fluidité. Les automobilistes empruntant la voie payante doivent pouvoir être satisfaits du

¹¹⁰ A ce sujet, en 1996, près de Toulouse, une portion de l'autoroute A64 a été mise à péage, et a privé les usagers d'une voie initialement gratuite. Le projet a été très mal reçu par la population locale et a dû être interrompu.

service rendu. Ces "routes de première classe" permettent aux automobilistes pressés de gagner du temps et le péage mis en place permet de réguler la circulation et de faire disparaître la congestion. Cette tarification de second rang n'a donc pas pour but de réduire la congestion automobile globale, mais de s'intéresser à une voie en particulier. Toutefois, dans la mesure où la demande de déplacement reste fixe, le péage de pointe sur la voie alternative permet de réduire la congestion globale aux heures de pointe.

Section 4. La redevance sur les poids lourds liée aux prestations (RPLP) en Suisse : un exemple de tarification kilométrique

L'expérience de la RPLP en Suisse diffère en partie de l'instrument développé dans le cadre de cette thèse sur trois points. Tout d'abord, les véhicules concernés ici ne sont pas les automobiles, mais les poids lourds. Ensuite, la tarification n'est pas exclusive à la ville, mais à l'ensemble du territoire Suisse. Enfin, l'objectif ici est prioritairement de réduire la circulation globale des poids lourds et non d'influer sur la congestion et la répartition temporelle. Toutefois, comme nous l'indiquerons à la fin de cette section, cet instrument de tarification est transposable dans le milieu urbain et pourrait être un jour appliqué à l'automobile.

En Europe, le trafic de marchandises emprunte de plus en plus d'espace routier et sa capacité augmente rapidement¹¹¹. Entre 1970 et 2000, le trafic des poids lourds a presque triplé dans les 15 pays de l'UE, passant de 488 à 1377 milliards de tonnes/km. Sur la même période, le trafic marchandises par la route s'est accru de 52 à 75% tandis qu'il a diminué constamment sur le chemin de fer (baisse de 15%), dans les pays de l'UE (ARE, 2004). Plusieurs États européens ont lancé des modes innovants de tarification des infrastructures de transports routiers. Mais c'est en Suisse que l'expérience la plus efficace a été réalisée. Dès le 1^{er} janvier 2001, une redevance sur le trafic des poids lourds proportionnelle aux prestations (RPLP) pour les véhicules de plus de 3,5 tonnes et inférieures à 28 tonnes a été mise en œuvre sur l'ensemble de son réseau routier public.

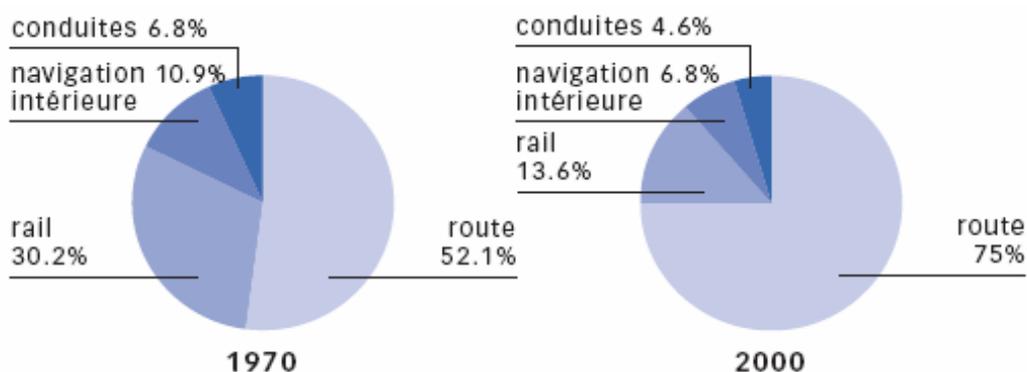


Figure 7 : Répartition modale du transport des marchandises en Europe (Source : ARE, 2004)

¹¹¹ A ce sujet, le lecteur intéressé peut consulter les différentes utilisations des poids lourds selon les pays européens dans le rapport de la CEMT (2003, p. 180).

4.1. Les objectifs de la RPLP

Le but de la RPLP est double. Elle a pour objectif de trouver des financements destinés à l'amélioration des infrastructures routières et ferroviaires, mais aussi d'inciter à un report du transport des marchandises de la route vers le rail.

4.1.1. Amélioration des infrastructures

S'inscrivant pleinement dans la démarche intermodale qui guide la politique des transports en Suisse, les recettes prélevées doivent être affectées dans deux secteurs afin d'améliorer les infrastructures :

- ➔ pour un tiers aux cantons, pour la construction, la rénovation et l'entretien de l'infrastructure routière ;
- ➔ pour deux tiers à la Confédération, pour la rénovation et la modernisation de l'infrastructure ferroviaire.

En parallèle avec la RPLP, les autorités helvétiques avaient déjà mis en œuvre des mesures de développement des réseaux ferroviaires (G. ABADIE, 2002). Ainsi, le programme *Rail 2000*, adopté en 1987, comprend des projets de création, de modification et d'extension des lignes. L'objectif ici est d'augmenter significativement le nombre de trains, d'accroître leur cadence et de réduire les temps de trajet. Le coût de l'opération devrait s'élever à environ 5 milliards d'euros (G. ABADIE, 2002). Ensuite, le projet des nouvelles lignes ferroviaires alpines (NLFA), adopté en 1992, recommandait surtout la construction de deux nouveaux tunnels de base ferroviaire : le Loetschberg et le Saint-Gothard qui devraient être mis en service en 2007 pour le premier et en 2014 pour le second (coût : 9 milliards d'euros).

4.1.2. Changement de comportement

Pour des raisons environnementales, l'autre objectif de la RPLP est d'inciter les entreprises de livraison de marchandises à réduire leur fréquentation routière en utilisant le ferroutage. Ainsi la Suisse s'est fixée pour objectif d'orienter un million de poids lourds vers le rail pour 2009 sur les axes routiers alpins, réduisant de fait leur nombre à 650 000 sur ces axes. De plus la RPLP permet de compenser l'augmentation de la limite de poids maximum de 28 tonnes (en 2001) à 40 tonnes (en 2005).

4.2. Une tarification kilométrique et environnementale

"Le transfert de la route vers le rail exige aussi la détermination de conditions de concurrence équitables entre la route et le rail" (G. ABADIE, 2002). Cette redevance apparaît donc comme un instrument tarifaire qui permet d'appliquer aux poids lourds le principe du pollueur-payeur et d'établir "la vérité des coûts" (ARE, 2004). D'après plusieurs estimations, les coûts non couverts du trafic de marchandises sont estimés à plus de 600 millions d'euros. Autrefois à la charge exclusive des contribuables, ces coûts sont dorénavant imputés à leurs auteurs.

4.2.1. Le calcul de la RPLP

Afin de faire payer aux poids lourds l'intégralité des coûts sociaux qu'ils font subir à la collectivité, la RPLP se calcule sur la base de trois critères :

- sur le nombre de kilomètres parcourus en Suisse. Ici la RPLP remplace la redevance forfaitaire effective de 1985 à 2000 sur les véhicules dont le poids était compris entre 3,5 tonnes et 28 tonnes. Ce plafond, contraignant pour les entreprises de livraisons, correspond à la limite de poids maximum qui était alors autorisé en Suisse ;
- sur le poids total autorisé ;
- sur les valeurs d'émissions polluantes du véhicule.

Ainsi, le calcul de la redevance (R_c) à payer par un camion se fait de la façon suivante :

$$R_c = D_c \times P_c \times t$$

avec D_c qui correspond à la distance parcourue en Suisse (en kilomètres)

avec P_c qui correspond au poids du véhicule (en tonnes)

avec t qui correspond au taux de la redevance.

Il existe trois valeurs pour les taux : le premier s'applique aux véhicules de norme Euro 0, le deuxième à ceux de norme Euro I et le dernier à ceux de norme Euro II et III.

| Catégories d'émissions | 2001-2004 | 2005-2007 | 2008-... |
|------------------------|-----------|-----------|----------|
| Taux moyen | 0,011 | 0,016 | 0,018 |
| Euro 0 | 0,0136 | 0,0197 | 0,0214 |
| Euro I | 0,0114 | 0,0168 | 0,0187 |
| Euro II et III | 0,0096 | 0,0168 | 0,0187 |

Tableau 11 : Taux de la redevance (en €/t.km)

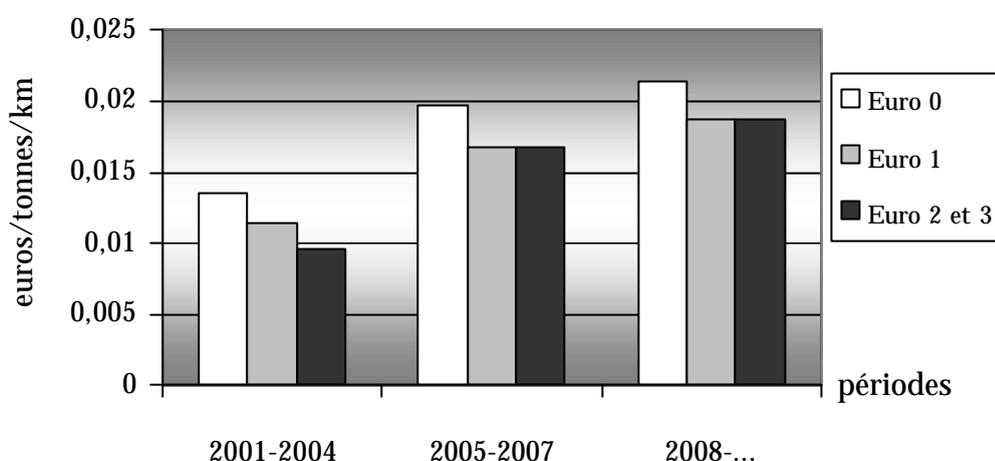


Figure 8 : Evolution des montants du taux de redevance (Source : G. ABADIE, 2002)

La valeur du taux de redevance a été obtenue en divisant le montant actuel des coûts externes (780 millions d'euros) par l'estimation du nombre total de tonnes/kilomètres effectués par les poids lourds sur le territoire helvétique (47 milliards de tonnes/kilomètres).

La figure ci-après traduit la méthode de calcul de la RPLP¹¹² à partir de plusieurs cas pour 300 kilomètres parcourus en Suisse.

¹¹² Certains véhicules particuliers comme les autobus (type 1) et les véhicules servant d'habitation, les remorques et les poids lourds ne dépassant pas 45 km/h (type 2), sont soumis à une redevance forfaitaire qui ne dépend pas du nombre de kilomètres parcourus. Cette redevance sur le trafic des poids lourds forfaitaire (RPLF) se situe, suivant le tonnage, entre 1100 et 2200 euros par an pour les autobus, et correspond à 450 euros par an pour les véhicules du type 2.

| Echelons tarifaires en ct. ¹ | | | Nombre de km parcourus en Suisse | Poids déterminant du véhicule tracteur et de la remorque ² | | Redevance en CHF | |
|---|------|------|----------------------------------|---|--|--|--------|
| 1 | 2 | 3 | | | | | |
| 2,88 | | x | 300 | x | sans remorque  x 18t | 155,50 | |
| | 2,52 | x | 300 | x | véhicule tracteur et remorque  x 30t | 226,80 | |
| | 2,52 | x | 300 | x | véhicule articulé ³  x 30t | 226,80 | |
| | | 2,15 | x | 300 | x | véhicule tracteur et remorque 37 t  x 40t | 258,00 |

1) = tarif par tonne et kilomètre (tkm)

Echelon 1 = catégorie d'émissions 1 (correspond à EURO 0 e I)

Echelon 2 = catégorie d'émissions 2 (correspond à EURO II)

Echelon 3 = catégorie d'émissions 3 (correspond à EURO III-V)

2) = poids total maximum autorisé selon permis de circulation. Pour les combinaisons de véhicules (avec remorque), on additionne les poids.

3) = Pour les ensembles articulés immatriculés séparément: poids à vide du tracteur à sellette et poids total de la remorque.

Certains véhicules (p.ex. les autocars) sont taxés selon des taux forfaitaires.

Figure 9 : Exemples de calculs de la RPLP (Source : ARE, 2004)

4.2.2. Le dispositif technique de collecte (voir G. ABADIE, 2002 et ARE, 2004)

Les propriétaires dont le poids des véhicules excède 3,5 tonnes sont soumis à la RPLP. Pour les camions étrangers, l'assujettissement s'étend également au chauffeur. Les véhicules exonérés de la RPLP sont ceux utilisés par l'État, ainsi que les véhicules agricoles, les véhicules des écoles de conduite et les véhicules non polluants. L'obligation fiscale naît ou s'arrête dès l'admission ou le retrait officiels du véhicule à la circulation. De plus, il existe des réglementations particulières prévoyant des réductions partielles ou totales pour le trafic combiné route/rail ou route/bateau ou pour le transport de certaines marchandises.

Concrètement, la Suisse a mis en œuvre un dispositif technique qui repose sur des liaisons radios micro-ondes en connexion avec des appareils embarqués dans les véhicules concernés. Ainsi, les poids lourds ne sont ni interrompus, ni ralentis durant leur parcours.

Il n'est donc pas nécessaire d'aménager le réseau routier. Les appareils ont été donnés par la Confédération jusqu'en 2004 (880 euros par appareil), mais les frais de montage sont à la charge du propriétaire du véhicule (340 euros).

L'appareil embarqué, l'OBU (On Board Unit), stocke les données du véhicule (poids, catégorie d'émission, numéro d'immatriculation) et enregistre le nombre de kilomètres parcourus grâce à un tachygraphe. D'autres éléments comme la présence d'une remorque sont lus au moyen d'une carte à puce à insérer dans l'appareil.

4.3. Les premiers résultats de la redevance¹¹³

Dans un premier temps, nous avons remarqué que les prestations kilométriques s'étaient globalement stabilisées en Suisse en l'an 2000, alors qu'elles connaissaient des taux de croissance élevés les années précédentes. Toutefois, avant l'introduction de la RPLP, le flux de poids lourds augmentait de 7 % par an. On remarque que sur l'année 2001 ce flux a diminué de 5 %.

S'il y a eu quelques cas de report de la route vers le rail, c'est tout d'abord un accroissement de l'efficacité qui a été réalisé dans les transports routiers : *"la logistique s'est améliorée et le relèvement de la limite de poids autorisé a permis un taux d'utilisation plus élevé des véhicules, une meilleure exploitation des véhicules [et] les trajets à vide sont évités autant que possible"* (G. ABADIE, 2002).

A partir de 2005, il devrait y avoir un fort transfert modal vers le rail puisqu'il est prévu que la RPLP connaisse sa première augmentation.

D'un point de vue environnemental, la RPLP a également eu des effets positifs puisque, la pondération de la redevance par rapport aux émissions polluantes a entraîné un important renouvellement des véhicules anciens. Ce changement de comportement s'est répercuté sur les ventes de véhicules. On a ainsi constaté que les ventes de poids lourds de marchandises de 3,5 tonnes avaient augmenté de 45 % (Assemblée Nationale, 2004).

Enfin, concernant l'acceptabilité collective, cette démarche s'inscrit pleinement dans la volonté des citoyens. Rappelons que c'est à la suite d'un scrutin populaire en 1994 que le principe de la protection des Alpes exigeant le trafic de transit de la route vers le

¹¹³ Précisons que les coûts nouveaux entraînés par la RPLP ont été estimés à 815 millions d'euros pour les coûts de développement et 120 millions d'euros par an pour les coûts d'exploitation.

rail a été approuvé à la majorité par 67 % des voix. C'est de la même manière, en 1998, que la loi sur la RPLP a été adoptée à l'issue d'un référendum, avec 57 % de oui.

Pour conclure, rappelons que la RPLP s'appuie sur une tarification variable qui devrait atteindre son plus haut niveau en janvier 2008. Pendant la première année d'opération, le montant des revenus a été estimé à 500 millions d'euros, soit environ 0,2% du PIB de la Suisse. D'après les estimations officielles, les produits annuels de 2005 à 2007 devraient s'élever à environ 1 milliard d'euros et, à partir de 2008, atteindre un niveau annuel de 1,2 milliard d'euros.

Si cette expérience ne s'inscrit pas directement dans le cadre de la thèse, elle peut toutefois être appliquée dans un contexte urbain. En effet, les autorités pourraient envisager de mettre en place une tarification kilométrique de cordon. Ainsi tous les véhicules paieraient en fonction de la distance parcourue dans la zone concernée. Enfin, une modulation horaire des tarifs, corrélée avec le niveau de circulation (et de congestion), pourrait être mis en œuvre dans les villes concernées.

Conclusion

Ce Chapitre V avait pour but de présenter quelques exemples d'application de la tarification de la congestion automobile en ville. Les expériences de Singapour et Londres renvoient directement aux chapitres II, III et IV de la thèse. Nous avons abordé ici deux péages urbains dont l'objectif premier est clairement la réduction des déplacements automobiles dans une zone déterminée de la ville. La redistribution des bénéfices nets des péages vers des modes alternatifs est également un élément pris en considération dans le cas de Londres. Outre le fait qu'ils ne se situent pas en ville mais sur des autoroutes, les péages californiens sont différents pour plusieurs raisons. L'objectif recherché dans ce cas est notamment la qualité d'un service proposant un gain de temps significatif pour les automobilistes pressés. Les voies expresses ne visent pas non plus à réduire la circulation automobile. De plus les tarifs proposés doivent permettre au gestionnaire de réaliser un bénéfice net pour entretenir la voirie. Enfin, comme cela a été évoqué en conclusion de la section 4, l'expérience suisse, avec quelques modifications déjà suggérées, peut toutefois être appliquée dans un contexte urbain.

Dans le tableau ci-dessous, nous avons fait un récapitulatif des expériences présentées ici avec leurs différents objectifs.

| Expériences | <u>Objectifs de la tarification :</u> | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------|--|
| | Régulation de la circulation | Différenciation des produits | Prélèvement des recettes | Réduction des externalités environnementales |
| Singapour | Oui | Non | Non | Non |
| Londres | Oui | Non | Oui | Non |
| Orange County/ San Diego | Oui | Oui | Oui | Non |
| RPLP Suisse | Non | Non | Oui | Oui |

Tableau 12 : Les objectifs des tarifications en fonction des expériences

CHAPITRE VI

L'ACCEPTABILITE DU PEAGE DE CONGESTION :
ANALYSES DE L'ENQUETE
REALISEE EN SUISSE ROMANDE

CHAPITRE VI. L'ACCEPTABILITE DU PEAGE DE CONGESTION : ANALYSES DE L'ENQUETE REALISEE EN SUISSE ROMANDE

Introduction

Comme il a été montré lors du premier chapitre, la plupart des grandes villes européennes connaissent un fort accroissement de la circulation automobile et des effets externes qui en découlent. Avec l'instauration de plusieurs péages urbains (Singapour, San Diego, Orange County, Lyon, Marseille, Oslo, et plus récemment Londres) et le développement de cette notion dans des grands débats publics, la question de l'acceptabilité est mise en avant. Si la validité de cet instrument de régulation a été démontrée d'un point de vue théorique (voir le chapitre 1), cette mesure ne recueille pas l'approbation majoritaire des automobilistes¹¹⁴. Il semble alors important de s'attarder sur les questions et les méfiances que suscite la tarification de la congestion : la restriction de la liberté de déplacement, l'inégalité entre les automobilistes face au péage, l'affectation des recettes du péage... Lorsqu'un péage est implanté, les automobilistes ont plusieurs raisons de protester (Y. CROZET et G. MARLOT, 2001) : tout d'abord le péage est payé par ceux qui continuent à utiliser la route, ensuite il y a une perte sociale nette des automobilistes exclus, et enfin certains auteurs parle d'« amertume » qui est "*pour l'usager exclu, ce qui lui est réclamé « en trop »*" (C. ABRAHAM, 2001, p. 62).

Si les hommes politiques locaux s'intéressent à ce mode de tarification il s'avère que les citoyens en général et les automobilistes en particulier y sont plutôt opposés. Lorsque des politiques d'accompagnement sont mises en œuvre comme cela est suggéré dans les chapitres 2 et 3, qu'en est-il de l'acceptabilité du péage urbain ?

Nous allons établir dans une première section un compte rendu de plusieurs enquêtes réalisées au cours des 20 dernières années dans différentes villes d'Europe. Depuis plusieurs décennies la tarification de la congestion automobile par le péage a séduit un grand nombre d'économistes trouvant dans cette politique d'internalisation une solution salubre pour réguler la circulation urbaine. Mais il s'avère que si l'idée est attrayante d'un point de vue purement théorique, elle n'en reste pas moins fortement

¹¹⁴ Pour un compte rendu sur le passage de la théorie à la pratique voir K. SMALL et J.A. GOMEZ-IBANEZ (1998).

contestée par les automobilistes (section 2). En effet, l'acceptabilité du péage de congestion est devenu un axe de recherche principal dans les nombreux travaux portant sur la question.

L'objectif ici est de présenter les évolutions de la perception de la congestion et de l'acceptabilité du péage au cours des années et en fonction des lieux. Ensuite au cours des sections 2, 3 et 4 nous allons présenter les résultats d'une enquête effectuée en Suisse et portant sur l'acceptabilité du péage de congestion. Si la section 2 permet d'exposer les premiers résultats généraux de l'étude, les deux sections suivantes vont plus loin dans l'analyse avec l'utilisation d'un instrument de statistique : l'analyse des correspondances multiples (ACM). La section 3 exposera les "fiches d'identités" des individus interrogés et la section 4 s'intéressera aux politiques d'accompagnement du péage, permettant de le rendre plus acceptable.

Section 1. L'évolution de l'acceptabilité du péage urbain en Europe

Attentifs à l'opinion de leurs électeurs, les hommes politiques regardent à deux fois avant de prendre une décision probablement impopulaire. Le péage urbain correspond aux yeux de certains automobilistes à une nouvelle taxe augmentant ainsi le coût global de déplacement. L'expression populaire "vache à lait" est souvent utilisée pour qualifier l'automobile et les décideurs doivent mettre en œuvre une vaste politique d'information pour réduire les hostilités au péage.

A partir d'une revue de la littérature rendant compte de différentes enquêtes, nous allons observer de quelles manières sont perçues les externalités de l'automobile (1.1.), le péage de congestion (1.2.) et la redistribution des recettes (1.3.).

1.1. Perception de la congestion et des externalités de l'automobile

Certaines études, relativement anciennes, permettent de présenter le niveau de perception de congestion par les individus au cours des vingt dernières années. Ainsi, plusieurs enquêtes réalisées par le British Social Attitudes Survey (R. JOWELL, S. WITHERSPOON et L. BROOK, 1990) rendent compte de cette évolution en Grande-Bretagne au cours des années 80. Le bruit et la dégradation de la ville étaient perçus comme des problèmes importants pour 23% des personnes interrogées en 1983 et pour 31% en 1989. La congestion et ses effets externes (pollution et sécurité) sont perçus comme des éléments « *sérieux* » ou « *très sérieux* » par 80% des personnes interrogées en Angleterre et par 95% dans les grandes cités anglaises (P. JONES, 1991).

Dans une prospection réalisée en Grande-Bretagne et présentée dans le rapport RAC report of Motoring (2000), la congestion automobile est considérée comme un problème important par 83% des personnes interrogées (en 1999) alors qu'il ne l'était que pour 72% en 1995. Paradoxalement, dans cette même enquête la perception de la pollution par les individus a diminué (passant de 71% en 1995 à 60% en 1999). Une autre étude (S. ISON, 2000), plus particulière puisque seuls les décideurs, experts et représentants de groupes de pression étaient interrogés, présente des résultats similaires (83,6% des personnes interrogées face à la congestion et 73,1% face à la pollution).

P. JONES (1995) fait part des résultats d'une enquête à dimension européenne dont les résultats fluctuent entre 27% au Danemark et 84% en Italie avec une moyenne de 59% des personnes qui ressentent la congestion comme un problème important. Mais

d'un point de vue plus environnemental, 78% des personnes interrogées sont conscientes des détériorations engendrées par le trafic routier.

Une enquête de grande envergure à l'échelle européenne a été réalisée à l'automne 1999 dans 8 grandes villes européennes. Le projet PRIMA (2000), permet de faire le lien entre les villes qui connaissent déjà une forme de péage urbain (Oslo, Lyon, Marseille, Barcelone) et celles qui n'en ont pas encore (Stockholm –à l'époque la mise en place avait échoué, Rotterdam, Bern, Zurich). Les résultats sont très différents suivant les villes : la congestion est perçue comme un problème majeur par 35% des personnes interrogées à Rotterdam, par 41% à Bern, par 43% à Oslo, par 61% à Stockholm, par 63% à Zurich, par 87% à Barcelone, par 91% à Marseille et à Lyon. Ces résultats hétérogènes permettent de souligner que la tarification d'Oslo est relativement efficace d'un point de vue de la régulation de la circulation (puisque'il y a seulement 43% des individus interrogés qui ressentent la congestion comme un problème important). Ensuite les autres villes sans péage dont le taux de perception de la congestion est inférieur à 50% ne nécessitent donc pas, au regard des personnes interrogées, un péage de congestion (Rotterdam et Bern).

La figure 1, ci-après, permet de mettre l'accent sur plusieurs points. En premier lieu la congestion est perçue comme un facteur nuisible dans la plupart des enquêtes post-1990 et de façon plus significative dans les études anglaises (RAC GB-1995, RAC GB-1999, ISON GB-2000) par rapport à celles concernant l'ensemble de l'Europe (JONES EURO-1995, ISON GB-2000). Ensuite, contrairement à la congestion, la perception négative des effets externes de l'automobile sur l'environnement ressort dans toutes les enquêtes.

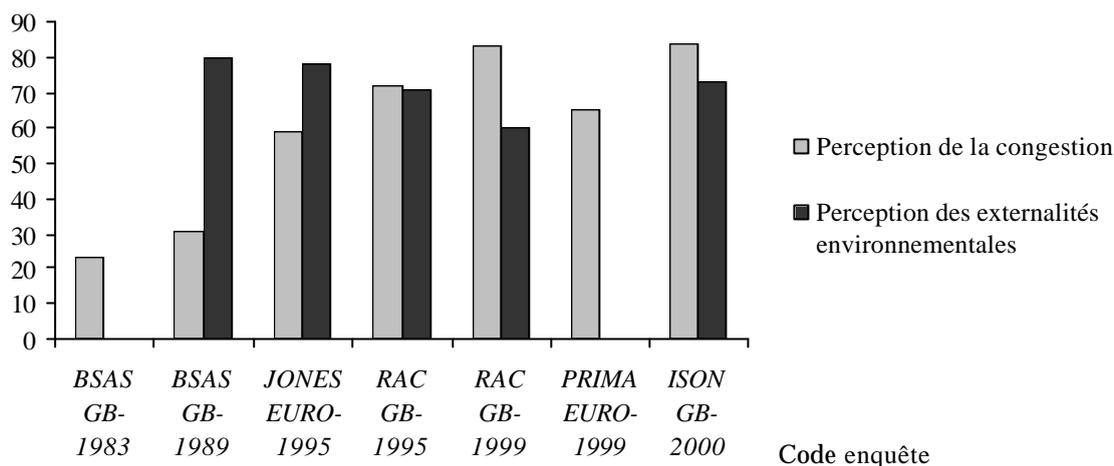


Figure 1 : Perception de la congestion¹¹⁵

1.2. Perception du péage de congestion

Afin de rendre plus fluide la circulation en milieu urbain, les autorités peuvent proposer d'instaurer soit des politiques tarifaires¹¹⁶ (péage de congestion, péage de stationnement, taxation sur les carburants, taxation kilométrique...), soit d'instaurer des politiques réglementaires (interdiction, circulation alternée...).

Le rapport PRIMA (2000) auquel nous avons déjà fait référence rapporte que le péage a une acceptabilité qui varie selon les villes : 39% à Oslo, 37% à Stockholm, 29% à Rotterdam, 28% à Zurich, 27 % à Bern, 24% à Barcelone, 18% à Marseille et 16% à Lyon. Ces résultats soulignent que "les problèmes d'acceptabilité résultent en partie d'un simple comportement opportuniste des usagers, qui préfèrent conserver l'avantage de la gratuité" (Y. CROZET et G. MARLOT, 2001, p.81). On peut rapprocher ces chiffres de ceux évoqués plus haut, puisque les villes où le péage est le plus fortement rejeté sont celles où la congestion automobile est la plus ressentie. Ceci nous permet d'émettre la proposition suivante :

¹¹⁵ Avec BSAS GB-1983 pour l'enquête British Social Attitudes Survey en Grande-Bretagne datée de 1983, BSAS GB-1989 pour British Social Attitudes Survey en 1989, JONES EURO-1995 pour Jones dans l'Europe en 1995, RAC GB-1995 pour RAC report of Motoring en Grande-Bretagne datée de 1995, RAC GB-1999 pour RAC report of Motoring en Grande-Bretagne datée de 1999, PRIMA EURO-1999 pour l'enquête européenne PRIMA faite en 1999 et ISON GB-2000 pour Ison (2000) en Grande-Bretagne.

¹¹⁶ Voir la section 2 du Chapitre I.

PROPOSITION 1 : *Lorsque la congestion est fortement ressentie, les automobilistes supposent qu'un péage de congestion ne ferait qu'accroître leur coût de déplacement (c'est à dire que le gain de temps obtenu avec le péage est trop faible par rapport au tarif du péage).*

Il est important de préciser que le péage de congestion est malgré tout l'instrument tarifaire préféré des personnes interrogées dans les huit villes (sauf à Bern et à Zurich) devant les parkings payants et l'augmentation des taxes sur les carburants.

Concernant la Grande-Bretagne, P. JONES (1995) fait part de résultats identiques fluctuant entre 4% d'acceptabilité et 38% selon les lieux et dates des enquêtes avec une moyenne de 25%. L'étude RAC (2000) fait apparaître que 58% des personnes interrogées sont opposées au péage de congestion.

L'étude spécifique de S. ISON (2000), citée ci-dessus, présente des résultats originaux puisque l'on demandait aux experts, politiques et groupes de pression si les instruments proposés seraient *efficaces* pour réduire la congestion automobile en ville, et il ressort que le péage de congestion est considéré comme efficace par 81,6% des personnes interrogées. En outre, l'interdiction de circuler en centre-ville serait efficace pour 87,4%, le développement des transports collectifs pour 77,4%, les parkings payants pour 73,6%, les parkings-relais (park+ride) pour 67,8%, l'augmentation des taxes sur le carburant pour 62,1% et la création de nouvelles routes pour 26,7%. Si le péage de congestion est l'instrument tarifaire considéré comme le plus efficace pour réduire les encombrements il n'en demeure pas moins l'un des moins accepté (11,4%) par les personnes interrogées, juste après l'augmentation des taxes sur les carburants (5,6%). Viennent ensuite les parkings payants (13,5%), la création de nouvelles routes (26,7%) et l'interdiction de l'accès au centre-ville (38%). Seuls les parkings-relais (84,9%) et le développement des transports collectifs apparaissent comme des instruments acceptables. Le point intéressant de cette enquête est le fait que l'on demande à des décideurs et experts quel serait d'après eux le niveau d'acceptabilité publique du péage de congestion qu'ils considèrent comme l'instrument tarifaire le plus efficace. Les résultats montrent qu'ils sont pessimistes puisque aucune autre enquête ne présente un taux d'acceptabilité inférieur à 11,4% ; ceci nous permet de présenter une nouvelle proposition :

PROPOSITION 2 : Les décideurs et experts pensent d'emblée que le péage sera fortement rejeté par la population car cela renvoie à l'idée de l'octroi. C'est pourquoi cette politique d'internalisation est choisie à reculons.

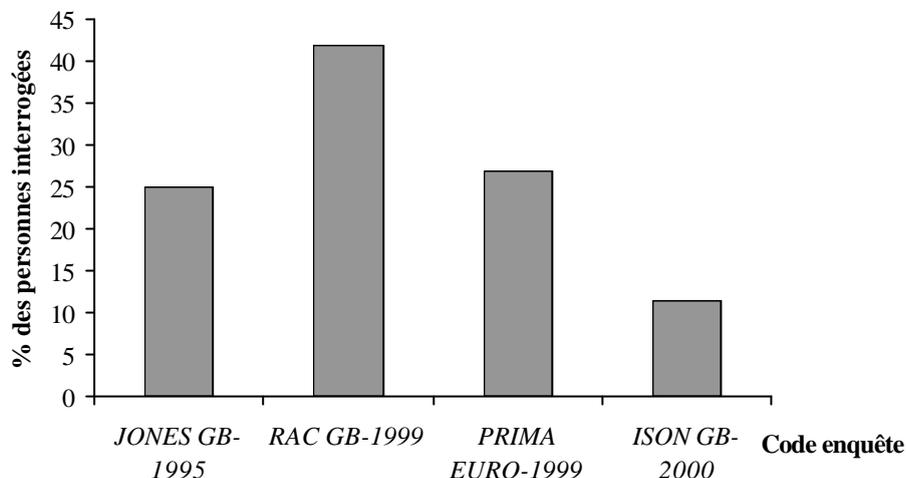


Figure 2 : Acceptabilité du péage de congestion¹¹⁷

1.3. La redistribution des recettes du péage

Quelques enquêtes permettent aussi de mettre en avant les effets positifs de l'orientation des recettes sur l'acceptabilité publique du péage urbain. Ainsi l'enquête NEDO 1991 (cité par S. ISON, 2000) fait ressortir que 62% des individus interrogés en Grande-Bretagne seraient favorables au péage si les recettes étaient affectées aux politiques de leur choix (contre 43%, s'il n'y a pas de redistribution). Spécifiquement sur les personnes interrogées à Londres, les premiers choix d'affectation sont dans l'ordre : les transports collectifs (38%), le réseau routier (25%) et les services sociaux (14%).

Concernant l'enquête PRIMA (2000), il découle qu'une grande partie des personnes interrogées souhaitent voir les recettes du péage affectées aux transports non polluants (84% en moyenne) et aux transports collectifs (80%). Ensuite l'entretien du réseau routier est une solution acceptée par 76% des personnes interrogées. L'affectation

¹¹⁷ JONES GB-1995 pour Jones en Grande Bretagne en 1995, RAC GB-1999 pour RAC report of Motoring en Grande-Bretagne datée de 1999, PRIMA EURO-1999 pour l'enquête européenne PRIMA faite en 1999 et ISON GB-2000 pour Ison (2000) en Grande-Bretagne.

des recettes vers le budget général de la municipalité est une option peu envisageable car acceptée seulement par 37%¹¹⁸.

Après cette évocation non exhaustive des enquêtes déjà réalisées, il convient de présenter l'enquête que nous avons effectuée sur Lausanne en collaboration avec le CREM (Centre de recherche en Urbistique) et avec le soutien financier de l'Office Fédérale des Routes de Suisse (OFROU).

¹¹⁸ Notons que les résultats sur ce point diffèrent de la moyenne européenne à Lyon, Marseille et Barcelone (resp. 68%, 60% et 68%).

Section 2. L'acceptabilité du péage de congestion : premiers résultats

Dans cette section, nous allons faire un compte rendu des premiers résultats et des premières conséquences de l'enquête sur l'acceptabilité des péages de congestion réalisée sur la période mai-août 2003 en Suisse Romande et plus particulièrement sur Lausanne et sa périphérie.¹¹⁹

Les enquêtes ont été réalisées par courrier (postal et Internet) et sur le terrain, en utilisant la méthode des échantillons aléatoires et la méthode des quotas ce qui certifie la représentativité de l'étude¹²⁰. Cette première analyse de l'enquête permettra de faire une étude de la mobilité des personnes interrogées, puis nous analyserons la perception de la congestion et des différentes politiques de régulation, et enfin nous nous pencherons sur l'acceptabilité du péage de congestion.

2.1. Etude de la mobilité

L'étude de la mobilité des citoyens est nécessaire pour comprendre les divergences d'opinion face au péage de congestion. Nous allons présenter les résultats concernant la répartition temporelle des individus (quelque soit le mode de transport utilisé, puis uniquement celle des automobilistes), puis la répartition modale des usagers des transports (automobile, transport collectif, deux roues...).

2.1.1. Période de pointe et répartition temporelle

Dans un premier temps, il est pertinent de faire ressortir les périodes de pointe de circulation en mettant en avant les heures de départ du domicile vers le lieu de travail (ou d'étude) pendant la matinée.

¹¹⁹ Cette enquête a été réalisée avec le concours du Centre de Recherche en Urbistique de Martigny (CREM) et avec le soutien financier de l'Office Fédéral des Routes de Suisse (OFROU/ASTRA). Le choix de la ville de Lausanne s'est fait selon plusieurs critères : forte congestion urbaine, projet de restructuration de la gestion du trafic... Dans le cadre de ce projet d'autres études sont en cours, notamment à Bâle et à Lugano.

¹²⁰ La base de l'échantillon est de 416 individus. Les échantillons sont constitués *ex-ante* suivant deux critères : localisation (centre-ville, ville, périphérie, plus loin) et la CSP (professions intermédiaires, employés et ouvriers, étudiants, sans emploi, professions intellectuelles et cadres supérieurs).

| Horaire de départ du domicile | % |
|--------------------------------------|----------------|
| 6h00-6h29 | 4,33% |
| 6h30-6h59 | 10,58% |
| 7h00-7h29 | 21,15% |
| 7h30-7h59 | 21,88% |
| 8h00-8h29 | 12,98% |
| 8h30-8h59 | 5,29% |
| après 9h | 4,81% |
| avant 6 h | 1,68% |
| variable | 7,45% |
| Non concerné | 9,86% |
| Total | 100,00% |

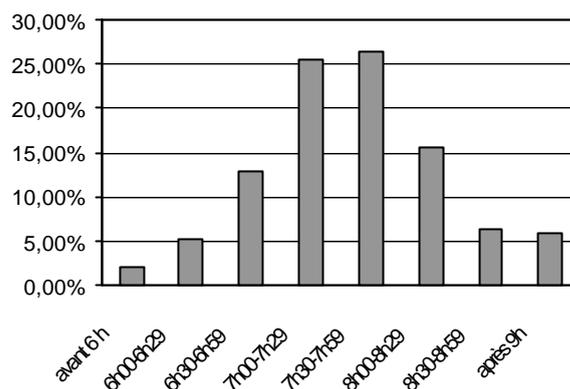


Figure 3 : Répartition horaire des départs du domicile (ensemble de la population)

Tableau 1: Répartition horaire des départs du domicile

Afin de mieux percevoir les problèmes de congestion de l'automobile durant la période matinale, voyons maintenant les heures de départ du domicile chez les automobilistes.

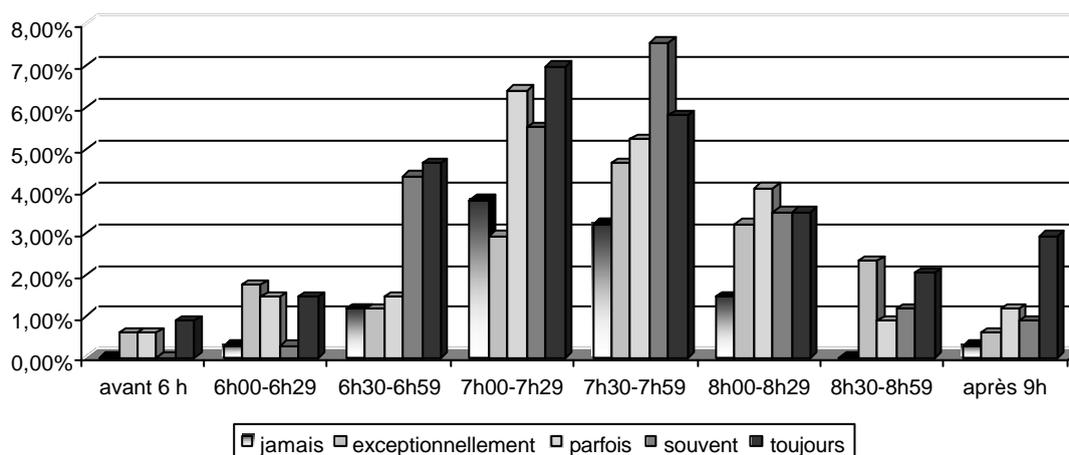


Figure 4 : Répartition horaire des départs en fonction de l'utilisation de la voiture

De ces graphiques, on constate que la période de pointe matinale est clairement définie entre 7h00 et 8h00, mais qu'elle débute déjà à partir de 6h30 pour ceux qui utilisent *toujours* et *souvent* l'automobile. Cette période s'étale jusqu'à 8h30 pour ceux qui utilisent *parfois* la voiture.

2.1.2. Répartition modale

Après avoir présenté la répartition temporelle des automobilistes sur la tranche matinale, on peut s'intéresser à la répartition modale des individus interrogés se rendant sur leur lieu de travail (ou d'étude). On observe que l'automobile est le mode de transport préféré des personnes sondées (42,05% utilisent *exclusivement* la voiture pour les déplacements domicile-travail). La voiture permet, en effet, aux usagers de faire du "porte à porte", d'avoir une plus grande souplesse d'utilisation et parfois de gagner du temps. De plus, elle est confortable et assure l'intimité des usagers.

Si la voiture est utilisée généralement de façon exclusive, de nombreux automobilistes emploient aussi d'autres modes de transports (l'automobile avec les transports collectifs publics : 7,69% ; avec la marche : 5,13% ; avec le vélo : 1,79% ; ou avec la moto : 1,79%).

| Mode de transport domicile-travail | % |
|---|----------|
| voiture | 42,05% |
| TC | 10,51% |
| marche | 8,97% |
| moto | 4,87% |
| vélo | 1,03% |
| voiture+ TC | 7,69% |
| marche+ TC | 7,44% |
| voiture+ marche | 5,13% |

| | |
|---------------------|----------------|
| vélo+TC | 3,08% |
| voiture+ marche+ TC | 2,05% |
| voiture+ moto | 1,79% |
| voiture+ vélo | 1,79% |
| TC+ moto | 1,03% |
| vélo+ marche | 0,77% |
| vélo+ moto | 0,51% |
| Trois modes et plus | 1,30% |
| Total | 100,00% |

Tableau 2 : Répartition modale des travailleurs et étudiants

Les transports collectifs (autobus, tramway, train) sont le deuxième mode le plus utilisé par les travailleurs avec 10,51% des personnes interrogées. Ils sont nécessaires pour offrir l'accessibilité à l'emploi et aux loisirs à tous les citoyens, qu'ils disposent ou non de

l'usage d'un mode de transport individuel. Ils apportent une contribution déterminante à l'aménagement du territoire et à la qualité de la vie en ville.

Ensuite viennent les autres modes de transports individuels avec la marche (8,97%), la moto (4,87%) et le vélo (1,03%). La marche à pied a un champ d'action qui est restreint aux trajets de courte distance, qu'il s'agisse de liaisons de bout en bout ou de trajets terminaux suivis ou précédés de l'utilisation d'autres moyens de transports (7,44% avec les transports collectifs, 5,13% avec la voiture et 2,05% avec la voiture et les transports collectifs). Pour beaucoup, elle est synonyme de vie urbaine et également facteur de santé.

2.1.3. Etude des variables continues de l'enquête (temps de trajet et distance parcourue)

Dans le questionnaire il y a trois variables continues : le temps de trajet, la distance parcourue et la valeur du temps. Nous ne nous attarderons pas sur la question complexe de la valeur du temps qui a été posée à titre purement indicatif. D'autres études spécifiques permettent de déterminer ce concept et de donner une valeur plus juste au temps¹²¹.

Concernant la variable du temps de trajet, on peut calculer la moyenne (en sommant la valeur totale des observations et en divisant par le nombre d'observations – donc d'individus) du temps de trajet parcouru pour se rendre sur le lieu de travail (ou d'étude). Ainsi elle est d'environ 19 minutes.

Pour la variable de la distance parcourue, la moyenne est d'environ 16,376 kilomètres.

A partir de ces résultats de base de statistique descriptive, on recherche la corrélation entre ces deux variables à l'aide du logiciel de traitement de données SPAD¹²². Le coefficient de corrélation entre le temps de trajet et la distance parcourue est de 0,256 (on divise la covariance de l'échantillon par le produit des écarts type des deux variables). Cela signifie que la relation linéaire entre les deux variables est faible.

¹²¹ Voir par exemple les récents travaux de E. QUINET (2005) et ceux de A. DE PALMA et C. FONTAN (2001).

¹²² Le logiciel SPAD, conçu par DECSISIA (<http://www.cisia.com>), permet de réaliser des analyses statistiques complexes.

2.2. La perception de la congestion et des politiques de régulation

Avant d'aborder la question de l'acceptabilité du péage de congestion, nous allons analyser la perception générale de la congestion et le point de vue des individus face aux différentes politiques de régulation de l'automobile en ville.

2.2.1. La perception générale de la congestion

Le premier point qui nous semble important d'évoquer ici correspond à la perception générale de la congestion automobile en ville (tableau 4). La question posée était la suivante : « *quelle importance donnez-vous aux problèmes suivants (ici, la congestion) lorsque vous utilisez la voiture ou la moto lors de vos déplacements en ville ?* »

| Congestion | % | somme |
|-----------------------|----------------|----------------|
| très important | 32,21% | 67,31% |
| assez important | 35,10% | |
| pas très important | 20,91% | 27,64% |
| pas du tout important | 6,73% | |
| Pas de réponse | 5,05% | 5,05% |
| Total | 100,00% | 100,00% |

Tableau 3 : Importance de la congestion automobile en ville

Les résultats sont significatifs, puisque plus de 2 personnes interrogées sur 3 (67,31%) ressentent les encombrements en ville comme un problème *assez important* ou *très important*. Nous pourrions supposer que les 27,64% d'individus qui ne perçoivent pas la congestion comme un problème important ne sont pas des grands automobilistes et qu'ils n'utilisent que très rarement leur voiture. C'est en partant de cette hypothèse « simple » que l'on peut réaliser le tableau croisé ci-dessous (tableau 4) où l'on compare la fréquence d'utilisation de l'automobile avec le sentiment de congestion.

A l'aide de la figure 5 ci-dessous, on constate que la fréquence d'utilisation de l'automobile n'est pas déterminante corrélativement à l'importance donnée aux encombrements urbains.

| | | Utilisation de la voiture | | | | | Total |
|------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|-----------------|-------------|
| | | <i>jamais</i> | <i>exceptionnelle- ment</i> | <i>parfois</i> | <i>souvent</i> | <i>toujours</i> | |
| Congestion | <i>très important</i> | 2,64% | 6,01% | 7,93% | 7,45% | 8,17% | 32,21% |
| | <i>assez important</i> | 3,85% | 6,49% | 7,69% | 8,41% | 8,65% | 35,10% |
| | <i>pas très important</i> | 1,20% | 3,61% | 3,85% | 6,25% | 6,01% | 20,91% |
| | <i>pas du tout important</i> | 1,20% | 0,96% | 1,20% | 0,72% | 2,64% | 6,73% |
| | <i>pas de réponse</i> | 3,13% | 0,48% | 0,72% | 0,48% | 0,24% | 5,05% |
| | Total | 12,02% | 17,55% | 21,39% | 23,32% | 25,72% | 100% |

Tableau 4 : Importance de la congestion en ville en fonction de l'utilisation de l'automobile

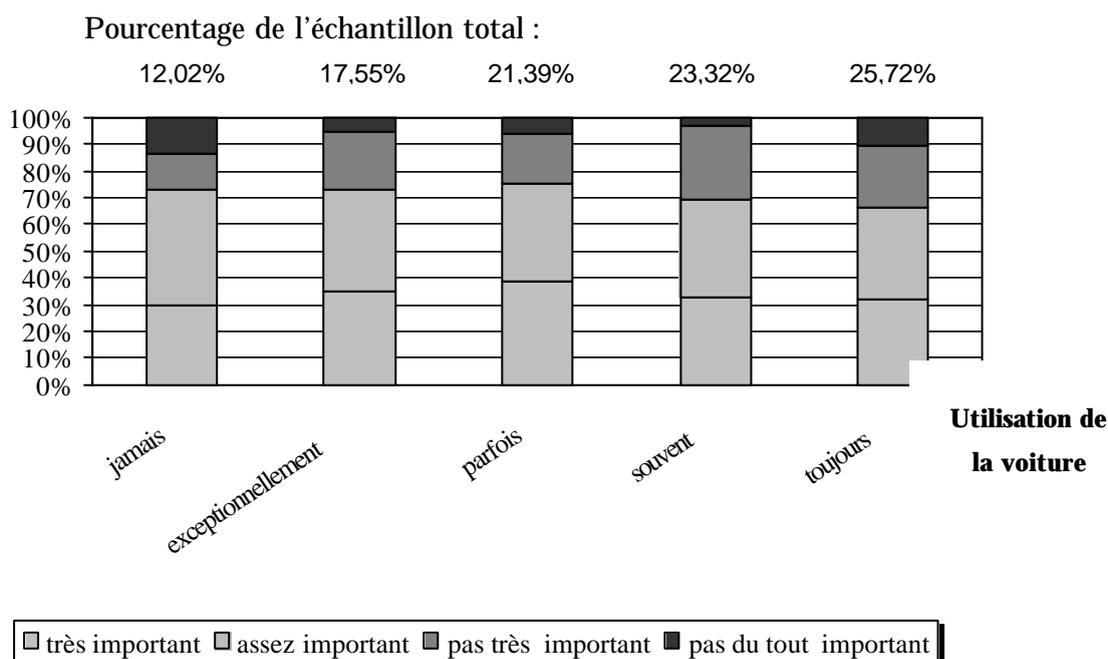


Figure 5 : Perception de la congestion en fonction de la fréquence d'utilisation de l'automobile

Toutefois, en regardant de plus près les résultats, on remarque que c'est parmi les automobilistes qui utilisent « souvent » et « toujours » l'automobile qu'il y a la part la plus importante des individus qui ne ressentent pas comme « importants » les problèmes de congestion. En effet, sur les 49,04 % de personnes interrogées qui utilisent « souvent »

ou « toujours » l'automobile, presque 1/3 ne perçoit pas le problème de la perte de temps due aux encombrements. Et si les automobilistes qui n'utilisent pas souvent leur voiture ressentent les problèmes de congestion comme importants, cela peut être justement expliqué par le fait qu'ils se sont orientés vers un autre mode de déplacement (transports collectifs publics, vélo, etc.) car ils supportaient une forte perte de temps à cause des ralentissements automobiles.

Nous pouvons aussi suggérer que les personnes qui n'utilisent jamais leur voiture sont des habitants du centre-ville, et que ceux-ci perçoivent la congestion automobile comme une des composantes des coûts sociaux de l'automobile dont ils supportent les désagréments.

Sur la figure 6, on remarque en effet que la congestion touche les habitants de toutes les zones d'habitation, de façon moindre toutefois pour ceux résidants en « *périphérie* » et « *plus loin* ». L'explication vient du fait que parmi les habitants de la périphérie, tous ne travaillent pas en ville et il est fort probable que certains d'entre eux ne connaissent ni la congestion sur le lieu de leur logement, ni sur le trajet en direction de leur lieu de travail. Les résidents du centre-ville (et de la ville en général) connaissent la congestion et les autres effets externes de l'automobile, même s'ils ne travaillent pas en zone urbaine.

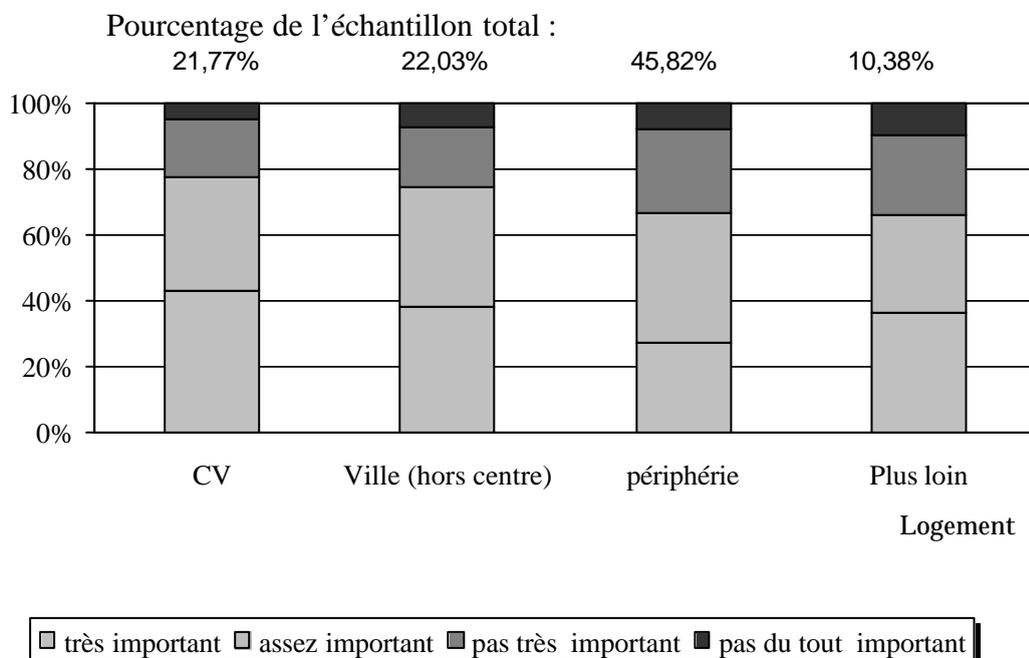


Figure 6 : Perception de la congestion en fonction du lieu d'habitation

| | | Logement | | | | |
|------------|------------------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------|----------------|
| | | CV | Ville (hors centre) | Périphérie | Plus loin | Total |
| Congestion | <i>très important</i> | 9,37% | 8,35% | 12,41% | 3,80% | 33,92% |
| | <i>assez important</i> | 7,59% | 8,10% | 18,23% | 3,04% | 36,96% |
| | <i>pas très important</i> | 3,80% | 4,05% | 11,65% | 2,53% | 22,03% |
| | <i>pas du tout important</i> | 1,01% | 1,52% | 3,54% | 1,01% | 7,09% |
| | Total | 21,77% | 22,03% | 45,82% | 10,38% | 100,00% |

Tableau 5 : Importance de la congestion en ville en fonction du logement

2.2.2. Autres externalités négatives

Au delà de l'externalité de congestion ressentie par les automobilistes, il existe un autre problème majeur dans la gestion du trafic urbain : la politique de stationnement. Le manque de places de parking et le niveau des prix de stationnement sont perçus comme des problèmes « très » et « assez importants » pour 73,56% (nombre de places) et pour 63,70% (prix) des personnes interrogées.

| | <i>manque de parking</i> | <i>prix parkings élevés</i> |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| <i>très important</i> | 37,50% | 32,21% |
| <i>assez important</i> | 36,06% | 31,49% |
| <i>pas très important</i> | 15,87% | 23,32% |
| <i>pas du tout important</i> | 6,01% | 7,93% |
| <i>nc</i> | 4,57% | 5,05% |
| Total | 100,00% | 100,00% |

Tableau 6 : Niveau d'importance des problèmes de parking en ville

Il semble essentiel aussi de relever l'avis des piétons interrogés (en général des résidents de la ville). En effet, la pollution de l'air est perçue comme un problème

important pour plus de 3 personnes interrogées sur 4 (dont 42,79% de « *très important* »). Ce chiffre marquant n'est pas à négliger et s'inscrit dans une problématique environnementaliste de la gestion de la circulation, puisque le bruit est également ressenti comme « *important* » pour près de 60% de l'échantillon interrogé. Il va de soit que les piétons sont demandeurs d'une politique de régulation de la circulation en ville.

| | <i>pollution air</i> | <i>bruit</i> | <i>manque d'espace</i> |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| <i>très important</i> | 42,79% | 29,81% | 20,19% |
| <i>assez important</i> | 33,89% | 28,85% | 30,77% |
| <i>pas très important</i> | 17,31% | 30,53% | 30,29% |
| <i>pas du tout important</i> | 4,57% | 9,38% | 16,59% |
| <i>nc</i> | 1,44% | 1,44% | 2,16% |
| Total | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

Tableau 7 : Perception des externalités par les piétons

2.2.3. Les différentes politiques de régulation

Afin de réduire les externalités de congestion, et par extension les autres effets externes négatifs, les autorités se retrouvent face à une multitude de choix plus ou moins acceptables pour la population. Le tableau 8 récapitule le niveau d'acceptation des différents instruments de régulation.

L'instrument qui fait l'unanimité est sans équivoque le développement des transports collectifs (à savoir diminution du prix du billet, étalement du réseau, accroissement du confort...) avec plus de 90% des personnes interrogées qui soutiennent cette politique. Elle a pour objectif d'offrir un mode de transport alternatif aux automobilistes et ainsi de diminuer l'usage de la voiture en ville en transférant une part de la demande vers les transports collectifs publics. Des subventions publiques élevées permettront de réduire le prix du billet et de rendre le mode de transport collectif plus attractif.

| | TC performants | Respon-sabiliser | restreindre | voies gratuites | péage de congestion | augmenter taxes sur l'essence | augmenter prix des stationnements | voies payantes |
|----------------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| tout à fait d'accord | 67,07% | 44,23% | 26,92% | 20,67% | 12,98% | 8,41% | 6,97% | 2,64% |
| plutôt d'accord | 23,32% | 31,01% | 25,96% | 22,84% | 24,28% | 9,86% | 12,98% | 11,78% |
| plutôt pas d'accord | 3,13% | 9,86% | 18,51% | 16,59% | 18,75% | 17,55% | 22,36% | 19,95% |
| pas du tout d'accord | 3,13% | 10,82% | 25,96% | 30,05% | 41,11% | 60,34% | 54,57% | 56,73% |
| nc | 3,37% | 4,09% | 2,64% | 9,86% | 2,88% | 3,85% | 3,13% | 8,89% |
| Total | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

Tableau 8 : Acceptabilité des différentes politiques de régulation

La responsabilisation, qui peut se caractériser par une campagne d'information, est sollicitée par plus de 3 personnes sur 4. La restriction de l'accès aux zones encombrées – déjà en place dans certaines villes européennes – est perçue comme une bonne solution par 52,88% des personnes interrogées. Cette option, radicale, permet de mettre tous les automobilistes au même niveau. La création de nouvelles voies n'est pas une solution majoritairement acceptée, car si une part des piétons ressent déjà un manque d'espace (50,96%), il semblerait contradictoire de vouloir développer le réseau routier urbain. Historiquement, en réponse aux phénomènes de congestion, les décideurs ont investi dans de nouvelles infrastructures routières ce qui n'a fait que renforcer et amplifier les nuisances, entraînant les villes dans une spirale infernale où l'offre de voirie génère à nouveau la croissance du trafic automobile et la saturation des artères de circulation. Sur ce point, les personnes interrogées apparaissent avoir compris le risque de dérive qu'engendrerait la création de nouvelles routes.

Ensuite, parmi les solutions tarifaires, la plus acceptée est le péage de congestion (avec 37,8%) devant les taxes sur les carburants, l'augmentation des prix de stationnement et devant la création de routes payantes. Cette distinction entre les politiques tarifaires et les autres (réglementaires...) s'explique par le fait que les individus ne veulent pas accepter des solutions contraignantes pour eux, en tant qu'automobilistes, bien qu'ils perçoivent les réels problèmes d'encombrement en ville.

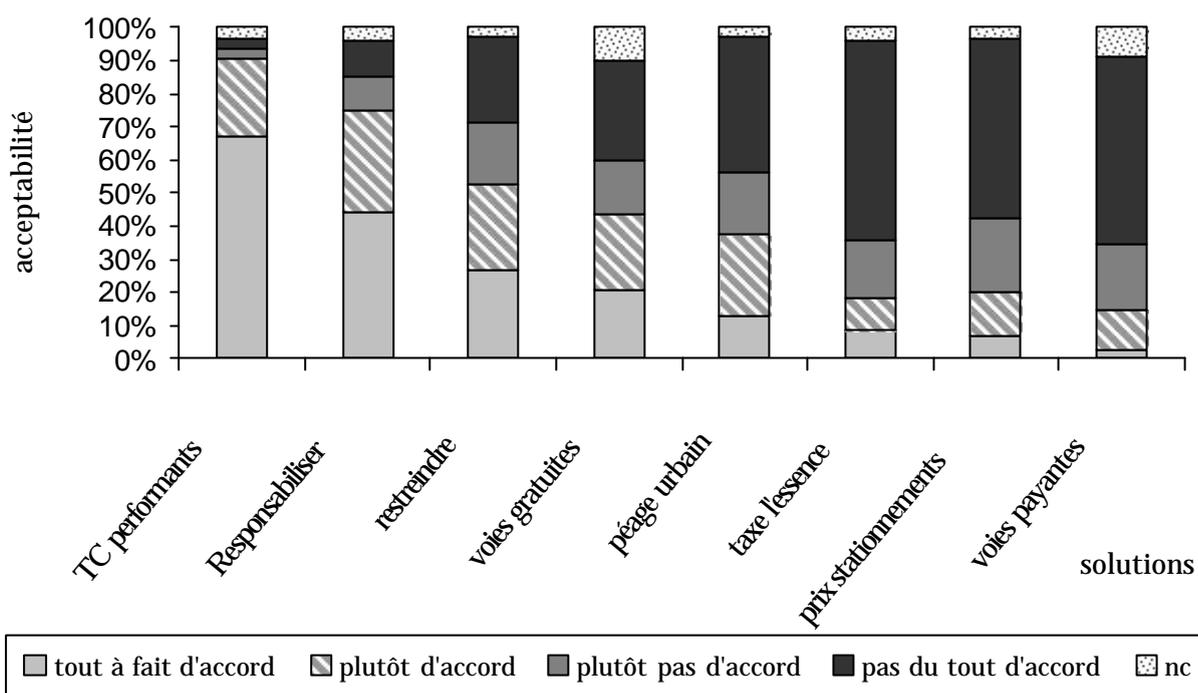


Figure 7 : Acceptabilité des différentes politiques de régulation

2.3. L'acceptabilité du péage de congestion et redistribution des recettes

Nous avons vu au cours du premier chapitre que pour contrecarrer les problèmes de congestion, différentes politiques de régulation (ou de réduction) de la circulation automobile sont envisageables. Outre les interdictions d'accès au centre-ville, il existe donc plusieurs types d'instruments tarifaires comme la taxation sur les carburants, le péage de stationnement, les subventions pour les transports collectifs ou la tarification de la congestion grâce à un péage urbain. Nous allons axer notre analyse spécifiquement sur le niveau d'acceptabilité de cette dernière politique.

2.3.1. L'acceptabilité du péage de congestion

A la question : « Selon vous, faudrait-il instaurer un péage pour circuler dans le centre-ville afin de remédier aux problèmes d'embouteillages et de dégradation environnementale causée par l'automobile ? », les personnes interrogées sont apparues hostiles à l'idée que soit mis en place un péage de congestion (comme cela est révélé ci-dessous avec 61,64% contre 38,37%).

| Péage de congestion | % | somme |
|----------------------------|----------------|----------------|
| pas du tout d'accord | 42,33% | 61,64% |
| plutôt pas d'accord | 19,31% | |
| plutôt d'accord | 25,00% | 38,37% |
| tout à fait d'accord | 13,37% | |
| Total | 100,00% | 100,00% |

Tableau 9 : L'acceptabilité générale du péage de congestion

Néanmoins il est indispensable d'orienter cette phase d'étude en considérant précisément la perception du péage de congestion en fonction de l'utilisation de l'automobile. Car si la plupart des individus (automobilistes ou non) ressentent la congestion comme un problème important qu'il faut résoudre, le sentiment vis à vis du péage ne sera pas le même pour tous dans la mesure où seuls les automobilistes paient.

| | | Utilisation de la voiture | | | | | |
|--------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|
| | | jamais | exceptionnellement | parfois | souvent | toujours | Total |
| péage | pas du tout d'accord | 2,97% | 4,70% | 8,42% | 10,64% | 15,59% | 42,33% |
| | plutôt pas d'accord | 1,98% | 2,48% | 4,46% | 5,94% | 4,46% | 19,31% |
| | plutôt d'accord | 3,71% | 4,95% | 5,94% | 5,20% | 5,20% | 25,00% |
| | tout à fait d'accord | 2,72% | 4,70% | 2,72% | 1,98% | 1,24% | 13,37% |
| | Total | 11,39% | 16,83% | 21,53% | 23,76% | 26,49% | 100% |

Tableau 10 : L'acceptabilité du péage de congestion en fonction de l'utilisation de la voiture

Nous avons donc effectué une analyse croisée *perception du péage/utilisation de la voiture* (Tableau 10 et Figure 8) qui nous permet d'apporter quelques éléments :

- Les individus interrogés qui n'utilisent que « *jamais* » ou « *exceptionnellement* » l'automobile sont pour plus de la moitié favorables à l'idée d'instaurer un péage de congestion permettant de réguler la circulation (16,08% sur 28,22%, soit 56,9% des utilisateurs « *rare*s » de la voiture). Ce résultat peut s'interpréter en suggérant que si la circulation devient plus fluide ils utiliseront à nouveau leur automobile plus régulièrement. Cela peut-être une des raisons de l'optimisme à l'égard du péage urbain. Mais également une partie de ces personnes rejettent l'automobile car ils en subissent les effets externes en tant qu'utilisateurs de transports collectifs, de vélo ou simplement en tant que piétons. Pour eux, toutes les propositions de politiques permettant de réduire la place de la voiture dans la cité sont à prendre en considération ;

- Ensuite, les automobilistes « *réguliers* » sont hostiles à la création d'un péage (49,51% sur 71,78%, soit 68,9 % de l'ensemble des automobilistes « *réguliers* »). Si la congestion est perçue comme un réel problème parmi les automobilistes et que nombreux sont ceux qui souhaitent voir la situation s'améliorer, peu sont prêts à changer de comportement (s'orienter vers les transports collectifs, changer d'horaire de départ, s'acquitter d'une taxe incitative...). Il apparaît donc important de centrer une grande partie de la politique d'information sur cette portion de l'échantillon. Quelles politiques d'accompagnement souhaitent-ils voir se développer en parallèle ? Se sentent-ils concernés par l'ensemble des effets externes de l'automobile ? Pour eux, vers où doivent être orientées les recettes ? Etc.

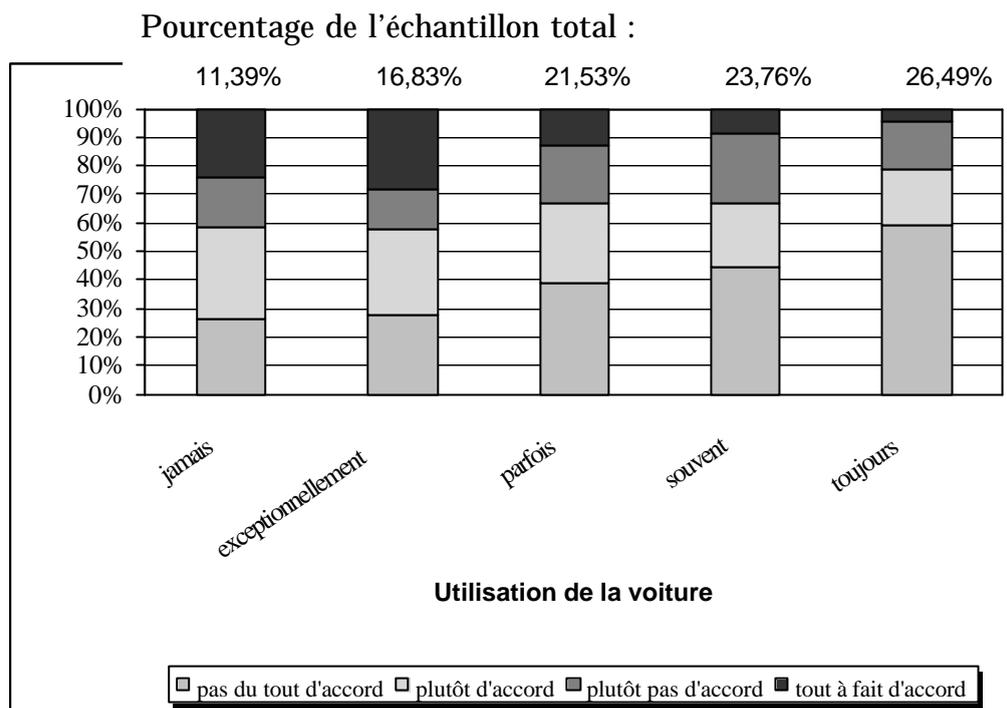


Figure 8 : Les automobilistes face au péage de congestion

2.3.2. Effets du péage sur la population

Dans un second temps, lorsque l'on demande à l'ensemble des individus interrogés quels sont les principaux effets positifs et négatifs du péage de congestion, il en ressort quatre points mis en exergue dans le tableau 11 :

| | fluidité | qualité vie | atteinte liberté | discrimination |
|--------------|-----------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|
| oui | 45,43% | 59,62% | 52,88% | 49,28% |
| non | 53,61% | 39,42% | 46,15% | 49,76% |
| nc | 0,96% | 0,96% | 0,96% | 0,96% |
| Total | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

Tableau 11 : Perception des effets du péage

Pour près de 53% des personnes le péage n'aura pas un effet bénéfique sur le niveau de congestion et la fluidité ne sera pas retrouvée.

Pour près de 60% des individus, le péage peut avoir un effet positif sur la qualité de vie en ville. Ce chiffre se retrouve en contradiction avec le premier car si le péage ne rend pas la circulation fluide, la qualité de vie en ville ne sera pas forcément retrouvée.

Ensuite, plus de la moitié des personnes interrogées ressentent le péage urbain comme une atteinte à la liberté de déplacement. En effet, l'accès à un bien gratuit devenu payant est souvent perçu comme une réduction de l'espace de liberté.

Enfin, pour près de la moitié de l'échantillon (49,28%), le péage est une source de discrimination entre riches (qui peuvent payer pour se déplacer) et pauvres (qui se voient contraints d'utiliser un autre mode de transport).

Afin d'agir du mieux que possible sur les effets négatifs perçus par les individus, les autorités publiques peuvent prendre la décision de mettre en œuvre une (ou plusieurs) politiques d'accompagnement afin de rendre plus facile et plus acceptable la mise en place d'un péage de congestion. Cette question sera abordée au cours de la section 3.

2.3.3. La redistribution des recettes du péage

Concernant l'affectation des éventuelles recettes du péage, les autorités se doivent de choisir qui en seront les bénéficiaires. Les automobilistes qui empruntent la voirie payante ou les usagers qui changent de mode de déplacement et subissent un coût de changement (voir problématique du Chapitre II) ? Il apparaît toutefois qu'une orientation des recettes vers les transports collectifs pourrait résoudre les problèmes d'équité soulevés par la mise en place d'une tarification de l'usage de la voirie.

| Utilisation des recettes | % |
|---|----------|
| TC | 32,93% |
| collectivité | 12,98% |
| nouvelles routes | 11,54% |
| Collectivité et TC | 5,53% |
| TC et nouvelles routes | 3,85% |
| Collectivité et nouvelles routes | 0,72% |
| les 3 solutions | 28,13% |
| n.c. | 4,38% |

Tableau 12 : Affectation des recettes du péage

Les personnes interrogées se sont donc exprimées sur ce point en faveur d'une orientation des recettes uniquement vers les transports collectifs (32,93%), puis uniquement vers la collectivité (12,98%), uniquement vers l'instauration de nouvelles routes (11,54%), vers les transports collectifs et l'ensemble de la collectivité (5,53%), vers les transports collectifs et la création de nouvelles routes (3,85%), vers la collectivité et les nouvelles routes (0,72%) et vers les trois solutions (28,13%).

On voit donc clairement que les individus soutiennent en premier lieu que les recettes du péage soient orientées vers les transports collectifs, ceci s'expliquant par le fait que les usagers des transports collectifs ressentent les tarifs des billets comme élevés (tableau 13). L'affectation d'une part des recettes du péage vers les transports publics permettrait donc de réduire le prix du billet et de développer l'étendue du réseau. Le fait que les personnes interrogées mettent en avant le développement des transports collectifs comme première politique d'accompagnement du péage de congestion confirme ce choix.

| Tarif élevé des TC | % |
|------------------------------|----------|
| très important | 28,85% |
| assez important | 26,68% |
| pas très important | 23,56% |
| pas du tout important | 12,02% |
| n.c. | 8,89% |
| Total | 100,00% |

Tableau 13 : Importance du problème du prix élevé des transports collectifs

Avec le tableau 14 et figure 9 (ci-dessous), on peut observer le choix de l'orientation des recettes en fonction du niveau d'utilisation de la voiture. Il en ressort que plus l'automobiliste utilise son véhicule, plus il souhaite voir les recettes affectées dans la construction de nouvelles routes. Et moins il l'utilise, plus il souhaite voir les recettes s'orienter vers les transports collectifs.

| Utilisation des recettes | Utilisation de la voiture | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------|---------|---------|----------|
| | jamais | exceptionnellement | parfois | souvent | toujours |
| TC | 42,86% | 47,89% | 29,76% | 36,56% | 22,77% |
| collectivité | 12,24% | 15,49% | 15,48% | 7,53% | 16,83% |
| nouvelles routes | 0,00% | 2,82% | 10,71% | 12,90% | 24,75% |
| collectivité et TC | 6,12% | 5,63% | 11,90% | 4,30% | 1,98% |
| TC et routes | 2,04% | 2,82% | 5,95% | 6,45% | 1,98% |
| collectivité et routes | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 2,97% |
| les trois | 36,73% | 25,35% | 26,19% | 32,26% | 28,71% |
| TOTAL | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

Tableau 14 : Affectation des recettes en fonction de l'utilisation de la voiture

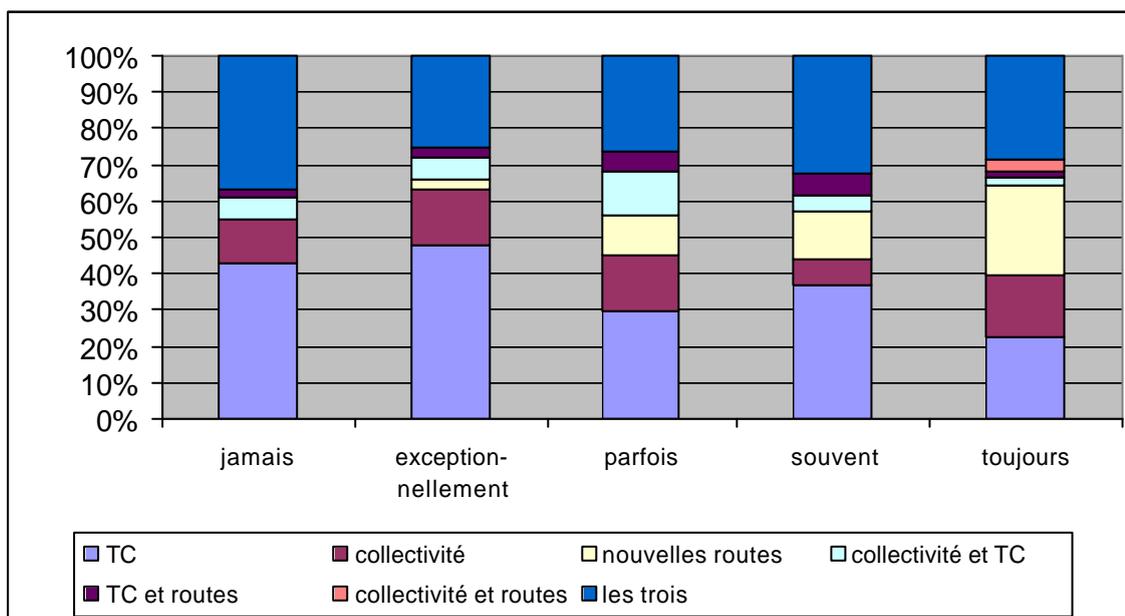


Figure 9 : Affectation des recettes en fonction de l'utilisation de la voiture

2.4. Influence électorale et perception générale

Pour conclure cette section, on peut noter que près de 70% des personnes interrogées se déclarent influencées dans leur vote ("oui" et "peut-être") en faveur de candidats politiques qui auraient opté pour la mise en place d'un péage de congestion. Plus

précisément, 43,48% affirment pouvoir être influencées positivement, c'est à dire voteront volontiers pour un homme politique dont le programme serait favorable au péage. En revanche, 56,52% seraient dissuadés de voter pour un candidat favorable à ce type de politique.

| Influence pour les élections | % |
|-------------------------------------|----------------|
| non | 30,05% |
| oui | 40,63% |
| peut-être | 29,33% |
| Total | 100,00% |

Tableau 15 : Influence du péage urbain sur le choix des élections

| Type de vote | % |
|---------------------|----------------|
| contre | 56,52% |
| pour | 43,48% |
| Total | 100,00% |

Tableau 16 : Type de vote

Enfin il est intéressant de revenir sur la dernière question qui était posée aux personnes interrogées : « comment percevez-vous le péage de congestion en général ? ». Trois réponses étaient proposées : « comme une taxe supplémentaire ; comme un moyen de diminuer la pollution ; comme un moyen de gérer le trafic ». Les réponses multiples ont été données spontanément par les individus interrogés.

Soulignons que 48,30% (tableau 17) perçoivent le péage comme une nouvelle forme de taxe sur l'automobile qui viendrait accroître les coûts directs individuels. Il est important alors de préciser que cette taxe n'a pas pour objectif de récolter des fonds mais simplement d'inciter les automobilistes à changer de comportement. Une tarification efficace régulant du mieux que possible la circulation doit permettre aux automobilistes de percevoir les avantages d'une telle politique de déplacement.

| vision générale | % | Somme |
|---|-------------|--------------|
| gestion du trafic | 25,00% | 46,36% |
| environnementale | 10,68% | |
| environnementale+ gestion du trafic | 10,68% | |
| taxe supplémentaire | 48,30% | 48,30% |
| taxe supplémentaire+ gestion du trafic | 2,43% | 5,34% |
| taxe supplémentaire+environnementale | 1,21% | |
| taxe supplémentaire+environnementale+ gestion du trafic | 1,70% | |
| Total | 100% | 100% |

Tableau 17 : Vision générale du péage de congestion

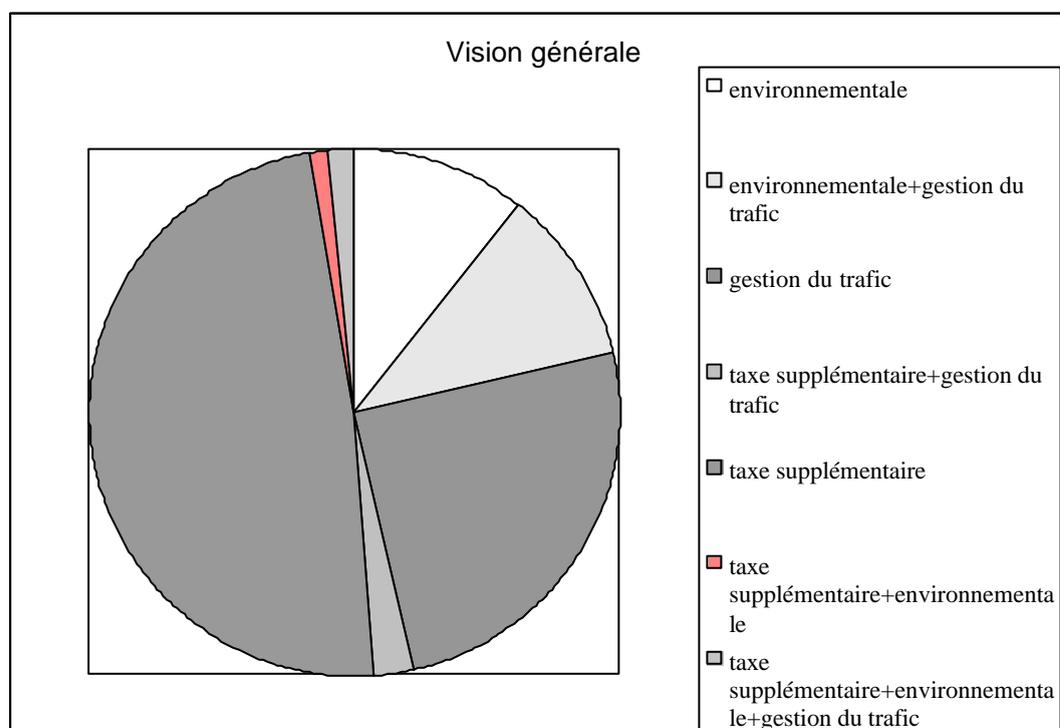


Figure 10 : Vision générale du péage de congestion

Pour beaucoup ce péage a une visée environnementale non négligeable, et si la réduction de la pollution n'est pas un objectif direct de ce type de tarification, elle en est inévitablement liée puisque des véhicules qui circulent « *au ralenti* » consomment plus d'énergie que des véhicules se déplaçant avec fluidité.

Section 3. La perception de la congestion : une analyse des correspondances multiples

Dans un second temps, nous allons axer notre travail sur les caractéristiques des individus interrogés.

Une première analyse de l'enquête a permis d'étudier la mobilité des personnes interrogées, puis dans un second temps d'analyser la perception de la congestion et du péage (section 1). Les personnes interrogées ont répondu massivement qu'elles n'étaient pas favorables à l'idée d'instaurer un péage de congestion. Qui sont ces personnes ? Cette réponse est-elle propre à la situation géographique ? A une CSP particulière ?

Afin de faire ressortir cette complexité face au péage et dans le cadre de cette section nous allons orienter notre analyse autour de la question suivante : quelle est la "fiche d'identité type" des opposants au péage ?

L'objectif de cette analyse est de regrouper des modalités de variables qui nous permettront de réaliser une analyse factorielle des correspondances multiples (ACM). Cette analyse de données a pour objectif de faire ressortir des regroupements d'individus dont les comportements aideront les décideurs à réaliser des choix en terme de politique des transports urbains. L'analyse des correspondances multiples est une des méthodes les plus utilisées en matière d'analyse des données. Elle nous permettra d'analyser les corrélations entre les différentes modalités de chaque variable choisie. Cette méthode consiste à "*rechercher des sous-espaces de faibles dimensions qui ajustent au mieux le nuage de points des individus et le nuage de points des variables*" (CISIA, 2001, p.45). Cette ACM a été réalisée à l'aide du logiciel de traitement de données français SPAD.

Dans une première étape nous allons présenter les variables choisies pour l'ACM. Puis, après apurement, nous déterminerons les valeurs propres (qui représenteront des axes factoriels). Enfin, nous déterminerons les modalités significatives de chacun des axes.

3.1. Méthodologie

3.1.1. Choix des variables actives (questions)

Cette analyse a pour but de présenter les caractéristiques des individus interrogés. Ainsi, on pourra observer le profil des personnes hostiles au péage. Dans cette optique, nous

avons choisi de sélectionner les questions propres à l'identité des individus. Les variables actives (V) que nous allons étudier sont les six questions suivantes :

- Age (4 modalités : 18-29, 30-49, 50-69, 70 et +) ;
- Sexe (2 modalités : homme, femme) ;
- CSP (5 modalités : employé/ouvrier, profession intellectuelle/cadre supérieur, étudiant/apprenti, cadre/profession intermédiaire, sans emploi) ;
- Lieu de logement (4 modalités : centre-ville, ville, périphérie, plus loin) ;
- Lieu de travail (6 modalités : centre-ville, ville (hors-centre), périphérie, plus loin, sans emploi, sans réponse) ;
- Péage de congestion : « Faudrait-il instaurer un péage de congestion pour remédier aux problèmes d'embouteillages et aux effets négatifs du trafic en ville ? » (5 modalités : tout à fait d'accord, plutôt d'accord, plutôt pas d'accord, pas du tout d'accord, sans réponse).

Le choix de ces questions va nous permettre d'analyser et expliquer plusieurs résultats et notamment les raisons « sociales » et « géographiques » qui déterminent l'opposition au péage.

3.1.2. Apurements et détermination des valeurs propres

Les faibles effectifs peuvent avoir des effets perturbateurs sur l'analyse et donc l'apurement permet de s'affranchir (artificiellement) de ces modalités. Les réponses appartenant aux modalités peu courantes seront partagées aléatoirement entre les autres modalités de la variable. L'effectif total étant relativement faible (416), sont ventilées les modalités actives dont l'effectif est inférieur à 2%. "Les modalités rares concernent souvent les mêmes individus qui forment alors un sous-nuage très concentré sur lui-même mais loin de tous les autres points " (CISIA, 2001, p.74). Ceux-ci rendent parfois instables les axes factoriels et l'apurement vise donc à rendre plus robuste l'analyse. Les modalités ne sont pas abandonnées pour autant, elles seront positionnées en éléments supplémentaires.

Le poids total des individus actifs est de 416 et nous avons choisi d'éliminer les modalités dont le poids est faible (inférieur à 2% du poids total, soit 8,32). Ainsi, après

apurement l'analyse ne prend en compte que 25 modalités sur les 26 initialement sélectionnées.

La somme des effectifs après ventilation reste la même (416). La répartition des modalités ventilées s'est faite en direction des autres modalités actives de la même variable (voir le tableau A1 en annexe).

L'étape suivante consiste à réaliser le tableau des valeurs propres (inerties) associées aux différents axes et à déterminer le nombre d'axes factoriels à archiver pour les utilisations ultérieures. Chaque valeur propre représente une quantité d'information et il convient de retenir les valeurs propres expliquant au moins à 1/V de l'information contenue dans les résultats de l'enquête. Ici, comme $1/6=0,16667$, on retiendra donc les 8 premières valeurs propres qui déterminent également le nombre d'axes à utiliser pour les représentations graphiques (tableau 18).

| Numéro | Valeur propre | Pourcentage | Pourcentage cumulé |
|----------|---------------|-------------|--------------------|
| 1 | 0,4426 | 13,98 | 13,98 |
| 2 | 0,2945 | 9,30 | 23,27 |
| 3 | 0,2285 | 7,22 | 30,49 |
| 4 | 0,2126 | 6,71 | 37,20 |
| 5 | 0,2046 | 6,46 | 43,66 |
| 6 | 0,1887 | 5,96 | 49,62 |
| 7 | 0,1875 | 5,92 | 55,54 |
| 8 | 0,1678 | 5,30 | 60,84 |
| 9 | 0,1628 | 5,14 | 65,99 |
| ... | ... | ... | ... |
| 19 | 0,0182 | 0,57 | 100,00 |

Tableau 18 : Axes factoriels et valeurs propres

3.1.3. Etude des contributions absolues et relatives

Les contributions absolues décrivent la part de chaque modalité dans l'inertie totale de l'axe. Afin d'interpréter un axe, on choisit les modalités dont les contributions sont les plus fortes. La contribution absolue de la modalité j s'écrit :

$$Ca(j) = (m_j \cdot \phi_j^2) / \lambda \tag{1}$$

Où m_j représente le poids relatif de la modalité j ;

où ϕ_j représente la coordonnée de la modalité j sur l'axe ;

où λ représente la valeur propre de l'axe.

La somme de toutes les modalités actives sur un axe est égale à 100%. Dans le cas présent, il y a 25 modalités actives et pour chaque axe le pourcentage d'inertie moyen expliqué pour chaque modalité est (100% / 25), soit 4%. Pour l'interprétation de l'axe 1, il y a 3 modalités à considérer (valeur supérieure à 4)¹²³.

Les contributions relatives (ou cosinus²) correspondent à la qualité de représentation des modalités sur l'axe. Les modalités dont les cosinus² sont les plus forts sont les mieux représentées au sens où les distances sont les moins altérées par la projection.

$$Cr(j) = \phi_j^2 / d^2(j) \quad (2)$$

Où $d^2(j)$ représente la distance à l'origine (carré de la distance du Khi-2 à l'origine) : $(N/n_j) - 1$; avec N l'effectif total et n_j l'effectif de la modalité j .

Les coordonnées inscrites dans le tableau A2, en annexe, représentent les coordonnées des modalités actives sur les cinq premiers axes.

Cette étude des contributions permet de conserver les modalités suivantes :

- **Axe 1** : Age : 70 et + ; CSP : sans emploi ; travail : sans emploi.
- **Axe 2** : Age : 18-29 ; sexe : homme, femme ; CSP : profession intellectuelle, étudiant ou apprenti, cadre ou profession intermédiaire ; logement : périphérie, centre-ville ; travail : périphérie.
- **Axe 3** : Age : 18-29, 30-49 ; CSP : employé ou ouvrier, étudiant ou apprenti ; logement : ville (hors centre) ; travail : ville (hors centre), périphérie.
- **Axe 4** : logement : plus loin, ville (hors centre) ; travail : plus loin, ville (hors centre) ; péage de congestion : pas du tout d'accord, plutôt d'accord, sans réponse.
- **Axe 5** : CSP : profession intellectuelle, cadre ou profession intermédiaire ; logement : plus loin, centre-ville ; travail : plus loin, centre-ville ; péage de congestion : tout à fait d'accord.

Et ainsi de suite jusqu'au huitième axe.

¹²³ Voir les valeurs en gras dans le tableau A2.

Ensuite nous allons calculer les valeurs tests pour effectuer des regroupements de modalités afin d'établir plusieurs systèmes d'axes qui apparaissent significatifs.

3.1.4. Valeurs tests et description des axes factoriels

En reprenant les modalités sélectionnées au cours de l'étape précédente, on constate que seuls les axes 4 et 5 expliquent la variable « *péage de congestion* », avec pour l'axe 4 une nette opposition entre les modalités « *pas du tout d'accord* » et « *plutôt d'accord* » (8,42 et -5,72) (tableau A3). A partir de cet axe on peut effectuer deux regroupements distincts : le premier groupe est celui des personnes opposées au péage de congestion qui habitent loin de la ville et qui travaillent loin. Le second est celui des personnes favorables à l'idée du péage : ils habitent en ville et travaillent en ville. L'axe 5 révèle que ceux qui sont « *tout à fait d'accord* » avec le péage de congestion, habitent et travaillent en centre-ville. Il s'agit de professions intellectuelles ou des cadres supérieurs.

En combinant les autres axes (1, 2 et 3) avec l'axe 4 et l'axe 5, on pourra établir la « *fiche d'identité* » des partisans et des opposants au péage de congestion.

2.5. Interprétation des résultats

Après avoir effectué plusieurs regroupements pour chaque axe, il est intéressant de mettre en place des systèmes d'axes dont les combinaisons révéleront plus d'éléments que l'analyse d'un simple axe.

Nous avons fait ressortir 4 systèmes d'axes afin de mettre en avant les principales informations transmises par l'analyse factorielle des correspondantes multiples. De ces différents systèmes, il ressort plusieurs regroupements de modalités.

2.5.1. Le système d'axes 4-5

Le système d'axes 4-5 (figure 11) fait apparaître trois groupes d'individus. Le groupe 1 est constitué de cadres et de professions intermédiaires qui résident en ville (hors centre) et qui travaillent en ville (hors centre) ou dans la périphérie. Ces individus sont plutôt d'accord avec l'idée d'un péage de congestion. En opposition, le groupe 2 est composé de personnes totalement hostiles au péage de congestion et résidant et travaillant loin de la ville. Enfin dans le groupe 3, nous avons des professions intellectuelles et cadres

supérieurs qui habitent et travaillent en centre-ville et qui sont tout à fait d'accord avec une politique de péage de congestion.

A partir de ce système d'axes on remarque que les individus qui se déplacent en ville sont favorables au péage et que plus les personnes vivent loin de la ville moins elles y sont favorables. On constate également que l'acceptabilité du péage est corrélée avec le niveau de revenu des individus : plus le revenu est élevé et plus le niveau d'acceptabilité du péage est important.

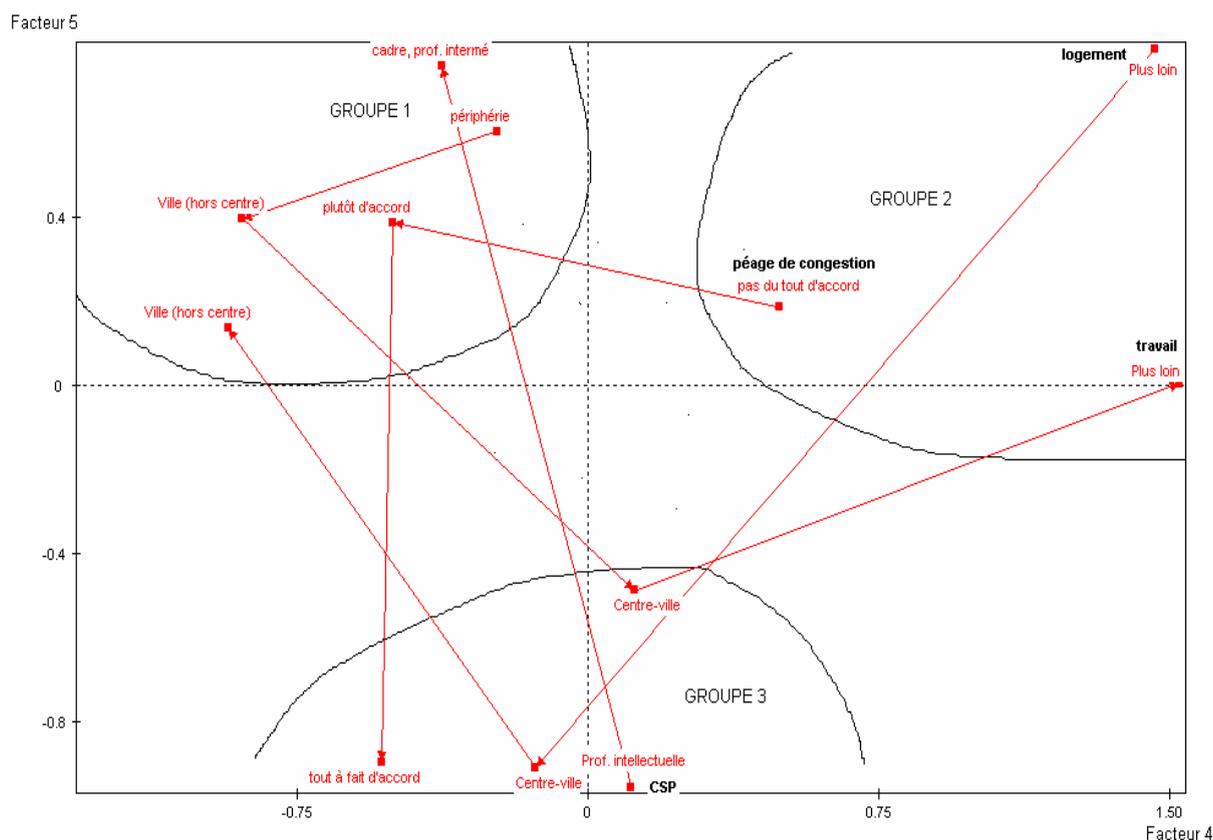


Figure 11 : système d'axes 4/5

Le tableau 19 (ci-dessous) insiste bien sur le fait que la question du péage de congestion est une question de classe. Si l'idée même de payer – en plus – pour circuler est peu admise dans l'ensemble, on remarque que les catégories sociales professionnelles les plus aisées (professions intellectuelles et associées, ainsi que cadres intermédiaires et associées), acceptent mieux le péage (resp. 40,48% et 41,75%) que les catégories les moins aisées (employé et ouvrier : 29,25%). D'ailleurs pour cette dernière catégorie, on

remarque que le péage est très fortement rejeté : 57,55% ne sont « *pas du tout d'accord* ».

Paradoxalement, les sans emplois acceptent mieux le péage que les CSP élevées (44,45%). Une interprétation peut être qu'ils ne sont pas nécessairement utilisateurs de l'automobile : soit parce qu'ils n'en ont pas, soit parce que n'ayant pas d'emploi, ils l'utilisent moins souvent. Mais une autre explication plus significative est que les sans emplois comptent parmi eux les retraités. Or, le péage est accepté par les plus de 70 ans à 50% !

| | | Péage de congestion | | | | Total |
|------------|--|-----------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| | | <i>pas du tout d'accord</i> | <i>plutôt pas d'accord</i> | <i>plutôt d'accord</i> | <i>tout à fait d'accord</i> | |
| CSP | Prof. intellectuelle, supérieur, libérale | 36,51% | 23,02% | 25,40% | 15,08% | 100,00% |
| | cadre, prof. intermédiaire, enseignant | 35,92% | 22,33% | 33,01% | 8,74% | 100,00% |
| | employé, ouvrier | 57,55% | 13,21% | 18,87% | 10,38% | 100,00% |
| | étudiant ou apprenti | 42,42% | 15,15% | 27,27% | 15,15% | 100,00% |
| | sans emploi | 36,11% | 19,44% | 16,67% | 27,78% | 100,00% |

Tableau 19 : Acceptabilité du péage en fonction de la CSP

Le cas des « *étudiants et apprentis* » est encore plus délicat à traiter (42,42% d'entre eux sont favorables au péage). Si les « *étudiants* » sont en général issus de milieux plus aisés que les « *apprentis* », nous aurions pu avoir au sein même de cette catégorie une dichotomie identique à celle des CSP présentée plus haut. Nous sommes donc ici face à un biais et il semble que la plupart des personnes interrogées dans cette catégorie soient des étudiants.

3.5.2. Le système d'axes 4-1 et 4-3

Le système d'axes 4-1 (figure 12) fait ressortir les groupes 1 et 2 présentés ci-dessus.

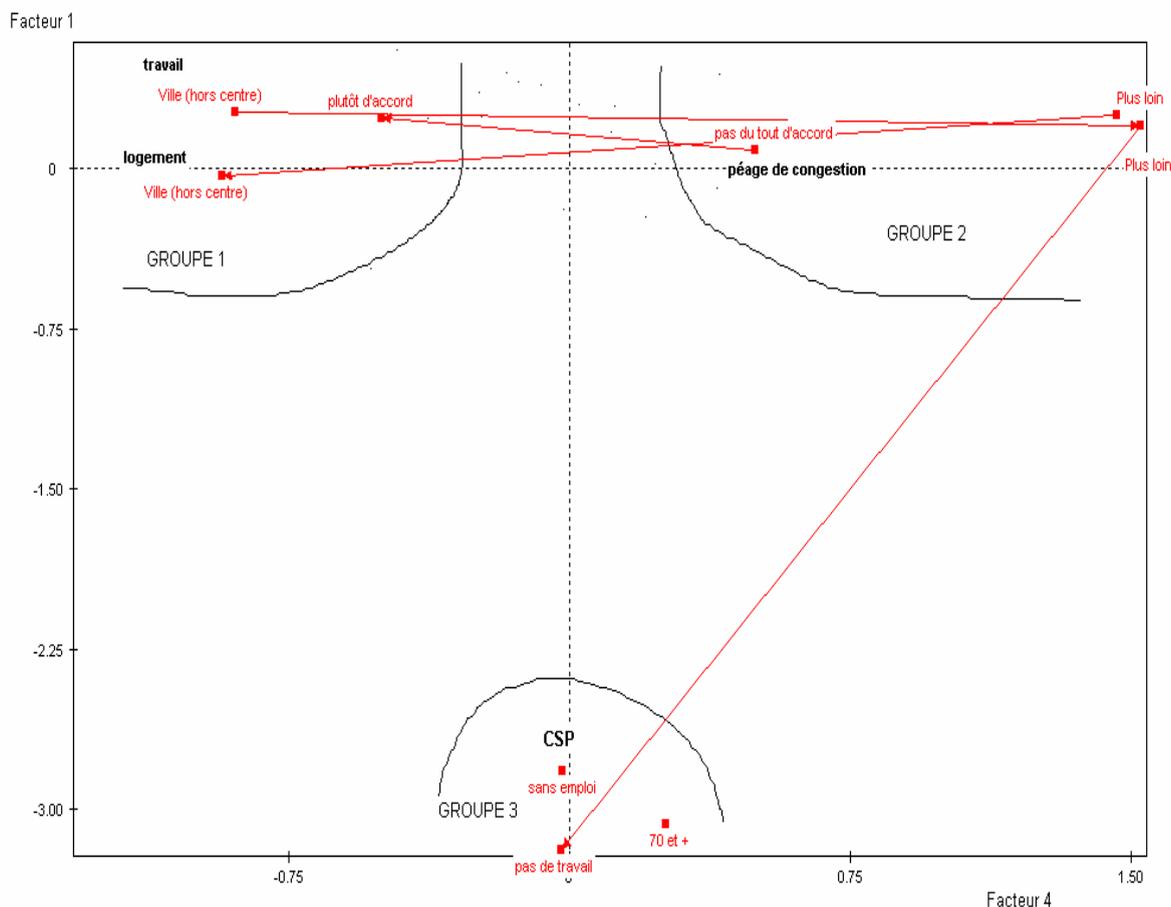


Figure 12 : système d'axes 4/1

Le système d'axes 4-3 (figure 13) met en avant deux nouveaux groupes qui complètent ce qui a été dit plus haut. Le groupe 1 est constitué de jeunes (18-29 ans) étudiants ou apprentis qui résident en périphérie et sont plutôt favorables au péage de congestion. Le groupe 2 se compose d'employés et ouvriers qui travaillent et habitent loin de la ville et qui y sont opposés.

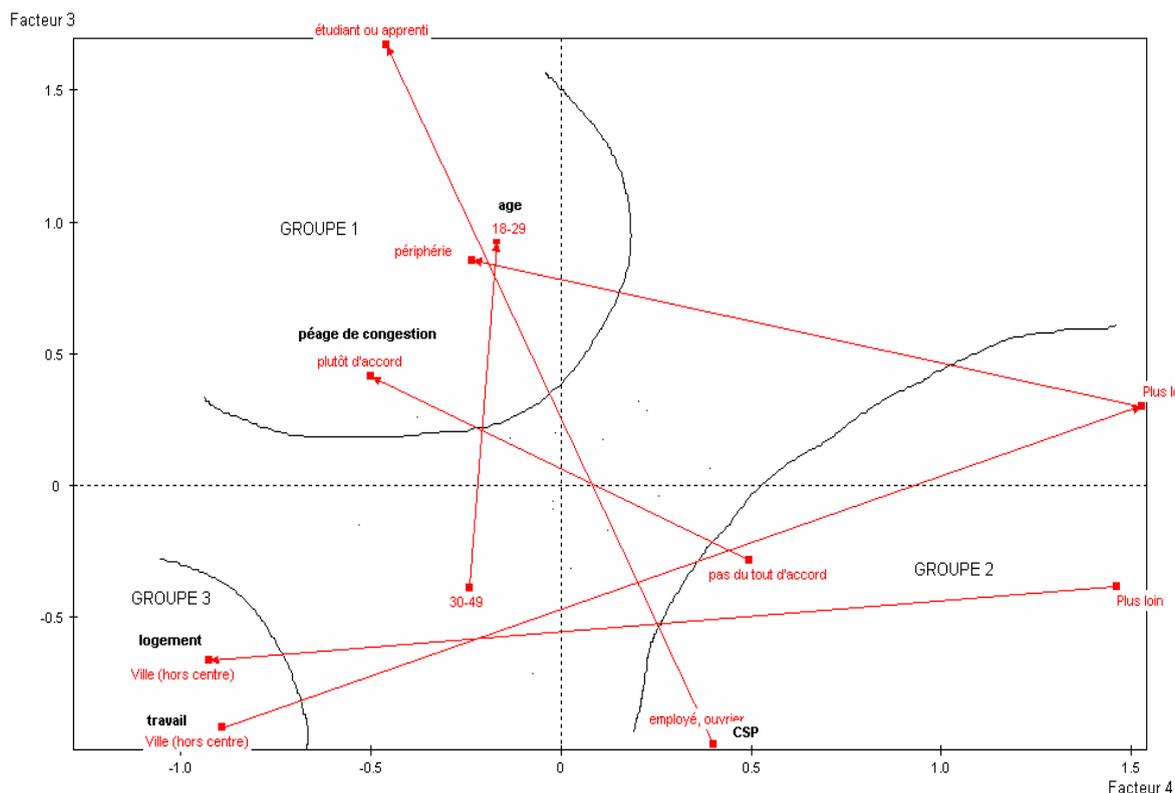


Figure 13 : système d'axes 4/3

Ces différents systèmes d'axes peuvent permettre de différencier deux groupes d'individus : ceux qui sont favorables au péage de congestion et ceux qui y sont opposés. Dans le premier groupe, il y a les habitants du centre-ville ou de la ville, les catégories socioprofessionnelles élevées, les étudiants (en général issus de familles plus aisées), ainsi que les individus qui travaillent en ville et qui ne viennent pas de l'extérieur. Ces personnes font souvent leurs déplacements autrement qu'en voiture (marche, transports collectifs, deux roues...) et souhaitent voir leur quartier moins encombré par les automobiles et plus aéré. Le second groupe se constitue des habitants hors de la ville, qui seraient toujours obligés de payer pour entrer en ville. Ce sont des catégories socioprofessionnelles moins élevées.

Pour conclure, on remarque que les deux groupes distincts (favorable au péage/opposé au péage) s'étendent également à l'usage de l'automobile (voir 2.3.1., tableau 10 et figure 8). Les citadins, plutôt aisés, utilisent moins souvent leur véhicule et seraient moins lésés par la mise en place d'un péage. A l'inverse, les « banlieusards »,

ayant une situation plus modeste utilisent souvent leur voiture et se voient contraints de payer chacune de leur venue en ville.

Pour rendre plus acceptable la mise en œuvre d'un péage de congestion en ville, les décideurs politiques doivent donc prendre en considération les automobilistes les moins aisés, et ceux résidant à l'extérieur de la ville. Ainsi une mesure d'accompagnement efficace permettra de ne pas exclure ces populations de la cité.

Section 4. Les politiques d'accompagnement du péage urbain : développement des transports collectifs versus création de nouvelles routes¹²⁴

Depuis plusieurs décennies la tarification de la congestion automobile par le péage a séduit un grand nombre d'économistes trouvant dans cette politique d'internalisation une solution salubre pour réguler la circulation urbaine. Mais il s'avère que si l'idée est attrayante d'un point de vue purement théorique, elle n'en reste pas moins fortement contestée par les automobilistes (section 2). En effet, l'acceptabilité du péage de congestion est devenu un axe de recherche principal dans les nombreux travaux portant sur la question.

Dans le cadre de cette section nous allons axer notre analyse autour des mesures d'accompagnement du péage qui semblent les plus justifiées au regard des personnes interrogées. Ainsi les pouvoirs publics pourront répondre à la question : quelle politique d'accompagnement mettre en place pour rendre le péage plus acceptable ? Le développement des transports collectifs ou la création de nouvelles routes gratuites alternatives?

En utilisant une méthodologie identique à celle exposée dans la section 3 (ACM), nous allons orienter cette analyse des données pour faire ressortir des regroupements d'individus dont les comportements aideront les décideurs à réaliser des choix en terme de mesure d'accompagnement du péage.

4.1. Quelles politiques d'accompagnement ?

Là où les auteurs traditionnels (ADL, VERHOEF, SMALL...) se fondent sur l'arbitrage prix-temps des automobilistes, il apparaît nécessaire de prendre en compte d'autres éléments pour comprendre l'acceptabilité. Le péage pose des problèmes incontestables : ville à deux vitesses, discrimination par l'argent, taxe supplémentaire pour les salariés, quartiers payants... (CERTU, 2000). Dans la littérature théorique sur le sujet, C. RAUX et S. SOUCHE (2001) analysent les raisons de la désapprobation du péage et font ressortir que ce sont essentiellement les questions d'équité qui prévalent pour les individus (voir aussi l'étude PATS, 2000). Ainsi pour rendre plus acceptable un péage urbain, les auteurs

¹²⁴ Cette section a été publiée sous le titre : "Les politiques d'accompagnement du péage urbain : étude sur l'acceptabilité en Suisse" (M. REYMOND, 2004a)

suggèrent "qu'une stratégie possible consiste à partir du couple *équité horizontale*¹²⁵ – efficacité économique autour duquel s'établissent les controverses entre autorités publiques, opérateurs et usagers." (C. RAUX et S. SOUCHE, 2001, p.555) Mais la question de l'acceptabilité se pose surtout car "la tradition de l'accès gratuit à la voirie se révèle très difficile à remettre en cause" (Y. CROZET et G. MARLOT, 2001, p.80). On revient ainsi à la notion d'« amertume » évoquée en introduction de ce chapitre qui est liée à "la rancœur ou au mécontentement des exclus, [et qui] s'exprime de façon d'autant plus vive que la consommation concernée est considérée comme un droit." (C. ABRAHAM, 2001, p. 62)

Comme le souligne S. SOUCHE (2003), de nombreux travaux portent déjà sur la question de l'équité face au péage urbain, mais également sur l'affectation des recettes du péage. Parmi eux, P. RIETVELD et E.T. VERHOEF (1998) reviennent sur le prélèvement des recettes du péage et le transfert financier des automobilistes vers la collectivité. La redistribution de cet argent est un élément considérable dans le choix d'instaurer ou non un péage, et, dans une perspective sociale, les autorités peuvent décider que les recettes doivent bénéficier à l'ensemble de la société et non à une partie de la collectivité.

Dans le cadre de l'étude présentée ici, les personnes interrogées se réfèrent essentiellement à une vision globale du système de transport comme bien public et pas forcément comme un bien appropriable par ceux qui ont une forte valeur du temps. Les décideurs doivent donc s'intéresser en priorité à l'affectation des recettes et aux politiques de transports parallèles à mettre en œuvre pour rendre plus attrayant le péage de congestion. A ce sujet (voir figure 14), l'enquête dévoile que le développement des transports alternatifs à l'automobile (transports collectifs et transports non polluants) comme mesure d'accompagnement au péage est l'option retenue en priorité par la plupart des personnes interrogées (92,79% pour les transports collectifs et 81,25% pour les autres modes de transport). Les parking-relais (P+R) sont une politique mise en avant par 79,08% des individus interrogés¹²⁶. Enfin, la création de nouvelles routes gratuites est la

¹²⁵ L'équité horizontale correspond "au principe d'égalité des chances, qui relève de l'égalité de traitement entre usagers (usager-payeur)" (C. RAUX et S. SOUCHE, 2001, p.543)

¹²⁶ Cette solution peut permettre de proposer le choix suivant aux usagers (M. REYMOND, 2003, p.41) : soit l'automobiliste gare son véhicule (moyennant des frais de stationnement) et bénéficie d'un aller-retour gratuit en transport collectif ; soit l'automobiliste décide de conserver son véhicule pour accéder au centre ville et devra emprunter une route à péage modulable dans le temps. Si l'utilisateur est accompagné, il sera alors en partie exonéré du péage (58,90% des individus préconisent l'incitation au covoiturage comme politique d'accompagnement).

seule solution d'accompagnement qui soit fortement rejetée (seulement 35,82% de l'échantillon souhaite que des routes soient développées en parallèle à l'instauration d'un péage).

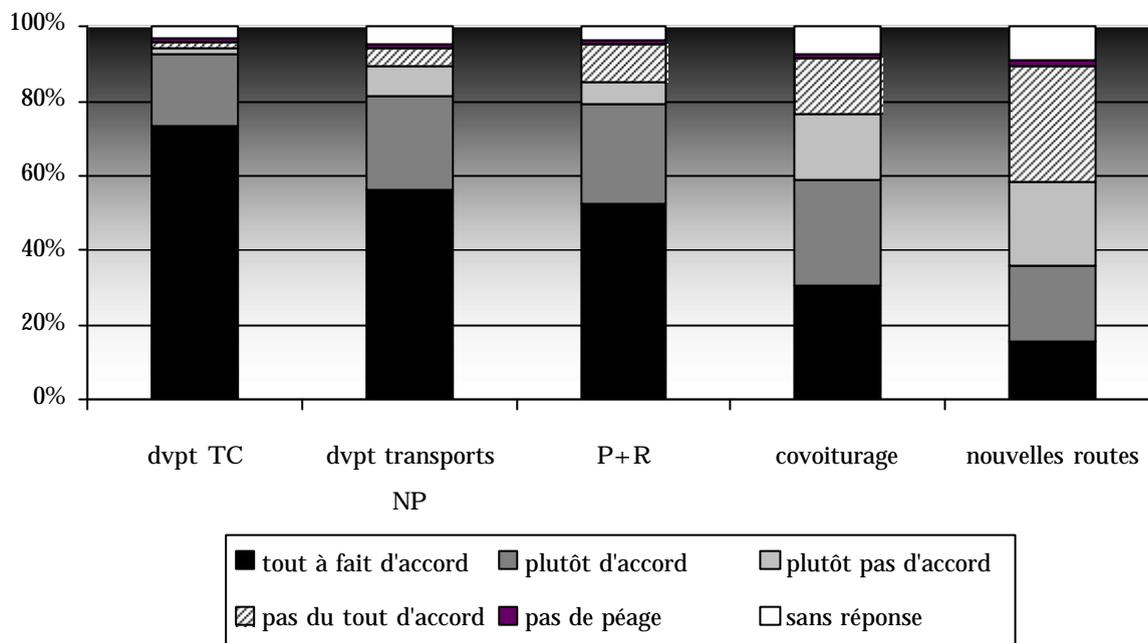


Figure 14 : Les politiques d'accompagnement du péage de congestion

Au cours de cette section nous regrouperons les individus autour de ces deux axes : développement des transports collectifs / développement du réseau routier.

4.2. Méthodologie

En reprenant la méthodologie exposée dans la section 3, nous déterminerons les modalités significatives de chacun des axes. Mais, dans un premier temps nous allons présenter les variables choisies pour l'ACM et ensuite, nous déterminerons les modalités significatives de chacun des axes.

4.2.1. Choix des variables actives (questions)

Un des principaux objectifs fixé par la présente section est d'observer le point de vue des personnes interrogées sur le péage de congestion en fonction du niveau d'utilisation de l'automobile. Cette analyse a pour but de présenter les différentes politiques d'accompagnement que les autorités peuvent mettre en place afin de rendre plus

acceptable le péage (développement des transports collectifs *versus* développement de nouvelles routes gratuites). Si le péage n'est pas une politique bien acceptée par l'ensemble de la population, il n'en demeure pas moins que les usagers occasionnels de l'automobile y sont plutôt favorables.

Notre modèle d'analyse se caractérise par un choix précis de variables actives (V) que nous allons étudier. Ces variables sont les cinq questions suivantes :

a. Utilisation voiture : « *Utilisez-vous une voiture, en tant que conducteur ou passager, pour vous rendre au centre ville ?* » (5 modalités : *toujours, souvent, parfois, exceptionnellement, jamais*) ; le choix de cette variable est caractérisé par le fait qu'il est nécessaire de connaître le degré d'utilisation de la voiture par les individus interrogés.

b. Péage de congestion : « *Faudrait-il instaurer un péage de congestion pour remédier aux problèmes d'embouteillages et aux effets négatifs du trafic en ville ?* » (5 modalités : *tout à fait d'accord, plutôt d'accord, plutôt pas d'accord, pas du tout d'accord, sans réponse*) ; avec cette variable, nous pourrions avoir une vision globale de l'acceptabilité du péage de congestion.

c. Développement TC : « *Pour une meilleure acceptabilité de la mise en place d'un péage urbain, les autorités doivent envisager comme mesure d'accompagnement : le développement des transports collectifs (TC) ?* » (6 modalités : *tout à fait d'accord, plutôt d'accord, plutôt pas d'accord, pas du tout d'accord, sans réponse, pas de péage*¹²⁷) ;

d. Nouvelles routes : « *Pour une meilleure acceptabilité de la mise en place d'un péage urbain, les autorités doivent envisager comme mesure d'accompagnement : le développement de nouvelles routes ?* » (6 modalités : *tout à fait d'accord, plutôt d'accord, plutôt pas d'accord, pas du tout d'accord, sans réponse, pas de péage*) ;

¹²⁷ Cette modalité particulière n'était pas suggérée lors de l'enquête, il s'est avéré parfois que certaines personnes ont souhaité réaffirmer qu'elles étaient opposées au péage.

e. Recettes : « *Pour quels investissements souhaiteriez-vous voir utilisées les recettes du péage de congestion ?* » (le développement des transports collectifs (TC), le développement de nouvelles routes, la collectivité, TC + nouvelles routes, TC + collectivité, nouvelles routes + collectivité, TC + nouvelles routes + collectivité, sans réponse, pas de péage ; au total : 9 modalités) ; la question de l'affectation des recettes est essentielle pour mesurer les politiques d'accompagnement à mettre en place.

Le choix de ces variables va permettre d'interpréter plusieurs résultats et notamment le point de vue des automobilistes sur le péage de congestion et sur les politiques d'accompagnement.

4.2.2. Apurement et détermination des valeurs propres

Après apurement l'analyse ne prend en compte que 25 modalités sur les 31 initialement sélectionnées. De la même façon qu'au cours de la section 1, la répartition des modalités ventilées s'est faite en direction des autres modalités actives de la même variable (voir le tableau A4 en annexe).

L'étape suivante consiste à réaliser le tableau des valeurs propres (inerties) associées aux différents axes et à déterminer le nombre d'axes factoriels à archiver pour les utilisations ultérieures. Chaque valeur propre représente une quantité d'information et il convient de retenir les valeurs propres expliquant au moins à $1/V$ de l'information contenue dans les résultats de l'enquête (cf. tableau A5 en annexe).

Le nombre de valeurs propres se détermine par la différence entre le nombre de modalités actives (25) après l'apurement et le nombre de variables actives (5), soit 20 valeurs propres. Nous allons travailler sur les 9 premiers axes qui accumulent plus de la moitié du pourcentage cumulé des valeurs propres (58,45%)¹²⁸.

4.2.3. Etude des contributions absolues et relatives

¹²⁸ Toutefois pour des raisons de place et de présentation nous n'allons exposer numériquement que les données correspondantes aux 5 premiers axes.

Afin de présenter les modalités essentielles dans chacun des axes, nous allons calculer les contributions absolues qui décrivent la part de chaque modalité dans l'inertie totale de l'axe (cf. tableau A6 en annexe).

Dans le cas présent, il y a 25 modalités actives – comme pour la section 3 – et pour chaque axe le pourcentage d'inertie moyen expliqué pour chaque modalité est (100% / 25), soit 4%. Pour l'interprétation de l'axe 1, il y a 10 modalités à considérer (valeur supérieure à 4 en gras dans le tableau A6). Et ainsi de suite avec les autres axes...

Les coordonnées inscrites dans le tableau A6 en annexe, représentent les coordonnées des modalités actives sur les cinq premiers axes.

4.3. Interprétation des résultats

A l'aide du calcul des valeurs tests¹²⁹ nous pouvons effectuer des regroupements de modalités afin d'établir plusieurs systèmes d'axes qui semblent significatifs (cf. tableau A7 en annexe). Nous allons interpréter les résultats de l'ACM autour de trois thèmes : nous verrons quels sont les individus qui souhaitent voir les transports collectifs se développer en accompagnement du péage de congestion, ensuite ceux qui veulent que ce soit de nouvelles routes gratuites, enfin nous présenterons une synthèse de ces résultats.

4.3.1. Le développement des transports collectifs

Les individus interrogés qui n'utilisent jamais ou exceptionnellement l'automobile sont pour plus de la moitié favorables à l'idée d'instaurer un péage de congestion permettant de réguler la circulation (16,08% sur 28,22%, soit 56,9% des utilisateurs « occasionnels » de la voiture). Nous pouvons analyser ce résultat de deux façons : tout d'abord, si la circulation devient plus fluide ils utiliseront à nouveau leur automobile plus régulièrement et ils sont donc favorables à l'idée d'un péage de congestion. Ensuite il y a une partie de ces personnes qui rejettent l'automobile car ils en subissent les effets externes en tant qu'utilisateurs des transports collectifs, de vélo ou simplement en tant que piétons. Pour eux, toutes les propositions de politiques permettant de réduire la place de l'automobile dans la cité sont à prendre en considération.

¹²⁹ La valeur test représente la coordonnée sur l'axe factoriel. Elle est d'autant plus forte en valeur absolue que la modalité correspondante occupe une position significative sur l'axe.

De l'analyse factorielle il ressort que les individus utilisant « *exceptionnellement* » la voiture sont « *tout à fait d'accord* » avec l'idée d'instaurer un péage de congestion et sont aussi « *plutôt d'accord* » pour développer les transports collectifs en parallèle à la mise en place du péage. Par contre, ils ne sont « *pas du tout d'accord* » avec l'idée de créer de nouvelles routes. D'autre part, les recettes ne devraient pas être remboursées aux usagers au prorata de la somme qu'ils paient, car ils n'auraient aucune incitation à changer de comportement. A ce sujet, les individus présentés ci-dessus sont partisans d'orienter les recettes vers les « *transports collectifs* » et la « *collectivité + les transports collectifs* ».

De plus ils sont « *tout à fait d'accord* » avec les autres types de politiques (park and ride, taxation en fonction des nuisances, covoiturage, restriction...), et ne pensent pas que le péage « *diminuera l'attractivité* » de la ville. Enfin, ils voteraient « *pour* » un candidat qui proposerait de mettre en place cet instrument de régulation.

La figure 15 nous permet de constater que la politique de développement des transports collectifs comme mesure d'accompagnement au péage est toujours acceptée quel que soit le niveau d'acceptabilité du péage de congestion (plus de 90% chez ceux qui rejettent entièrement le péage et 100% chez ceux qui l'acceptent totalement).

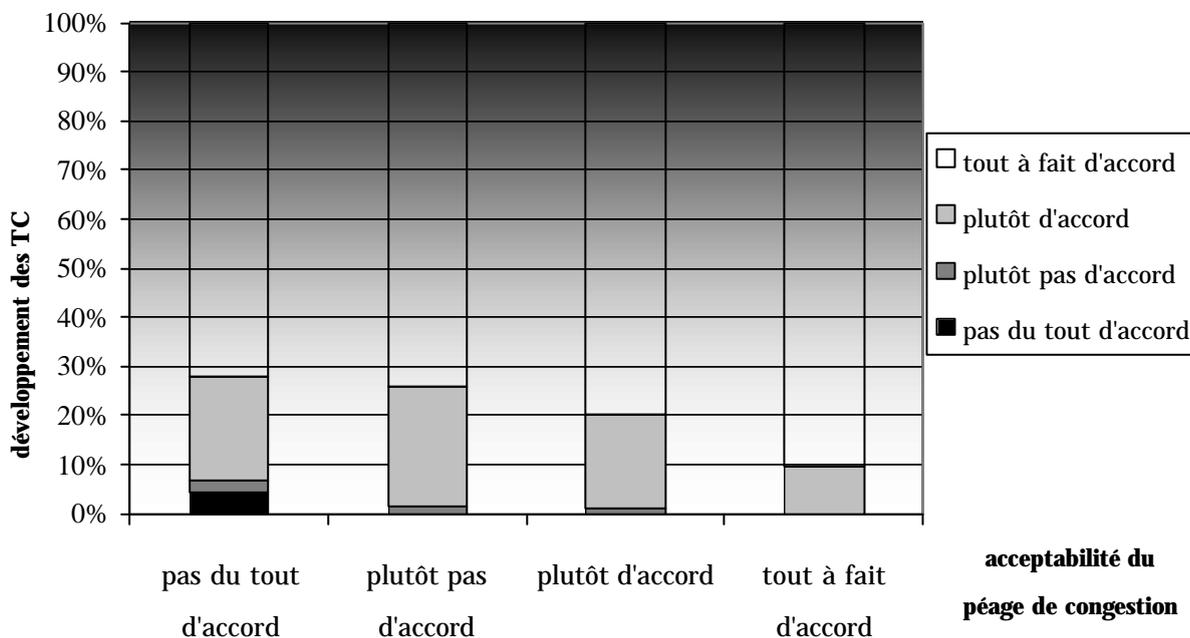


Figure 15 : Le développement des TC comme politique d'accompagnement au péage en fonction de la perception du péage de congestion

4.3.2. Le développement du réseau routier

Les automobilistes « réguliers » sont en général hostiles à la création d'un péage (49,51% sur 71,78%, soit 68,9 % de l'ensemble des automobilistes « réguliers ») et c'est par rapport à ces individus que doit être axée la politique d'information. En effet, si la congestion est perçue comme un réel problème parmi les automobilistes et que nombreux sont ceux qui souhaitent voir la situation s'améliorer, peu sont prêts à changer de comportement (s'orienter vers les transports collectifs, changer d'horaire de départ, s'acquitter d'une taxe incitative...). Il apparaît donc important de centrer une grande partie de la politique d'information sur cette portion de l'échantillon.

Les personnes interrogées qui utilisent « toujours » leur voiture ne sont « pas du tout d'accord » avec l'idée d'instaurer un péage de congestion. Dans l'optique où une telle mesure serait envisagée, ils seraient « plutôt d'accord » pour que de nouvelles routes gratuites soient mises en place en guise de mesures d'accompagnement et seraient partisans de voir les recettes du péage orientées vers les réseaux routiers.

Toujours dans la description des axes factoriels, il est intéressant de pousser l'analyse un peu plus loin lorsque l'on étudie les valeurs tests des modalités illustratives (non actives) les plus caractéristiques. Ce groupe d'individu n'est « pas du tout d'accord » pour restreindre les déplacements automobiles en ville afin de retrouver une circulation fluide, il n'est « pas du tout d'accord » avec les autres formes de politiques tarifaires (taxe en fonction des nuisances, augmentation du prix des stationnements et de l'essence). Ces automobilistes perçoivent naturellement le péage comme une « taxe supplémentaire » et prédisent que sa mise en place entraînerait une « délocalisation des habitants », une « diminution de l'attractivité » de la ville et un effet « très négatif » pour les commerçants. La figure 16 (qui reprend l'ensemble des individus interrogés) nous permet de constater que la politique de construction de nouvelles routes comme mesure d'accompagnement au péage est néanmoins peu acceptée dans l'ensemble. Un peu plus de 50% des opposants au péage y sont favorables. D'autres part les partisans du péage sont nettement contre le développement de nouvelles routes.

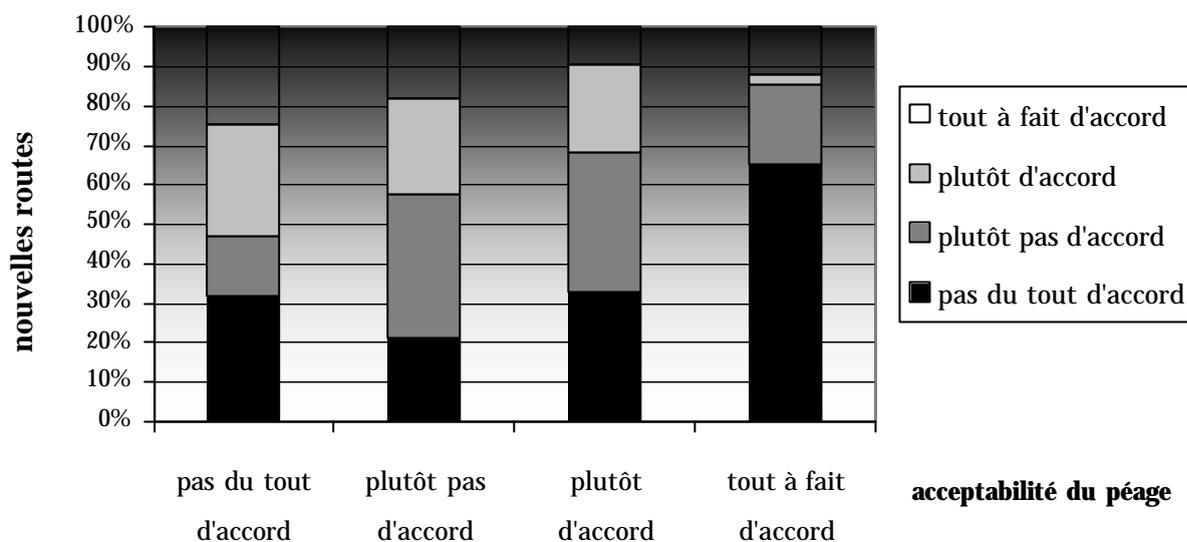


Figure 16 : Le développement de nouvelles routes gratuites comme politique d'accompagnement au péage en fonction de la perception du péage de congestion

4.3.3. Synthèse des résultats

En reprenant les modalités sélectionnées au cours de l'étape précédente, on peut souligner une nette opposition au niveau des variables « péage de congestion » et « recettes » pour l'axe 1. Le tableau A7 mis en annexe permet de constater que les modalités « pas du tout d'accord » et « tout à fait d'accord » sont significativement opposées (-10,68 et 10,09), de même pour « nouvelles routes » et « TC » et « TC + collectivité » (-10,40 et 9,51, 6,33).

Le système d'axe 1-2 (cf. figure ci-après) fait apparaître trois groupes dont deux groupes spécifiques en très nette opposition. Le groupe 1 réunit des individus qui utilisent toujours la voiture et qui sont fortement opposés à l'instauration d'un péage de congestion. Comme mesure d'accompagnement ils sont plutôt d'accord avec l'idée de créer de nouvelles routes, mais aussi avec celle de développer des transports collectifs. Toutefois, ils souhaitent voir les recettes du péage orientées vers la construction de nouvelles routes (voir 4.3.2.). En opposition, le groupe 3 est constitué d'individus utilisant rarement leur voiture. Ils sont tout à fait pour l'instauration d'un péage et sont radicalement contre le déploiement d'un réseau routier comme mesure d'accompagnement. On remarque qu'ils veulent que les recettes de celui-ci soient attribuées aux transports collectifs et à la collectivité (voir 4.3.1.). Enfin, le groupe 2,

plus hybride, présente des utilisateurs fréquents de l'automobile qui ne sont plutôt pas d'accord avec la mise en place d'un péage de congestion, mais qui restent malgré tout contre la création de nouvelles routes comme politique d'accompagnement.

Un autre système d'axe (2-3) présente de façon plus succincte les deux groupes, mais permet de découvrir un nouveau regroupement intéressant proche du groupe 2 présenté dans le premier système¹³⁰. En effet, ces utilisateurs fréquents de la voiture qui ne sont plutôt pas d'accord avec l'idée de développer le réseau routier en accompagnement avec le péage, sont favorables à ce que les recettes du péage soient partagées entre les transports collectifs et la création de nouvelles routes. Cet élément contradictoire caractérise la perception générale du péage de congestion. Les automobilistes payeurs du péage se sentent lésés par cette nouvelle taxe, et ne perçoivent pas l'effet incitatif de cette politique. Ils souhaitent bénéficier directement du coût financier qu'ils subissent. La redistribution des recettes vers les routes semblent à leurs yeux justifier un tel péage.

Les différents systèmes d'axe permettent donc de présenter 3 types de comportements en fonction des variables choisies au préalable. Le premier groupe auquel nous avons fait référence est celui des utilisateurs permanents de l'automobile qui sont pour la plupart fortement opposés à l'instauration d'un péage de congestion. Et dans l'optique où un tel instrument tarifaire serait mis en place, ils ne voudraient surtout pas être lésés : pour eux, les recettes du péage doivent être orientées vers la création de nouvelles routes. Le second groupe est totalement antagoniste au précédent : il est composé d'utilisateurs occasionnels de l'automobile qui soutiennent l'idée d'un péage de congestion. Ils ne souhaitent pas voir se construire de nouvelles routes en guise de politiques d'accompagnement. Enfin, le troisième groupe, plus confus, plus vaste et plus neutre, se compose des utilisateurs réguliers de l'automobile, plutôt hostiles au péage mais ne souhaitant pas forcément voir se développer de nouvelles routes. Face à ces éléments contradictoires, il existe une modalité qui peut faire le lien entre ces trois groupes : « le développement des transports collectifs ». En effet, comme politique d'accompagnement ou comme choix d'affectation des recettes, le développement des transports collectifs fait l'unanimité même chez les utilisateurs permanents de l'automobile.

¹³⁰ L'auteur s'engage à fournir les graphiques des différents systèmes d'axes au lecteur intéressé (voir M. REYMOND, 2004b).

Dans le premier groupe, il y a les automobilistes résidants hors de la ville, qui seraient toujours obligés de payer pour entrer en ville. Ce sont des catégories socioprofessionnelles moins élevées.

Le second groupe se constitue d'habitants du centre-ville ou de la ville, de catégories socioprofessionnelles élevées, d'étudiants (en général issus de familles plus aisées), ainsi que les individus qui travaillent en ville et qui ne viennent pas de l'extérieur. Ces personnes font souvent leurs déplacements autrement qu'en voiture (marche, transports collectifs, deux roues...) et souhaitent voir leur quartier moins encombré par les automobiles et plus aéré (M. REYMOND, 2004b).

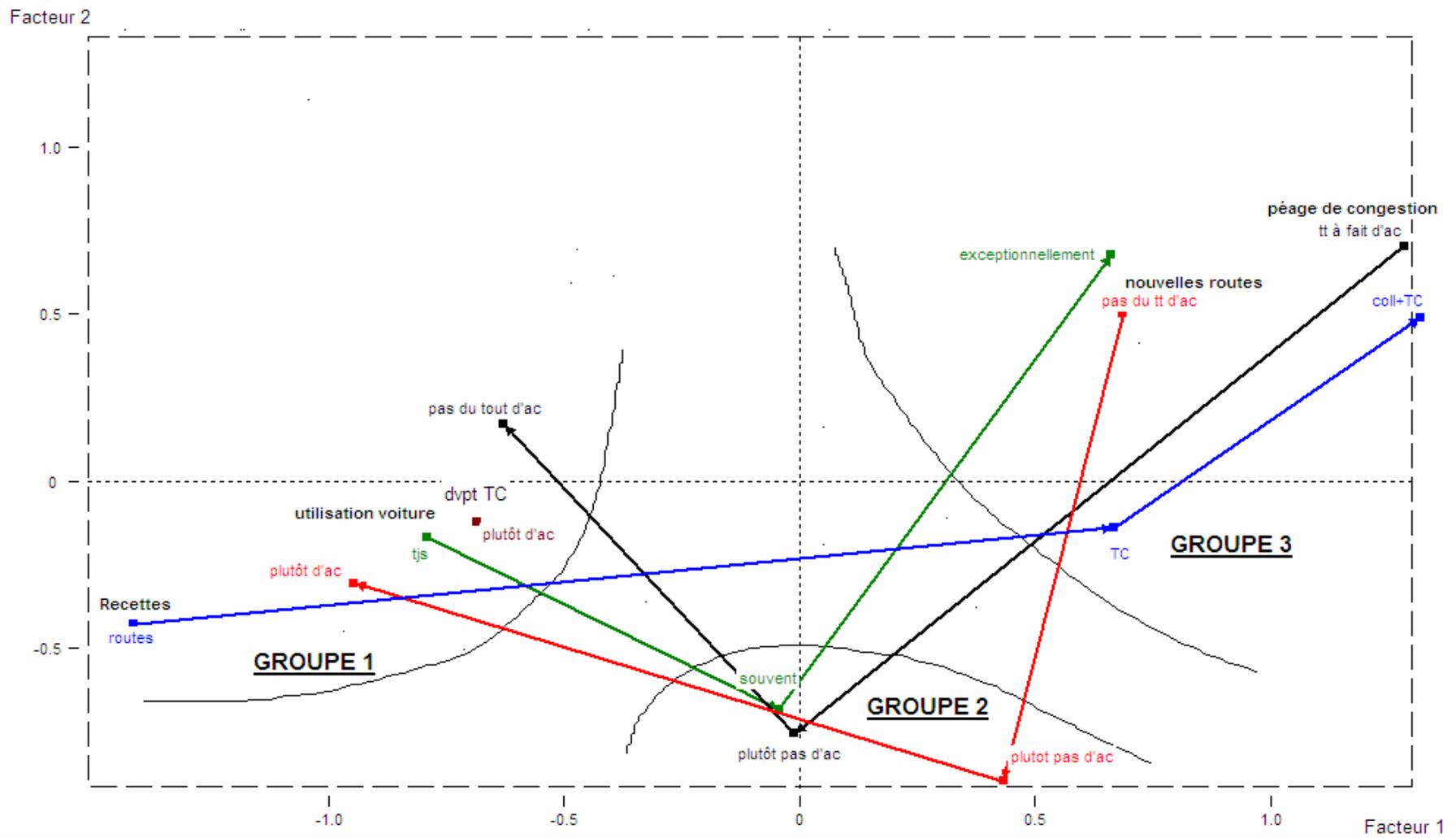


Figure 17 : Combinaisons d'axes. AXES 1/2

Les débats récents qui portent sur la mise en place d'une tarification de la voirie en ville reviennent à s'interroger sur la réelle finalité du péage urbain. Si l'objectif d'un péage de congestion est de réguler la circulation en combinant changement d'horaire de départ et changement de mode de déplacement, il va de soi qu'un développement du réseau routier ne ferait qu'accentuer le problème. C'est pourquoi la principale politique d'accompagnement du péage de congestion doit être le développement des transports collectifs (fréquence plus régulière, baisse des tarifs, extension du réseau...), point sur lequel les utilisateurs fréquents ou non de l'automobile semblent tomber d'accord.

De plus, et contrairement aux idées reçues, les automobilistes fréquents ne sont pas toujours favorables à la création de nouvelles routes gratuites. D'ailleurs, les expériences de Singapour et de Londres montrent que les décideurs politiques ont perçu les attentes des citoyens puisque dans les deux cas les transports collectifs sont développés pour accompagner la politique de régulation des déplacements automobile par le péage.

Conclusion

Tout au long de ce chapitre, on a pu rendre compte de l'acceptabilité publique du péage de congestion. Dans la section 1, nous sommes revenus sur diverses études abordant cet épineux débat. Les résultats obtenus au cours de notre étude sur Lausanne et ses environs (section 2) ont confirmé cette tendance au rejet du péage. Mais une interprétation plus approfondie des portées de l'enquête a permis de bien définir les partisans et les opposants au péage de congestion (Section 3). Enfin, la section 4 a permis de détailler nos interrogations déjà évoquées au cours du modèle présenté dans la partie II de notre thèse : le développement des transports collectifs comme mesure accompagnatrice du péage rendrait plus acceptable une telle mesure.

Les problèmes d'acceptabilité et d'équité suscités par le péage de congestion ne sont néanmoins pas nécessairement liés les uns aux autres. Une politique inéquitable peut être relativement bien acceptée par le plus grand nombre des citoyens et cela à cause d'un manque d'information, par exemple. Une telle réforme attise les débats et le décideur politique va devoir prendre en considération un certain nombre de paramètres, dont l'équité et l'acceptabilité publique sont les principaux. Certaines mesures sont indolores car elles sont intégrées dans le prix final payé par l'automobiliste (c'est le cas des taxes sur les carburants) et demeurent relativement bien admises. En revanche, d'autres mesures telles que le péage de congestion sont considérées simplement comme des taxes supplémentaires visant à remplir les caisses de l'Etat. Si l'objectif est clairement de réduire la congestion urbaine, les autorités pourront intégrer une visée environnementale dans la mesure tarifaire afin de la rendre plus acceptable aux yeux des riverains (en orientant les recettes vers la création de pistes cyclables, de parcs publics ou en instaurant des réductions tarifaires aux véhicules qui utilisent de l'énergie verte). Et, pour la rendre plus équitable, elles pourront envisager d'orienter les recettes vers les transports collectifs pour permettre aux automobilistes qui délaissent leurs véhicules, de ne pas subir un "*coût de dérangement*" trop important. Le décideur harmonisera donc ces deux contraintes pour rendre plus acceptable son projet de péage de *décongestion* de la circulation en tenant compte également des contraintes de mise en oeuvre technique et financière.

Dans le cadre du projet mis en oeuvre en Suisse, nous avons obtenu des résultats similaires sur la ville de Bâle. Si la politique de création de nouvelles routes comme mesure d'accompagnement ne remporte l'adhésion que de 37 % des sondés à Lausanne,

elle est encore plus rejetée à Bâle avec seulement 22 %. Ces résultats montrent bien que les agents économiques ne souhaitent pas que les décideurs investissent dans de nouvelles infrastructures routières de crainte de voir l'offre de voirie générer à nouveau la croissance du trafic automobile (M. REYMOND, 2005).

ANNEXES DU CHAPITRE VI

Annexe 1 : Questionnaire de l'enquête réalisée sur Lausanne et ses environs

LES USAGERS FACE AUX PEAGES URBAINS : UN SONDAGE SUR LA SUISSE

Consignes :

- Annoncer le thème du questionnaire (*les déplacements automobiles et les politiques de régulation en ville*) ;
- Préciser quel est le demandeur du questionnaire (le CREM en collaboration avec l'OFROU) ;
- S'assurer que la personne interrogée est majeure ;

GENERALITES

1. Dans quelle tranche d'âge vous situez-vous ?

| | | |
|----|---------|--|
| a. | 18-29 | |
| b. | 30-49 | |
| c. | 50-69 | |
| d. | 70 et + | |

2. Sexe :

| | | |
|----|-------|--|
| a. | Homme | |
| b. | Femme | |

3. Dans quelle catégorie socio-professionnelle vous situez-vous ?

| | | |
|----|---|--|
| a. | Profession intellectuelle ou libérale | |
| b. | Cadre ou profession intermédiaire | |
| c. | Employé ou ouvrier | |
| d. | Etudiant ou apprenti | |
| e. | Sans emploi (chômeur, retraité, au foyer ...) | |

4. Où se situe votre logement principal ?

| | | |
|----|---|--|
| a. | Au centre-ville de Lausanne | |
| b. | Dans la ville de Lausanne (hors centre) | |
| c. | Dans la périphérie | |
| d. | Plus loin | |

5. Où est votre lieu de travail (ou votre lieu d'étude) ?

| | | |
|----|---|--|
| a. | Au centre-ville de Lausanne | |
| b. | Dans la ville de Lausanne (hors centre) | |
| c. | Dans la périphérie | |
| d. | Plus loin | |

6. Habitez-vous au bord d'une route à trafic dense ?

| | | |
|----|-----|--|
| a. | Oui | |
| b. | non | |

7. Utilisez-vous une voiture, en tant que conducteur ou passager, pour vous rendre au centre ville ?

| | | |
|----|--------------------|--|
| a. | Toujours | |
| b. | Souvent | |
| c. | De temps en temps | |
| d. | Exceptionnellement | |
| e. | Jamais | |

8. Sinon quels autres types de transport utilisez-vous ?

| | | |
|----|--|--|
| a. | Le vélo | |
| b. | La marche à pied | |
| c. | Les transports collectifs publics | |
| d. | Les transports collectifs d'entreprise | |
| e. | Deux roues motorisées | |
| f. | Autre :..... | |

DEPLACEMENTS EN VILLE

9. (si travailleur ou étudiant) Pour vous rendre sur votre lieu de travail (ou d'étude), à quelle heure partez-vous de chez vous ?

| | | |
|----|--------------------|--|
| a. | Avant 6 heures | |
| b. | 6h00-6h29 | |
| c. | 6h30-6h59 | |
| d. | 7h00-7h29 | |
| e. | 7h30-7h59 | |
| f. | 8h00-8h29 | |
| g. | 8h30-9h00 | |
| h. | Après 9 heures | |
| i. | Horaires flexibles | |

10. (si travailleur ou étudiant) En général, quel mode de transport utilisez-vous pour vous rendre sur votre lieu de travail (ou lieu d'étude) ? (cocher plusieurs cases si il y a un changement de mode)

| | | | | |
|----|-----------------------------------|--|--|--|
| a. | La voiture | | | |
| b. | Le vélo | | | |
| c. | La marche à pied | | | |
| d. | Les transports collectifs publics | | | |
| e. | La moto | | | |
| f. | Autre :..... | | | |

11. (pour tous) En général, quel mode de transport utilisez-vous pour vous rendre ou vous déplacer en ville toutes activités confondues (sauf activité professionnelle) ? (cocher plusieurs cases si il y a un changement de mode)

| | | | | |
|----|-----------------------------------|--|--|--|
| a. | La voiture | | | |
| b. | Le vélo | | | |
| c. | La marche à pied | | | |
| d. | Les transports collectifs publics | | | |
| e. | La moto | | | |
| f. | Autre :..... | | | |

12. (si travailleur ou étudiant) Quel est votre temps de trajet (domicile -travail/lieu de formation) ? (en minute)

.....

12bis. Quelle distance parcourez-vous (domicile-travail/lieu de formation) ? (en kilomètre)

.....

13. (Pour les automobilistes) Vous garez votre voiture :

| | | |
|----|--|--|
| a. | Dans parking public payant | |
| b. | Dans un parking public gratuit | |
| c. | Dans un parking privé (d'entreprise, de particulier, etc.) gratuit | |
| d. | Dans un parking privé payant | |
| e. | Dans parking d'échange avec les transports publics | |

14. (Pour tous) Combien de fois par semaine faites-vous vos courses au centre-ville ?

| | | |
|----|----------------|--|
| a. | Jamais | |
| b. | 1 fois | |
| c. | 2 fois | |
| d. | 3 fois et plus | |

15. (Pour tous) Combien de fois par semaine allez-vous au centre-ville pour des loisirs ?

| | | |
|----|----------------|--|
| a. | Jamais | |
| b. | 1 fois | |
| c. | 2 fois | |
| d. | 3 fois et plus | |

PERCEPTION DES PROBLEMES DE CIRCULATION

16. Quelle importance donnez-vous aux problèmes suivants lorsque vous utilisez la voiture ou la moto lors de vos déplacements en ville ?

| | | Très important | Assez important | Pas très important | Pas du tout important | Sans réponse |
|----|-------------------------------|----------------|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------|
| a. | Perte de temps (congestion) | | | | | |
| b. | Manque de places de parking | | | | | |
| c. | Prix des parkings trop élevés | | | | | |
| d. | Risque d'accident | | | | | |

17. Quelle importance donnez-vous aux problèmes suivants lorsque vous utilisez les transports collectifs publics lors de vos déplacements en ville ?

| | | Très important | Assez important | Pas très important | Pas du tout important | Sans réponse |
|----|----------------------------------|----------------|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------|
| a. | Perte de temps (congestion) | | | | | |
| b. | fréquence des passages | | | | | |
| c. | Niveau de confort et de sécurité | | | | | |
| d. | tarifs trop élevés | | | | | |
| e. | Autre :..... | | | | | |

18. (Pour tous les modes de transport) Pour gagner une heure de temps de trajet par semaine, combien êtes vous prêt à payer ? (en FCH)

.....

19. Lorsque vous vous déplacez à pied (ou en vélo) dans le centre-ville, quelle importance donnez-vous aux problèmes suivants :

| | | Très important | Assez important | Pas très important | Pas du tout important | Sans réponse |
|----|--|----------------|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------|
| a. | La pollution de l'air | | | | | |
| b. | Le bruit des voitures | | | | | |
| c. | La dangerosité des voitures | | | | | |
| d. | Le manque d'espace pour se déplacer sans voiture | | | | | |
| e. | Le manque de confort sur les trottoirs | | | | | |

QUELLES POLITIQUES DE REGULATION ?

20. Selon vous, que faudrait-il faire pour remédier aux problèmes d'embouteillages et aux effets négatifs du trafic en ville ?

| | | Tout à fait d'accord | Plutôt d'accord | Plutôt pas d'accord | Pas du tout d'accord | Sans réponse |
|----|---|----------------------|-----------------|---------------------|----------------------|--------------|
| a. | Responsabiliser les automobilistes | | | | | |
| b. | Restreindre l'accès du centre-ville à l'automobile | | | | | |
| c. | Rendre les transports collectifs plus performants | | | | | |
| d. | Faire payer aux automobilistes les nuisances qu'ils provoquent | | | | | |
| e. | Créer de nouvelles voies de circulation gratuite pour étaler les voitures | | | | | |
| f. | Créer de nouvelles voies payantes | | | | | |

21. Plus particulièrement, faudrait-il envisager certaines des mesures suivantes ?

| | | Tout à fait d'accord | Plutôt d'accord | Plutôt pas d'accord | Pas du tout d'accord | Sans réponse |
|----|--|----------------------|-----------------|---------------------|----------------------|--------------|
| a. | Prélever des taxes en fonction du niveau de nuisance des voitures | | | | | |
| b. | Instaurer un péage pour les automobilistes souhaitant circuler dans les zones encombrées | | | | | |
| c. | Augmenter le prix des stationnements | | | | | |
| d. | Augmenter les taxes sur l'essence | | | | | |

22. Dans le cas de la création d'un péage urbain visant à réduire la circulation en période de pointe, classer les types de péage qui vous semblent les plus opportuns (1 : le meilleur type de péage, 3 : le plus mauvais):

| | | |
|----|---|--|
| a. | Un péage sur les voiries encombrées | |
| b. | Un péage sur une zone de la ville particulièrement encombrée (l'automobiliste paye le temps de présence dans la zone) | |
| c. | Création d'une voie de contournement (ou tunnel) à péage | |

ACCEPTABILITE ET POLITIQUES D'ACCOMPAGNEMENT

23. Selon vous, quels conséquences découlent de la création des péages urbains (question 22) ?

| | | oui | non |
|----|--|-----|-----|
| a. | Amélioration de la fluidité du trafic | | |
| b. | Amélioration de la qualité de vie et de la convivialité dans l'espace public | | |
| c. | Fuite des activités économiques hors de ville | | |
| d. | Meilleur attrait pour les activités économiques | | |
| e. | Fuite des habitants aisés hors de ville (perte de contribuables) | | |
| f. | Amélioration démographique de la ville | | |
| g. | Atteinte à la liberté de déplacement | | |
| h. | Diminution de l'attractivité de la ville | | |
| i. | Discrimination vis à vis des pauvres | | |
| j. | Autre :..... | | |

24. Vous semble-t-il que la création d'un péage urbain soit très positif, plutôt positif, plutôt négatif ou très négatif pour les catégories de personnes suivantes :

| | | Très positif | Plutôt positif | Plutôt négatif | Très négatif | Sans réponse |
|----|---------------------------------|--------------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| a. | Les habitants du centre-ville | | | | | |
| b. | Les commerçants du centre-ville | | | | | |
| c. | Les habitants extérieurs | | | | | |
| d. | Les touristes | | | | | |

25. Pour une meilleure acceptabilité de la mise en place d'un péage urbain, quelles mesures d'accompagnement les autorités doivent envisager ?

| | | Tout à fait d'accord | Plutôt d'accord | Plutôt pas d'accord | Pas du tout d'accord | Sans réponse |
|----|---|----------------------|-----------------|---------------------|----------------------|--------------|
| a. | Développement des transports collectifs publics | | | | | |
| b. | Développement des pistes de transports non polluants (vélo, marche, patins...) | | | | | |
| c. | Incitation au covoiturage (tarif dégressif en fonction du nombre de passagers) | | | | | |
| d. | Système de park and ride (parking à l'entrée de la ville + transports collectifs publics) | | | | | |
| f. | Nouvelles routes | | | | | |
| e. | Autre :..... | | - | - | | - |

26. Pour la gestion du péage, souhaiteriez-vous que celle-ci soit publique ou privée ?

| | | |
|----|--------------------------|--|
| a. | Publique | |
| b. | Privée | |
| c. | Partenariat public/privé | |

27. Selon vous, comment doivent se redistribuer les recettes ?

| | | |
|----|------------------------------------|--|
| a. | Dans le budget de la commune | |
| b. | Dans le budget du canton | |
| c. | Dans le budget de la Confédération | |
| d. | Partage entre les 3 budgets | |

28. Pour quels investissements souhaiteriez-vous voir utilisées ces recettes ?

| | | |
|----|--|--|
| a. | Dans le budget général de la collectivité | |
| b. | Dans le développement de transports alternatifs (transports collectifs, vélo...) | |
| c. | Dans la création des nouvelles voiries | |
| d. | Répartition entre les 3 solutions | |

29. La décision d'instaurer un péage pourrait-elle influencer votre vote lors des prochaines élections ?

| | | |
|----|-----------|--|
| a. | Oui | |
| b. | Peut-être | |
| b. | Non | |

30. Si oui ou peut-être, de quelle manière ?

| | | |
|----|---|--|
| a. | Je voterais plutôt en faveur du candidat proposant de créer un péage urbain | |
| b. | Je voterais en défaveur de ce candidat | |

31. Comment percevez-vous le péage de congestion en général ?

| | | |
|----|---|--|
| a. | Comme une taxe supplémentaire | |
| b. | Comme un moyen de diminuer la pollution | |
| c. | Comme un moyen gérer le trafic | |

Annexe 2 : Tableaux accompagnant les ACM de la section 3 :

1 age

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| 50-69 | 128 | 128,00 | 128 | 128,00 |
| 30-49 | 189 | 189,00 | 189 | 189,00 |
| 18-29 | 71 | 71,00 | 71 | 71,00 |
| 70 et + | 28 | 28,00 | 28 | 28,00 |

2 sexe

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| homme | 253 | 253,00 | 253 | 253,00 |
| femme | 163 | 163,00 | 163 | 163,00 |

3 CSP

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| employé, ouvrier | 106 | 106,00 | 106 | 106,00 |
| Prof. intellectuelle | 129 | 129,00 | 129 | 129,00 |
| étudiant ou apprenti | 34 | 34,00 | 34 | 34,00 |
| cadre, prof. intermédiaire | 107 | 107,00 | 107 | 107,00 |
| sans emploi | 40 | 40,00 | 40 | 40,00 |

4 logement

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Plus loin | 41 | 41,00 | 41 | 41,00 |
| périphérie | 191 | 191,00 | 191 | 191,00 |
| CV | 91 | 91,00 | 91 | 91,00 |
| Ville (hors centre) | 93 | 93,00 | 93 | 93,00 |

5 travail

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Ville (hors cent | 64 | 64,00 | 64 | 64,00 |
| CV | 185 | 185,00 | 186 | 186,00 |
| Plus loin | 38 | 38,00 | 38 | 38,00 |
| périphérie | 96 | 96,00 | 96 | 96,00 |
| sans emploi | 32 | 32,00 | 32 | 32,00 |
| nc | 1 | 1,00 | Ventilée | |

21b péage de congestion

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| pas du tout d'accord | 171 | 171,00 | 171 | 171,00 |
| plutôt d'accord | 101 | 101,00 | 101 | 101,00 |
| plutôt pas d'accord | 78 | 78,00 | 78 | 78,00 |
| tout à fait d'accord | 54 | 54,00 | 54 | 54,00 |
| nc | 12 | 12,00 | 12 | 12,00 |

Tableau A1 : Apurement des modalités actives

| :Libellé | Poids relatif | Distance à l'origine | Axe 1 | Axe 2 | Axe 3 | Axe 4 | Axe 5 | Axe 1 | Axe 2 | Axe 3 | Axe 4 | Axe 5 | Axe 1 | Axe 2 | Axe 3 | Axe 4 | Axe 5 |
|---|---------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CHAPITRE VI. L'ACCEPTABILITE DU PEAGE DE CONGESTION : ANALYSES DE L'ENQUETE REALISEE EN SUISSE ROMANDE | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 age | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50-69 | 5,128 | 2,25000 | -0,10 | 0,44 | 0,07 | 0,39 | 0,04 | 0,11 | 3,43 | 0,10 | 3,73 | 0,04 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,07 | 0,00 |
| 30-49 | 7,572 | 1,20106 | 0,35 | 0,32 | -0,39 | -0,24 | -0,16 | 2,13 | 2,71 | 4,97 | 2,07 | 0,95 | 0,10 | 0,09 | 0,12 | 0,05 | 0,02 |
| 18-29 | 2,845 | 4,85916 | 0,44 | -1,47 | 0,93 | -0,17 | 0,38 | 1,27 | 20,85 | 10,71 | 0,38 | 2,04 | 0,04 | 0,44 | 0,18 | 0,01 | 0,03 |
| 70 et + | 1,122 | 13,85710 | -3,07 | -0,49 | -0,04 | 0,26 | -0,07 | 23,91 | 0,93 | 0,01 | 0,35 | 0,03 | 0,68 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2 sexe | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| homme | 10,136 | 0,64427 | -0,19 | 0,35 | 0,20 | -0,02 | -0,22 | 0,83 | 4,15 | 1,80 | 0,01 | 2,39 | 0,06 | 0,19 | 0,06 | 0,00 | 0,07 |
| femme | 6,530 | 1,55215 | 0,30 | -0,54 | -0,31 | 0,02 | 0,34 | 1,29 | 6,44 | 2,80 | 0,02 | 3,70 | 0,06 | 0,19 | 0,06 | 0,00 | 0,07 |
| 3 CSP | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| employé, ouvrier | 4,247 | 2,92453 | 0,44 | -0,44 | -0,99 | 0,40 | 0,32 | 1,88 | 2,74 | 18,07 | 3,22 | 2,16 | 0,07 | 0,07 | 0,33 | 0,06 | 0,04 |
| Prof. intellectuelle | 5,168 | 2,22481 | 0,17 | 0,48 | 0,17 | 0,11 | -0,96 | 0,35 | 4,03 | 0,68 | 0,30 | 23,22 | 0,01 | 0,10 | 0,01 | 0,01 | 0,41 |
| étudiant ou apprenti | 1,362 | 11,23530 | 0,55 | -2,14 | 1,67 | -0,46 | 0,02 | 0,93 | 21,17 | 16,60 | 1,36 | 0,00 | 0,03 | 0,41 | 0,25 | 0,02 | 0,00 |
| cadre, prof. intermédiaire | 4,287 | 2,88785 | 0,23 | 0,73 | 0,26 | -0,38 | 0,76 | 0,53 | 7,73 | 1,27 | 2,87 | 12,10 | 0,02 | 0,18 | 0,02 | 0,05 | 0,20 |
| sans emploi | 1,603 | 9,40000 | -2,82 | -0,52 | -0,06 | -0,02 | 0,19 | 28,89 | 1,48 | 0,03 | 0,00 | 0,29 | 0,85 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 4 logement | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Plus loin | 1,643 | 9,14634 | 0,25 | -0,41 | -0,38 | 1,46 | 0,80 | 0,23 | 0,93 | 1,05 | 16,50 | 5,12 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,23 | 0,07 |
| périphérie | 7,652 | 1,17801 | -0,23 | 0,52 | 0,32 | 0,20 | 0,20 | 0,91 | 7,01 | 3,40 | 1,48 | 1,43 | 0,04 | 0,23 | 0,09 | 0,03 | 0,03 |
| CV | 3,646 | 3,57143 | 0,40 | -0,80 | 0,18 | -0,14 | -0,91 | 1,34 | 7,93 | 0,52 | 0,32 | 14,76 | 0,05 | 0,18 | 0,01 | 0,01 | 0,23 |
| Ville (hors centre) | 3,726 | 3,47312 | -0,03 | -0,10 | -0,66 | -0,93 | 0,14 | 0,01 | 0,13 | 7,14 | 15,08 | 0,34 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,25 | 0,01 |
| 5 travail | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ville (hors centre) | 2,564 | 5,50000 | 0,26 | -0,17 | -0,92 | -0,89 | 0,40 | 0,39 | 0,25 | 9,43 | 9,61 | 1,97 | 0,01 | 0,01 | 0,15 | 0,14 | 0,03 |
| CV | 7,452 | 1,23656 | 0,29 | -0,12 | -0,17 | 0,12 | -0,48 | 1,45 | 0,38 | 0,96 | 0,50 | 8,44 | 0,07 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,19 |
| Plus loin | 1,522 | 9,94737 | 0,20 | -0,26 | 0,30 | 1,53 | 0,00 | 0,14 | 0,35 | 0,60 | 16,69 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,23 | 0,00 |
| périphérie | 3,846 | 3,33333 | 0,24 | 0,60 | 0,85 | -0,23 | 0,60 | 0,52 | 4,76 | 12,27 | 1,00 | 6,84 | 0,02 | 0,11 | 0,22 | 0,02 | 0,11 |
| sans emploi | 1,282 | 12,00000 | -3,19 | -0,45 | -0,09 | -0,02 | 0,20 | 29,55 | 0,87 | 0,04 | 0,00 | 0,24 | 0,85 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 21b péage de congestion | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| pas du tout d'accord | 6,851 | 1,43275 | 0,09 | -0,13 | -0,29 | 0,49 | 0,19 | 0,12 | 0,38 | 2,45 | 7,88 | 1,18 | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,17 | 0,02 |
| plutôt d'accord | 4,046 | 3,11881 | 0,24 | 0,16 | 0,41 | -0,50 | 0,39 | 0,51 | 0,35 | 3,05 | 4,80 | 2,96 | 0,02 | 0,01 | 0,06 | 0,08 | 0,05 |
| plutôt pas d'accord | 3,125 | 4,33333 | 0,02 | 0,24 | 0,28 | 0,23 | -0,29 | 0,00 | 0,62 | 1,10 | 0,76 | 1,30 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| tout à fait d'accord | 2,163 | 6,70370 | -0,47 | -0,19 | -0,15 | -0,53 | -0,90 | 1,09 | 0,27 | 0,21 | 2,88 | 8,50 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,12 |
| Sans réponse | 0,481 | 33,66670 | -1,22 | -0,23 | -0,59 | -1,90 | 0,00 | 1,63 | 0,09 | 0,72 | 8,19 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,11 | 0,00 |

Tableau A2 : Tableau des coordonnées, des contributions relatives et absolues

| Libellé | Effectif | Poids absolu | Distance à l'origine | Axe 1 | Axe 2 | Axe 3 | Axe 4 | Axe 5 |
|--------------------------------|----------|--------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 age | | | | | | | | |
| 50-69 | 128 | 128,00 | 2,25000 | -1,30 | 6,03 | 0,90 | 5,34 | 0,54 |
| 30-49 | 189 | 189,00 | 1,20106 | 6,56 | 6,03 | -7,20 | -4,48 | -2,98 |
| 18-29 | 71 | 71,00 | 4,85915 | 4,11 | -13,58 | 8,57 | -1,56 | 3,54 |
| 70 et + | 28 | 28,00 | 13,85710 | -16,81 | -2,71 | -0,23 | 1,41 | -0,38 |
| 2 sexe | | | | | | | | |
| homme | 253 | 253,00 | 0,64427 | -4,83 | 8,81 | 5,12 | -0,41 | -5,57 |
| femme | 163 | 163,00 | 1,55215 | 4,83 | -8,81 | -5,12 | 0,41 | 5,57 |
| 3 CSP | | | | | | | | |
| employé, ouvrier | 106 | 106,00 | 2,92453 | 5,27 | -5,20 | -11,75 | 4,78 | 3,84 |
| Prof. intellectuelle | 129 | 129,00 | 2,22481 | 2,36 | 6,55 | 2,38 | 1,52 | -13,09 |
| étudiant ou apprenti | 34 | 34,00 | 11,23530 | 3,34 | -13,00 | 10,14 | -2,80 | 0,09 |
| cadre, prof. intermédiaire | 107 | 107,00 | 2,88785 | 2,82 | 8,74 | 3,12 | -4,52 | 9,11 |
| sans emploi | 40 | 40,00 | 9,40000 | -18,77 | -3,46 | -0,42 | -0,13 | 1,27 |
| 4 logement | | | | | | | | |
| Plus loin | 41 | 41,00 | 9,14634 | 1,68 | -2,75 | -2,58 | 9,84 | 5,38 |
| périphérie | 191 | 191,00 | 1,17801 | -4,31 | 9,75 | 5,98 | 3,80 | 3,67 |
| CV | 91 | 91,00 | 3,57143 | 4,36 | -8,63 | 1,94 | -1,46 | -9,81 |
| Ville (hors centre) | 93 | 93,00 | 3,47312 | -0,36 | -1,13 | -7,24 | -10,14 | 1,50 |
| 5 travail | | | | | | | | |
| Ville (hors centre) | 64 | 64,00 | 5,50000 | 2,26 | -1,47 | -7,96 | -7,75 | 3,44 |
| CV | 185 | 185,00 | 1,24865 | 5,33 | -2,15 | -3,07 | 2,21 | -8,85 |
| Plus loin | 38 | 38,00 | 9,94737 | 1,28 | -1,68 | 1,95 | 9,86 | 0,01 |
| périphérie | 96 | 96,00 | 3,33333 | 2,73 | 6,74 | 9,53 | -2,62 | 6,73 |
| sans emploi | 32 | 32,00 | 12,00000 | -18,78 | -2,63 | -0,52 | -0,12 | 1,15 |
| Sans réponse | 1 | 1,00 | 415,00000 | 0,39 | -1,08 | -0,71 | -0,08 | 0,27 |
| 21b péage de congestion | | | | | | | | |
| pas du tout d'accord | 171 | 171,00 | 1,43275 | 1,49 | -2,18 | -4,87 | 8,42 | 3,19 |
| plutôt d'accord | 101 | 101,00 | 3,11881 | 2,72 | 1,85 | 4,78 | -5,79 | 4,47 |
| plutôt pas d'accord | 78 | 78,00 | 4,33333 | 0,18 | 2,36 | 2,78 | 2,22 | -2,86 |
| tout à fait d'accord | 54 | 54,00 | 6,70370 | -3,71 | -1,51 | -1,18 | -4,19 | -7,06 |
| Sans réponse | 12 | 12,00 | 33,66670 | -4,30 | -0,82 | -2,06 | -6,68 | 0,00 |

Tableau A3 : Valeurs test

a. utilisation voiture

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| toujours | 107 | 107,00 | 107 | 107,00 |
| souvent | 97 | 97,00 | 97 | 97,00 |
| parfois | 89 | 89,00 | 89 | 89,00 |
| exceptionnellement | 73 | 73,00 | 73 | 73,00 |
| jamais | 50 | 50,00 | 50 | 50,00 |

b. péage de congestion

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| tout à fait d'accord | 54 | 54,00 | 54 | 54,00 |
| plutôt d'accord | 101 | 101,00 | 101 | 101,00 |
| pas du tout d'accord | 171 | 171,00 | 171 | 171,00 |
| plutôt pas d'accord | 78 | 78,00 | 78 | 78,00 |
| | 12 | 12,00 | 12 | 12,00 |

c. développement des TC

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| tout à fait d'accord | 306 | 306,00 | 310 | 310,00 |
| plutôt d'accord | 80 | 80,00 | 85 | 85,00 |
| plutôt pas d'accord | 6 | 6,00 | Ventilée | |
| pas du tout d'accord | 7 | 7,00 | Ventilée | |
| Sans réponse | 12 | 12,00 | 21 | 21,00 |
| Pas de péage | 5 | 5,00 | Ventilée | |

d. nouvelles routes

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| tout à fait d'accord | 66 | 66,00 | 67 | 67,00 |
| plutôt d'accord | 83 | 83,00 | 86 | 86,00 |
| plutôt pas d'accord | 94 | 94,00 | 94 | 94,00 |
| pas du tout d'accord | 130 | 130,00 | 131 | 131,00 |
| Sans réponse | 38 | 38,00 | 38 | 38,00 |
| Pas de péage | 5 | 5,00 | Ventilée | |

e. recettes

| Libellé des modalités | Effectif avant apurement | Poids avant apurement | Effectif après apurement | Poids après apurement |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| TC | 137 | 137,00 | 139 | 139,00 |
| les 3 solutions | 117 | 117,00 | 119 | 119,00 |
| collectivité | 54 | 54,00 | 56 | 56,00 |
| nouvelles routes | 48 | 48,00 | 48 | 48,00 |
| Collectivité + TC | 23 | 23,00 | 24 | 24,00 |
| TC + nouvelles routes | 16 | 16,00 | 17 | 17,00 |
| Collectivité + nouvelles routes | 3 | 3,00 | Ventilée | |
| Pas de péage | 10 | 10,00 | 13 | 13,00 |
| Sans réponse | 8 | 8,00 | Ventilée | |

Tableau A4 : Apurement des modalités actives

Annexes 3 : Tableaux accompagnant les ACM de la section 4 :

| Numéro de l'axe factoriel | Valeur propre | Pourcentage | Pourcentage cumulé |
|----------------------------------|----------------------|--------------------|---------------------------|
| 1 | 0,4083 | 10,21 | 10,21 |
| 2 | 0,3095 | 7,74 | 17,94 |
| 3 | 0,2688 | 6,72 | 24,66 |
| 4 | 0,2544 | 6,36 | 31,03 |
| 5 | 0,2437 | 6,09 | 37,12 |
| 6 | 0,2292 | 5,73 | 42,85 |
| 7 | 0,2120 | 5,30 | 48,15 |
| 8 | 0,2073 | 5,18 | 53,33 |
| 9 | 0,2047 | 5,12 | 58,45 |
| 10 | 0,1919 | 4,80 | 63,24 |
| 11 | 0,1884 | 4,71 | 67,95 |
| 12 | 0,1717 | 4,29 | 72,25 |
| 13 | 0,1655 | 4,14 | 76,38 |
| 14 | 0,1635 | 4,09 | 80,47 |
| 15 | 0,1586 | 3,96 | 84,44 |
| 16 | 0,1443 | 3,61 | 88,05 |
| 17 | 0,1410 | 3,53 | 91,57 |
| 18 | 0,1223 | 3,06 | 94,63 |
| 19 | 0,1153 | 2,88 | 97,51 |
| 20 | 0,0995 | 2,49 | 100,00 |

Tableau A5 : Axes factoriels et valeurs propres

| Libellé | Poids relatif | Distance à l'origine | Coordonnées | | | | | Contributions | | | | | Cosinus ² | | | | |
|----------------------------|---------------|----------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | Axe 1 | Axe 2 | Axe 3 | Axe 4 | Axe 5 | Axe 1 | Axe 2 | Axe 3 | Axe 4 | Axe 5 | Axe 1 | Axe 2 | Axe 3 | Axe 4 | Axe 5 |
| utilisation voiture | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| souvent | 4,663 | 3,28866 | -0,04 | -0,69 | -0,38 | 0,41 | -0,54 | 0,02 | 7,08 | 2,49 | 3,04 | 5,48 | 0,00 | 0,14 | 0,04 | 0,05 | 0,09 |
| parfois | 4,279 | 3,67416 | 0,05 | 0,16 | -0,25 | -0,75 | -0,39 | 0,03 | 0,37 | 0,96 | 9,49 | 2,69 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,15 | 0,04 |
| toujours | 5,144 | 2,88785 | -0,79 | -0,17 | 0,61 | 0,06 | 0,07 | 7,86 | 0,48 | 7,23 | 0,06 | 0,10 | 0,22 | 0,01 | 0,13 | 0,00 | 0,00 |
| exceptionnellement | 3,510 | 4,69863 | 0,66 | 0,68 | 0,02 | 0,25 | 0,32 | 3,74 | 5,22 | 0,00 | 0,88 | 1,45 | 0,09 | 0,10 | 0,00 | 0,01 | 0,02 |
| jamais | 2,404 | 7,32000 | 0,72 | 0,41 | -0,17 | 0,06 | 1,12 | 3,05 | 1,32 | 0,26 | 0,03 | 12,47 | 0,07 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,17 |
| péage de congestion | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| pas du tout d'accord | 8,221 | 1,43275 | -0,63 | 0,17 | 0,44 | 0,17 | -0,16 | 7,93 | 0,79 | 6,04 | 0,98 | 0,92 | 0,27 | 0,02 | 0,14 | 0,02 | 0,02 |
| plutôt d'accord | 4,856 | 3,11881 | 0,37 | -0,38 | -0,21 | -0,70 | -0,04 | 1,66 | 2,25 | 0,80 | 9,44 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,01 | 0,16 | 0,00 |
| plutôt pas d'accord | 3,750 | 4,33333 | -0,01 | -0,76 | -0,66 | 0,20 | 0,11 | 0,00 | 6,92 | 6,05 | 0,57 | 0,19 | 0,00 | 0,13 | 0,10 | 0,01 | 0,00 |
| tout à fait d'accord | 2,596 | 6,70370 | 1,28 | 0,70 | 0,60 | 0,28 | 0,17 | 10,46 | 4,13 | 3,52 | 0,78 | 0,33 | 0,25 | 0,07 | 0,05 | 0,01 | 0,00 |
| Sans réponse | 0,577 | 33,66670 | 0,11 | 2,48 | -3,00 | 0,91 | 1,18 | 0,02 | 11,48 | 19,27 | 1,89 | 3,32 | 0,00 | 0,18 | 0,27 | 0,02 | 0,04 |
| dvpt TC | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| tout à fait d'accord | 14,904 | 0,34194 | 0,30 | -0,11 | 0,09 | 0,13 | -0,07 | 3,31 | 0,54 | 0,50 | 0,92 | 0,32 | 0,27 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,02 |
| plutôt d'accord | 4,087 | 3,89412 | -0,68 | -0,09 | -0,38 | -0,56 | 0,69 | 4,58 | 0,11 | 2,16 | 4,95 | 7,97 | 0,12 | 0,00 | 0,04 | 0,08 | 0,12 |
| Sans réponse | 1,010 | 18,80950 | -1,71 | 1,94 | 0,12 | 0,40 | -1,72 | 7,23 | 12,32 | 0,06 | 0,62 | 12,31 | 0,16 | 0,20 | 0,00 | 0,01 | 0,16 |
| nouvelles routes | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| plutôt d'accord | 4,135 | 3,83721 | -0,98 | -0,23 | -0,07 | -0,87 | 0,52 | 9,82 | 0,70 | 0,08 | 12,30 | 4,59 | 0,25 | 0,01 | 0,00 | 0,20 | 0,07 |
| tout à fait d'accord | 3,221 | 5,20896 | -0,35 | -0,33 | 0,52 | 1,36 | 0,54 | 0,98 | 1,14 | 3,25 | 23,37 | 3,86 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,35 | 0,06 |
| pas du tout d'accord | 6,298 | 2,17557 | 0,67 | 0,50 | 0,58 | -0,28 | 0,11 | 6,99 | 5,16 | 8,00 | 1,98 | 0,32 | 0,21 | 0,12 | 0,16 | 0,04 | 0,01 |
| plutôt pas d'accord | 4,519 | 3,42553 | 0,43 | -0,90 | -0,51 | -0,03 | -0,86 | 2,07 | 11,81 | 4,45 | 0,02 | 13,75 | 0,05 | 0,24 | 0,08 | 0,00 | 0,22 |
| Sans réponse | 1,827 | 9,94737 | -0,54 | 1,59 | -1,50 | 0,63 | -0,38 | 1,30 | 14,95 | 15,34 | 2,87 | 1,10 | 0,03 | 0,25 | 0,23 | 0,04 | 0,01 |
| recettes | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| les 3 solutions | 5,721 | 2,49580 | 0,03 | -0,17 | -0,21 | 0,60 | 0,49 | 0,01 | 0,56 | 0,91 | 8,06 | 5,75 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,14 | 0,10 |
| nouvelles routes | 2,308 | 7,66667 | -1,41 | -0,43 | 0,76 | 0,22 | 0,08 | 11,30 | 1,38 | 4,92 | 0,43 | 0,07 | 0,26 | 0,02 | 0,07 | 0,01 | 0,00 |
| TC | 6,683 | 1,99281 | 0,67 | -0,14 | -0,06 | 0,08 | -0,41 | 7,28 | 0,40 | 0,08 | 0,18 | 4,72 | 0,22 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,09 |
| collectivité | 2,692 | 6,42857 | -0,46 | 0,66 | 0,26 | -0,78 | 0,12 | 1,37 | 3,82 | 0,66 | 6,40 | 0,16 | 0,03 | 0,07 | 0,01 | 0,09 | 0,00 |
| collectivité+TC | 1,154 | 16,33330 | 1,24 | 0,45 | 0,80 | -1,36 | -0,17 | 4,33 | 0,77 | 2,75 | 8,40 | 0,13 | 0,09 | 0,01 | 0,04 | 0,11 | 0,00 |
| Pas de péage | 0,625 | 31,00000 | -1,53 | 1,65 | -0,55 | -0,21 | -2,24 | 3,59 | 5,52 | 0,71 | 0,11 | 12,83 | 0,08 | 0,09 | 0,01 | 0,00 | 0,16 |
| TC +nouvelles routes | 0,817 | 23,47060 | -0,74 | -0,54 | -1,77 | -0,83 | 1,24 | 1,08 | 0,78 | 9,49 | 2,23 | 5,16 | 0,02 | 0,01 | 0,13 | 0,03 | 0,07 |

Tableau A6: Tableau des coordonnées, des contributions relatives et absolues

| Libellé | Effectif | Poids absolu | Distance à l'origine | Axe 1 | Axe 2 | Axe 3 | Axe 4 | Axe 5 |
|-------------------------------|----------|--------------|----------------------|--------|-------|--------|-------|-------|
| utilisation voiture | | | | | | | | |
| souvent | 97 | 97,00 | 3,28866 | -0,48 | -7,70 | -4,26 | 4,58 | -6,01 |
| parfois | 89 | 89,00 | 3,67416 | 0,54 | 1,73 | -2,62 | -7,98 | -4,16 |
| toujours | 107 | 107,00 | 2,88785 | -9,47 | -2,03 | 7,37 | 0,67 | 0,82 |
| exceptionnellement | 73 | 73,00 | 4,69863 | 6,20 | 6,38 | 0,17 | 2,37 | 2,99 |
| jamais | 50 | 50,00 | 7,32000 | 5,42 | 3,11 | -1,27 | 0,44 | 8,47 |
| péage de congestion | | | | | | | | |
| pas du tout d'accord | 171 | 171,00 | 1,43275 | -10,68 | 2,94 | 7,56 | 2,97 | -2,80 |
| plutôt d'accord | 101 | 101,00 | 3,11881 | 4,31 | -4,37 | -2,43 | -8,11 | -0,47 |
| plutôt pas d'accord | 78 | 78,00 | 4,33333 | -0,13 | -7,39 | -6,44 | 1,93 | 1,09 |
| tout à fait d'accord | 54 | 54,00 | 6,70370 | 10,09 | 5,52 | 4,75 | 2,17 | 1,38 |
| Sans réponse | 12 | 12,00 | 33,66670 | 0,40 | 8,71 | -10,52 | 3,21 | 4,16 |
| dvpt TC | | | | | | | | |
| tout à fait d'accord | 306 | 306,00 | 0,35948 | 10,55 | -3,77 | 3,08 | 4,36 | -2,34 |
| plutôt d'accord | 80 | 80,00 | 4,20000 | -6,79 | -1,22 | -4,15 | -5,86 | 6,85 |
| plutôt pas d'accord | 6 | 6,00 | 68,33330 | -1,20 | 1,46 | 0,94 | -0,76 | 0,22 |
| pas du tout d'accord | 7 | 7,00 | 58,42860 | -2,78 | 3,04 | 2,33 | 0,93 | -1,41 |
| Sans réponse | 12 | 12,00 | 33,66670 | -6,16 | 6,97 | -0,41 | 2,30 | -6,28 |
| Pas de péage | 5 | 5,00 | 82,20000 | -4,09 | 3,81 | -0,59 | -0,24 | -4,20 |
| nouvelles routes | | | | | | | | |
| plutôt d'accord | 83 | 83,00 | 4,01205 | -9,64 | -3,12 | -0,56 | -9,06 | 6,07 |
| tout à fait d'accord | 66 | 66,00 | 5,30303 | -2,90 | -3,21 | 4,63 | 12,11 | 5,23 |
| pas du tout d'accord | 130 | 130,00 | 2,20000 | 9,43 | 6,86 | 8,11 | -3,87 | 1,72 |
| plutôt pas d'accord | 94 | 94,00 | 3,42553 | 4,76 | -9,90 | -5,66 | -0,38 | -9,48 |
| Sans réponse | 38 | 38,00 | 9,94737 | -3,48 | 10,28 | -9,70 | 4,09 | -2,47 |
| Pas de péage | 5 | 5,00 | 82,20000 | -4,09 | 3,81 | -0,59 | -0,24 | -4,20 |
| recettes | | | | | | | | |
| les 3 solutions | 117 | 117,00 | 2,55556 | 0,62 | -2,42 | -2,66 | 7,67 | 6,48 |
| nouvelles routes | 48 | 48,00 | 7,66667 | -10,40 | -3,16 | 5,57 | 1,60 | 0,61 |
| TC | 137 | 137,00 | 2,03650 | 9,51 | -1,96 | -0,97 | 1,20 | -5,83 |
| collectivité | 54 | 54,00 | 6,70370 | -3,72 | 5,48 | 2,12 | -6,32 | 0,99 |
| collectivité+ TC | 23 | 23,00 | 17,08700 | 6,33 | 2,36 | 4,19 | -6,57 | -1,26 |
| Sans réponse | 8 | 8,00 | 51,00000 | -1,12 | 1,76 | 0,08 | -0,57 | -2,43 |
| Pas de péage | 10 | 10,00 | 40,60000 | -5,01 | 5,63 | -2,24 | -0,20 | -7,03 |
| TC + nouvelles routes | 16 | 16,00 | 25,00000 | -2,91 | -2,06 | -7,31 | -3,34 | 4,98 |
| collectivité+nouvelles routes | 3 | 3,00 | 137,66700 | -1,68 | -0,78 | -0,73 | -1,69 | 0,51 |

Tableau A7 : Valeurs test

BIBLIOGRAPHIE DE LA PARTIE III

A.R.E., 2004 : "Equitable et efficiente La redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations (RPLP) en Suisse", Office fédéral du développement territorial, décembre 2004, <http://www.are.admin.ch/are/fr/verkehr/lsva/> .

ABADIE G., 2002 : "La mise en place de la redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations en suisse", *Notes de synthèse du SES*, nov-déc., 6 p.

ABRAHAM C., 2001 : "Amertume et acceptabilité des péages : 1. Les émeutes du pont d'Arcole", *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n° 40, pp. 53-66.

ARNOTT R., A. DE PALMA et R. LINDSEY, 1993 : "A structural model of peak-period congestion: a traffic bottleneck with elastic demand", *American Economic Review*, n° 83, pp. 161-179.

ASSEMBLEE NATIONALE, 2004 : "Rapport d'information sur la proposition de directive du Parlement européen et du Conseil relative à la taxation des poids lourds pour l'utilisation de certaines infrastructures", présenté par Christian PHILIP, député, <http://www.assemblee-nationale.fr/12/europe/rap-info/i1461.asp> .

C.E.M.T., 2003 : "La réforme des taxes et des redevances dans les transports", Les éditions de l'OCDE, Paris, 216 p.

C.E.R.T.U., 2000 : "Le financement des déplacements urbains : quelle acceptabilité pour les péages urbains", Ministère de l'Equipement, des Transports et du Tourisme, www.certu.fr.

C.E.R.T.U., 2001 : "La tarification des déplacements automobiles urbains : la question de l'acceptabilité", Ministère de l'Equipement, des Transports et du Tourisme.

CISIA, 2001 : "SPAD : Aide à l'interprétation", CISIA-CERESTA, www.cisia.com.

CROZET Y. et G. MARLOT, 2001 : "Péage urbain et ville « soutenable » : figures de la tarification et avatars de la raison économique", *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n° 40, pp. 79-113.

DE PALMA A. et C. FONTAN, 2001 : "Choix modal et valeurs du temps en Île-de-France", *Recherche – Transports – Sécurité*, n°71, pp. 24-46.

ECONOMIC AND SOCIAL COMMISSION FOR ASIA AND THE PACIFIC, 2001 : "Traffic and transportation for sustainable environment, mobility and access : Application of a

Comprehensive and Integrated Approach to Policy Development in the Rattanakosin Area of Bangkok", United Nations, New York.

ISON S., 2000 : "Local authority and academic attitudes to urban road pricing : a UK perspective", *Transport Policy*, n° 7, pp. 269-277.

JONES P., 1991 : "UK public attitudes to Urban Traffic problems and possible counter measures : A poll of polls", *Environment and Policy C : Government and Policy*, n° 9, pp. 245-256.

JONES P., 1995 : "Road Pricing : The Public Viewpoint", in B. JOHANSSON et L.G. MATTSSON (eds.), *Road pricing : Theory, Empirical, Assessment and Policy*, Kluwer Academic Publishers, pp. 159-179.

JOWELL R., S. WITHERSPOON et L. BROOK, 1990 : *British Social Attitudes : The Seventh Report*, Gower, Aldershot.

LITMAN T., 1999 : "Using Road Pricing Revenue: Economic Efficiency and Equity Considerations", Working paper, *Victoria Transport Policy Institute*, (www.vtpi.org).

LITMAN T., 2005 : "London Congestion Pricing : Implications for Other Cities", *VTPI*, www.vtpi.org

O.C.T.A., 2004 : "Fiscal year 2004 annual report", <http://www.91expresslanes.com/generalinfo/91annualreport.pdf>

PATS, 2000 : PATS Project, *Socio-Economic Principles for Price Acceptability*, Deliverable D2, European Commission DG VII.

PRIMA, 2000 : "Surveys, Interviews and Media Analysis", European Commission, www.certu.fr/internat/peuro/prima/prima.htm.

PRUD'HOMME R. et J. P. BOCAREJO, 2005 : "L'expérience du péage de Londres", *Transports*, n°430, pp. 73-81.

QUINET E., 2005 : "Peut-on se fier aux calculs de coûts externes", *Transports*, n°429, pp.5-14.

RAUX C. et S. SOUCHE, 2001 : "L'acceptabilité des changements tarifaires dans le secteur des transports : comment concilier efficacité et équité ?", *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, n°4/2001, pp. 539-558.

REYMOND M., 2003b : "Le péage urbain : la preuve par Singapour", *Le Monde*, 21 février 2003.

REYMOND M., 2004a : "Les politiques d'accompagnement du péage urbain : étude sur l'acceptabilité en Suisse", *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, n°4/2004, pp. 609-630.

REYMOND M., 2004b : "L'acceptabilité du péage urbain : analyse des résultats de l'enquête réalisée en Suisse Romande", document de travail, *ASTRA*.

REYMOND M., 2004c : "La tarification de la congestion : l'expérience réussie du péage urbain de Singapour", *Transports*, n°426, pp. 249-254.

REYMOND M., 2005 : "Les péages urbains contre les congestions", *Tracés*, n° 13 (131), pp. 14-17.

RIETVELD P. et E. T. VERHOEF, 1998 : "Social Feasibility of Policies to Reduce Externalities in Transport", in K.J. BUTTON et E.T. VERHOEF (eds.), *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility*. Edward Elgar, Cheltenham, pp. 285-305.

SMALL K. et J.A. GOMEZ-IBANEZ, 1998 : "Road pricing for congestion management : transition from theory to policy" in K.J. BUTTON et E.T. VERHOEF (eds.), *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility*. Edward Elgar, Cheltenham, pp. 213-246.

SOUCHE S., 2003 : "Péage urbain et équité: une revue de la littérature", *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°43, pp. 119-146.

TfL, 2001a : "Draft Transport Strategy : Public Opinion Poll", *Transport For London* : www.london.gov.uk/mayor/strategies/transport.

TfL, 2001b : "The Mayor 's Transport Strategy", *Transport For London*, GLA Publications : www.london.gov.uk/mayor/strategies/transport.

TfL, 2005 : "Central London Congestion Charging Impacts Monitoring Third Annual Report", *Transport For London* : www.tfl.gov.uk/tfl/cclondon/pdfs/ThirdAnnualReportFinal.pdf .

TRANSPORT PUBLIC, 2000 : "Interview de Ken Livingstone", n°996.

CONCLUSION GENERALE

1. Synthèse

Si le Chapitre I avait pour vocation de revenir sur les différentes notions soulevées dans la thèse, il a également permis de recentrer le sujet autour de l'externalité de congestion automobile en ville. Les coûts de congestion n'ont pas forcément la même valeur selon les méthodes de calcul. Nous avons essayé de faire transparaître les différentes approches de la notion de congestion (microéconomique/macroéconomique, ingénierie/économique). En s'interrogeant sur le rôle du décideur politique, nous avons également présenté les différents instruments tarifaires d'internalisation de la congestion.

Dans la lignée de ce chapitre, le Chapitre II effectue un retour sur les modèles théoriques fondateur du péage de congestion. Embrassant près d'un siècle de recherches, d'A. PIGOU et F. KNIGHT à E. VERHOEF, en passant par W. VICKREY, K. SMALL et ARNOTT et al., le péage de congestion est aujourd'hui à lui tout seul un axe de recherche dans de nombreux laboratoires. Il semblait important d'insister ici sur les oppositions entre les modèles de flux et ceux de files d'attente. Nos modélisations étant inspirées du modèle de files d'attente, nous avons fait le choix de le développer dans ce chapitre. Dans un contexte de mise en place optimale du péage, les pouvoirs publics peuvent également prendre en compte l'hétérogénéité des automobilistes par le biais d'une tarification de second rang (tarification discriminante ou voirie alternative).

Cette notion d'hétérogénéité n'a pas été prise en considération dans nos Chapitres III et IV. En effet, notre modèle considère que les automobilistes rationnels sont homogènes et qu'ils ne diffèrent ni par leur valeur du temps ni par leurs lieux de domicile et de travail. Ce modèle, utilisant l'appareil mathématique, s'appuie sur les travaux d'ARNOTT et al, ainsi que sur ceux de T. TABUCHI. A partir d'un modèle de files d'attente, les automobilistes ont le choix entre deux modes : une voirie à péage et un transport collectif. Ceci permet de déterminer différentes répartitions modales selon les tarifications mises en application sur la voie à péage ou dans les transports collectifs. L'apport théorique principal de la thèse réside dans le fait que nous avons pris en

considération les recettes du péage urbain et avons envisagé plusieurs politiques de redistribution : les recettes pouvant être affectées intégralement ou partiellement vers les transports collectifs ou vers les routes. Dans l'optique d'une affectation partielle des revenus du péage vers les transports en commun ou vers les routes, l'autre programme concerné était le budget global de la collectivité. Ainsi, nous avons d'abord considéré les solutions en coin lorsque les recettes sont intégralement orientées vers les transports collectifs (Chapitre III). Les modes de tarifications choisis dans ces cas de figures sont : péage de pointe et péage uniforme pour la route ; et prix du billet fixé au coût moyen et au coût marginal pour les transports collectifs. Dans le modèle général (Chapitre IV), nous avons élargi le champ d'action des pouvoirs publics avec deux types de politiques de redistribution : vers les transports en commun et le budget ; et vers les routes et le budget. Les résultats, développés ci-dessous, nous ont permis de mettre en avant une politique optimale de redistribution des recettes permettant une acceptabilité plus grande du péage.

A l'heure où le péage urbain suscite de nombreux débats portés sur la place publique, le Chapitre V a permis de faire le point sur les divers types d'application de cet instrument. Nous avons fait le choix de ne retenir que quatre expériences de péage dans le monde. De par leur actualité et leur histoire, Singapour et Londres semblaient être des exemples appropriés pour qui s'intéresse quelque peu au concept de péage urbain. Les routes de première classe californiennes n'étant pas urbaines méritaient malgré tout de faire partie des exemples choisis en raison de leur proximité avec la théorie et les modèles de tarification de second rang. Enfin, même si la RPLP instaurée en Suisse est l'expérience la plus éloignée de notre problématique, il convenait de présenter cette nouvelle forme de tarification kilométrique transférable au milieu urbain.

Enfin, le Chapitre VI, inscrit dans un cadre empirique, nous a donné une idée de l'acceptabilité du péage. Par le biais d'une étude réalisée en Suisse, nous avons essayé de mesurer le niveau d'acceptation de cet instrument et d'observer quelles pourraient être les politiques d'accompagnement à mettre en œuvre pour le rendre plus acceptable.

2. Résultats

La mise en place d'un péage de congestion dans une ville résulte de l'aboutissement d'un long processus de recherche, de prospective et de combats idéologiques. Mais au-delà des

difficultés technique et juridique de mise en application, les pouvoirs publics se heurtent aussi à l'hostilité des populations et en particulier à celle des automobilistes. S'il est communément admis par les théoriciens et les experts que le péage de congestion a de réelles vertus en terme de régulation de la circulation automobile, cet instrument tarifaire demeure encore méconnu et mal perçu par l'ensemble de la population.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons axé notre recherche sur ce point. A savoir, quel est le niveau d'acceptabilité du péage chez les personnes concernées (automobilistes ou non) et quelles mesures d'accompagnement les pouvoirs publics peuvent-ils mettre en place pour rendre le péage plus acceptable.

Nous avons supposé de manière *ad hoc* que l'acceptation du péage est plus élevée si les recettes sont prises en considération. Compte tenu de cette hypothèse, lorsque certains critères sont réunis, l'acceptabilité est plus grande. Dans un premier temps, si les individus savent que les recettes sont réaffectées *ex post* vers le secteur des transports, et non vers le budget général, le péage est mieux perçu. Il est mieux perçu également lorsque le coût total est minimisé. Enfin, si le nombre d'automobilistes diminue, entraînant ainsi une baisse des externalités environnementales, le péage n'en est que mieux accepté. En plus de ces critères, nous suggérons qu'il est indispensable que les pouvoirs publics proposent aux automobilistes exclus du péage un mode de transport alternatif.

Pour répondre à cette problématique, nous avons élaboré un modèle mathématique qui nous a permis de déterminer, suivant plusieurs hypothèses restrictives, une politique optimale de l'acceptabilité du péage. Ainsi, il s'avère essentiel de redistribuer une part (α) des recettes du péage vers les transports collectifs, quand une autre part ($1-\alpha$) est affectée vers le budget de la collectivité. Dans cette optique, le prix du billet des transports collectifs doit être fixé au coût moyen. Cette part "*optimale*" d'affectation des recettes dépend de plusieurs paramètres tels que *la capacité de la voirie, le poids des coûts fixes, le coût du temps, le coût marginal...* Les pouvoirs publics peuvent agir sur deux de ces paramètres (*la capacité de la voirie et le poids des coûts fixes*) et ainsi faire évoluer la part optimale. Par exemple, avec une faible capacité de voirie et des coûts fixes très élevés, la part affectée vers les transports collectifs tend vers 1.

Pour mieux percevoir la portée de ces modélisations, nous avons élaboré une étude axée sur l'acceptabilité du péage et sur les mesures d'accompagnement à mettre en œuvre

pour le rendre plus acceptable au regard des citoyens. Les premiers résultats de l'enquête effectuée en Suisse Romande sont similaires à ceux des enquêtes réalisées dans d'autres villes européennes : le péage est rejeté par deux personnes sur trois. Mais lorsque l'on affine notre étude, il ressort que le péage de congestion est mieux accepté si les individus savent que les recettes sont affectées vers les transports collectifs. Dans cette étude, il résulte également que les personnes interrogées sont en accord avec l'idée de réduire l'usage de l'automobile en ville.

Le cadre urbain se dégradant, les pouvoirs publics se doivent d'agir afin de préserver l'environnement des cités et c'est dans cette optique qu'une politique urbaine visant à tarifer les voies encombrées permettrait de réduire les coûts sociaux de l'automobile. Pour que la liberté des usagers ne soit pas entravée, ceux-ci doivent toujours avoir une solution parallèle à la voirie payante (développement d'une politique de transports collectifs). De plus, en terme d'acceptabilité et par souci d'équité, les autorités se doivent d'orienter les distributions des recettes de sorte que les usagers exclus ne voient pas leur situation s'aggraver compte tenu du péage. Enfin, une campagne d'information doit permettre aux citoyens de bien percevoir la finalité d'une telle politique pour que le péage ne soit pas ressenti comme une taxe supplémentaire visant à satisfaire le budget de l'Etat.

3. Futurs axes de recherche

Dans la continuité de cette thèse, point de départ de recherches futures, il conviendrait de développer certains éléments et d'insister sur plusieurs points.

- (1) *Axe de recherche 1.* Dans le prolongement du modèle présenté dans la partie II, il pourrait être intéressant d'élargir le champ des redistributions à trois programmes. Ainsi les pouvoirs publics pourraient choisir d'affecter les recettes vers les transports collectifs (part α), les routes (part β), et le budget de la collectivité (part $1 - \alpha - \beta$)¹³¹. Nous pourrions affiner de ce fait la politique optimale de redistribution des recettes.

¹³¹ Avec $\alpha + \beta$ compris entre 0 et 1.

- (2) *Axe de recherche 2* Toujours à partir du modèle évoqué, nous envisageons de prendre en considération l'hétérogénéité des automobilistes comme cela l'a déjà été évoqué dans le Chapitre II. Il semble que si l'on prend en compte la promiscuité dans les transports collectifs et si l'on considère qu'il existe deux classes d'individus différenciés par leur valeur du temps et/ou leur niveau de tolérance à la promiscuité, le modèle n'en pourrait être que plus pertinent¹³².
- (3) *Axe de recherche 3*. Si E. VERHOEF¹³³ a déjà étudié la notion d'information dans les modèles de péage de congestion, le champ de recherche sur ce thème reste encore peu abordé. Il nous apparaît que l'information des individus sur les niveaux de congestion serait décisive dans les choix de modes de transports et d'itinéraires. Aussi, dans le cadre de travaux futurs, nous envisageons d'approfondir cette question.
- (4) *Axe de recherche 4*. Au cours de cette thèse, nous avons considéré que le gestionnaire du péage était public et que la question de l'acceptabilité ne concernait que les pouvoirs publics. Dans le cadre de recherches futures, nous projetons de nous interroger sur la question du statut de l'entreprise gestionnaire (public ou privé) et de comparer leurs divers modes de gestion (maximisation des recettes ou du bien-être). Il semblerait pertinent ensuite de confronter leurs ambitions avec l'acceptabilité des individus.
- (5) *Axe de recherche 5* Enfin, l'enquête réalisée en Suisse s'inscrit dans une étude plus globale. Nous avons fait le choix d'effectuer des enquêtes similaires sur les villes de Bâle et de Lugano dont les politiques de déplacement diffèrent de celle de Lausanne. L'ambition serait de proposer une analyse comparative Suisse de l'acceptabilité du péage de congestion¹³⁴.

¹³² A ce sujet voir l'article de HUANG (2000), noté en bibliographie de la partie II.

¹³³ Voir par exemple : R. EMMERINK, E. T. VERHOEF, P. NIJKAMP et P. RIETVELD, 1998 : "Information policy in road transport with elastic demand: Some welfare economic considerations ", *European Economic Review*, n° 42 (1), pp. 71-95.

¹³⁴ Dont les premiers résultats sont évoqués dans M. REYMOND (2005), noté en bibliographie de la partie III.

TABLE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE

| | |
|--|-------------|
| <i>Figure 1 : Evolution des densités automobiles entre 1985 et 2003.....</i> | <i>p. 3</i> |
| <i>Figure 2 : Distribution des horaires de début du travail.....</i> | <i>p. 5</i> |

CHAPITRE I.

| | |
|---|--------------|
| <i>Figure 1 : L'évolution des modes de déplacement en Europe sur la période 1970-1998.....</i> | <i>p. 13</i> |
| <i>Figure 2 : Externalité et coût social.....</i> | <i>p. 15</i> |
| <i>Figure 3 : (a) courbe vitesse-densité, (b) courbe vitesse-débit, (c) courbe débit-densité.....</i> | <i>p. 22</i> |
| <i>Figure 4 : Courbe de coût moyen de déplacement $C(q)$, la courbe de coût marginal $c(q)$ et courbe de demande de déplacement $p(q)$</i> | <i>p. 24</i> |
| <i>Figure 5 : La tarification de la congestion.....</i> | <i>p. 26</i> |
| <i>Figure 6 : Le péage modulable en fonction du temps (avec les automobilistes qui se rendent au même endroit en même temps).....</i> | <i>p. 28</i> |
| <i>Figure 7 : Les choix du décideur face aux différentes contraintes.....</i> | <i>p. 40</i> |

CHAPITRE II.

| | |
|---|--------------|
| <i>Figure 1 : Externalité, écart entre coût social et coût privé.....</i> | <i>p. 48</i> |
| <i>Figure 2 : Surplus des usagers : saturation, péage et perte sociale.....</i> | <i>p. 52</i> |
| <i>Figure 3 : Péage économique pur et péage au coût marginal privé.....</i> | <i>p. 53</i> |
| <i>Figure 4 : Péage optimal dans le modèle indépendant du temps.....</i> | <i>p. 54</i> |
| <i>Figure 5 : Equilibres avec chaque régime de tarification.....</i> | <i>p. 68</i> |
| <i>Figure 6 : Equilibre sans péage dans les modèles dépendant du temps.....</i> | <i>p. 73</i> |
| <i>Figure 7 : L'optimum social dans les modèles dynamiques.....</i> | <i>p. 74</i> |
| <i>Figure 8 : Offre de trajet différenciée (voirie gratuite versus voirie payante).....</i> | <i>p. 76</i> |
| <i>Figure 9 : Evolution du péage.....</i> | <i>p. 83</i> |
| <i>Figure 10 : Evolution du temps de trajet.....</i> | <i>p. 84</i> |
| <i>Figure 11 : Evolution du gain en bien-être dans le scénario de base.....</i> | <i>p. 85</i> |
| <i>Figure 12 : Evolution du gain en bien-être avec une demande proportionnelle à la capacité.....</i> | <i>p. 86</i> |
| <i>Figure 13 : Evolution du gain en bien-être avec une forte élasticité.....</i> | <i>p. 87</i> |
| <i>Figure 14 : Evolution du gain en bien-être avec une forte congestion.....</i> | <i>p. 88</i> |
| <i>Figure 15 : Evolution du gain en bien-être avec une inversion des capacités.....</i> | <i>p. 89</i> |

CHAPITRE III.

| | |
|--|---------------|
| <i>Figure 1 : Mode de transport différencié.....</i> | <i>p. 106</i> |
| <i>Figure 2 : La redistribution des recettes du péage dans le cas de l'équité horizontale.....</i> | <i>p. 117</i> |
| <i>Figure 3 : Les coûts d'horaires et le niveau du péage.....</i> | <i>p. 126</i> |
| <i>Figure 4 : Evolution du niveau des recettes dans le temps.....</i> | <i>p. 128</i> |

CHAPITRE IV.

| | |
|--|---------------|
| <i>Figure 1 : cas étudiés dans le chapitre IV.....</i> | <i>p. 149</i> |
| <i>Figure 2 : La répartition modale en fonction de a.....</i> | <i>p. 151</i> |
| <i>Figure 3 : Les recettes du péage en fonction de a.....</i> | <i>p. 152</i> |
| <i>Figure 4 : L'évolution du coût total en fonction de a.....</i> | <i>p. 154</i> |
| <i>Figure 5 : Courbe du coût total en fonction de a.....</i> | <i>p. 160</i> |
| <i>Figure 6 : La répartition modale en fonction de a.....</i> | <i>p. 164</i> |
| <i>Figure 7 : Les recettes du péage en fonction de a.....</i> | <i>p. 165</i> |
| <i>Figure 8 : L'évolution du coût total en fonction de a.....</i> | <i>p. 167</i> |
| <i>Figure 9 : L'évolution du coût total en fonction de a.....</i> | <i>p. 173</i> |
| <i>Figure 10 : Evolution du nombre d'automobilistes en fonction d' a.....</i> | <i>p. 176</i> |
| <i>Figure 11 : Evolution des recettes en fonction d' a.....</i> | <i>p. 178</i> |
| <i>Figure 12 : Evolution des coûts totaux en fonction de a.....</i> | <i>p. 179</i> |
| <i>Figure 13 : Evolution des coûts totaux en fonction de a.....</i> | <i>p. 182</i> |
| <i>Figure 14 : Evolution du nombre d'automobilistes avec a.....</i> | <i>p. 183</i> |
| <i>Figure 15 : Evolution des recettes avec a.....</i> | <i>p. 183</i> |
| <i>Figure 16 : Evolution des coûts totaux avec $K = 10000$.....</i> | <i>p. 185</i> |
| <i>Figure 17 : Evolution du nombre d'automobilistes avec $K = 10000$.....</i> | <i>p. 185</i> |
| <i>Figure 18 : La répartition modale en fonction de a.....</i> | <i>p. 191</i> |
| <i>Figure 19 : Les recettes du péage en fonction de a.....</i> | <i>p. 192</i> |
| <i>Figure 20 : Evolution des coûts totaux quand $K = 6\ 000$.....</i> | <i>p. 203</i> |
| <i>Figure 21 : Evolution des coûts totaux quand $F = 10\ 000$.....</i> | <i>p. 203</i> |
| <i>Figure 22 : Evolution des coûts totaux quand $F = 5\ 000$.....</i> | <i>p. 203</i> |

CHAPITRE V.

| | |
|---|---------------|
| <i>Figure 1 : Le centre des affaires de Singapour.....</i> | <i>p. 217</i> |
| <i>Figure 2 : Vitesse du trafic londonien pendant la période de pointe du matin.....</i> | <i>p. 220</i> |
| <i>Figure 3 : Pourcentage d'habitants favorables (et défavorables) au péage de congestion en fonction du lieu de résidence.....</i> | <i>p. 225</i> |
| <i>Figure 4 : Niveau de congestion pendant les périodes payantes.....</i> | <i>p. 226</i> |

| | |
|---|--------|
| <u>Figure 5</u> : Schéma de la SR 91..... | p. 233 |
| <u>Figure 6</u> : Les recettes totales du péage..... | p. 236 |
| <u>Figure 7</u> : Répartition modale du transport des marchandises en Europe..... | p. 242 |
| <u>Figure 8</u> : Evolution des montants du taux de redevance..... | p. 245 |
| <u>Figure 9</u> : Exemples de calculs de la RPLP | p. 246 |

CHAPITRE VI.

| | |
|--|--------|
| <u>Figure 1</u> : Perception de la congestion..... | p. 255 |
| <u>Figure 2</u> : Acceptabilité du péage de congestion..... | p. 257 |
| <u>Figure 3</u> : Répartition horaire des départs du domicile (ensemble de la population)..... | p. 260 |
| <u>Figure 4</u> : Répartition horaire des départs en fonction de l'utilisation de la voiture..... | p. 260 |
| <u>Figure 5</u> : Perception de la congestion en fonction de la fréquence d'utilisation de l'automobile..... | p. 264 |
| <u>Figure 6</u> : Perception de la congestion en fonction du lieu d'habitation..... | p. 265 |
| <u>Figure 7</u> : Acceptabilité des différentes politiques de régulation..... | p. 269 |
| <u>Figure 8</u> : Les automobilistes face au péage de congestion..... | p. 272 |
| <u>Figure 9</u> : Affectation des recettes en fonction de l'utilisation de la voiture..... | p. 275 |
| <u>Figure 10</u> : Vision générale du péage de congestion..... | p. 277 |
| <u>Figure 11</u> : système d'axes 4/5..... | p. 283 |
| <u>Figure 12</u> : système d'axes 4/1..... | p. 285 |
| <u>Figure 13</u> : système d'axes 4/3..... | p. 286 |
| <u>Figure 14</u> : Les politiques d'accompagnement du péage de congestion..... | p. 290 |
| <u>Figure 15</u> : Le développement des TC comme politique d'accompagnement au péage en fonction de la perception du péage de congestion..... | p. 294 |
| <u>Figure 16</u> : Le développement de nouvelles routes gratuites comme politique d'accompagnement au péage en fonction de la perception du péage de congestion..... | p. 296 |
| <u>Figure 17</u> : Combinaisons d'axes. AXES 1/2..... | p. 299 |

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

Tableau 1 : Densité automobile par pays.....p. 2

CHAPITRE I.

Tableau 1 : Les différents impacts des instruments tarifaires.....p. 37

Tableau 2 : Les impacts sur l'équité des instruments tarifaires.....p. 39

CHAPITRE II.

Tableau 1 : Valeurs des paramètres utilisés pour la simulation.....p. 81

Tableau 2 : Résultats avec le scénario de base.....p. 82

CHAPITRE III.

Tableau 1 : Appuis potentiels ou groupes de pression.....p. 111

Tableau 2 : L'orientation des revenus du péage dans la région de Los Angeles.....p. 114

Tableau 3 : Analyse des redistributions des recettes du péage urbain selon les différents types d'équité.....p. 119

Tableau 4 : Les gagnants et les perdants des péages urbains.....p. 120

Tableau 5 : Récapitulatif des résultats avec $C_b = \text{Coût Marginal}$ (quand $N > N_{\text{seuil}}$).....p. 132

Tableau 6 : Récapitulatif des résultats avec $C_b = \text{Coût Moyen}$ (quand $N > N_{\text{seuil}}$).....p. 141

CHAPITRE IV.

Tableau 1 : Récapitulatif des résultats du paragraphe 2.2. avant redistribution.....p. 150

Tableau 2 : Récapitulatif des résultats du paragraphe 3.2. avant redistribution.....p. 155

Tableau 3 : Tableau de variation du coût total.....p. 159

Tableau 3 : Récapitulatif des résultats du paragraphe 2.2. avant redistribution.....p. 163

Tableau 4 : Récapitulatif des résultats du paragraphe 3.2. avant redistribution.....p. 168

Tableau 5 : Tableau de variation du nombre d'automobilistes.....p. 169

Tableau 6 : Tableau de variation des recettes.....p. 171

Tableau 7 : Tableau de variation du coût total.....p. 172

Tableau 8 : Résultats du cas général.....p. 181

Tableau 9 : Résultats lorsque $K = 10\ 000$p. 184

Tableau 10 : Résultats avec $K = 6\ 000$p. 186

Tableau 11 : Résultats avec $F = 10\ 000$p. 187

Tableau 12 : Résultats avec $F = 5\ 000$p. 188

| | |
|---|--------|
| <u>Tableau 13</u> : Résultats avec le coût moyen à l'optimum..... | p. 189 |
|---|--------|

CHAPITRE V.

| | |
|---|--------|
| <u>Tableau 1</u> : Les différentes expériences de tarification de la congestion dans le monde.... | p. 210 |
| <u>Tableau 2</u> : Résultats de l'attribution des permis de droit à posséder en février 2004..... | p. 212 |
| <u>Tableau 3</u> : Les mesures de restrictions sur les voitures à Singapour en février 2004..... | p. 213 |
| <u>Tableau 4</u> : Comparaison des dispositifs de péage avant et après 1998..... | p. 215 |
| <u>Tableau 5a</u> : Grille tarifaire de la pointe du matin au 1er juillet 2005..... | p. 216 |
| <u>Tableau 5b</u> : Grille tarifaire de la pointe du soir au 1er juillet 2005..... | p. 216 |
| <u>Tableau 5c</u> : Grille tarifaire de la pointe du matin au 1er juillet 2005 (sur la voie rapide Central Expressway)..... | p. 216 |
| <u>Tableau 6</u> : Prévision des coûts et des recettes du programme de la "congestion charge". | p. 228 |
| <u>Tableau 7</u> : Affectation des recettes du péage..... | p. 229 |
| <u>Tableau 8</u> : "Les gagnants et les perdants" du péage de Londres..... | p. 231 |
| <u>Tableau 9a</u> : Péage sur la SR 91 dans le sens travail-domicile (au 1.09.2004)..... | p. 234 |
| <u>Tableau 9b</u> : Péage sur l'autoroute SR 91 dans le sens domicile-travail (au 1.09.2004).... | p. 235 |
| <u>Tableau 10a</u> : Exemple de grille tarifaire de la pointe du matin..... | p. 239 |
| <u>Tableau 10b</u> : Exemple de grille tarifaire de la pointe du soir (du lundi au jeudi)..... | p. 239 |
| <u>Tableau 10c</u> : Exemple de grille tarifaire de la pointe du vendredi soir..... | p. 240 |
| <u>Tableau 11</u> : Taux de la redevance (en €/t.km)..... | p. 245 |
| <u>Tableau 12</u> : Les objectifs des tarifications en fonction des expériences..... | p. 249 |

CHAPITRE VI.

| | |
|--|--------|
| <u>Tableau 1</u> : Répartition horaire des départs du domicile..... | p. 260 |
| <u>Tableau 2</u> : Répartition modale des travailleurs et étudiants..... | p. 261 |
| <u>Tableau 3</u> : Importance de la congestion automobile en ville..... | p. 263 |
| <u>Tableau 4</u> : Importance de la congestion en ville en fonction de l'utilisation de l'automobile..... | p. 264 |
| <u>Tableau 5</u> : Importance de la congestion en ville en fonction du logement..... | p. 266 |
| <u>Tableau 6</u> : Niveau d'importance des problèmes de parking en ville..... | p. 266 |
| <u>Tableau 7</u> : Perception des externalités par les piétons..... | p. 267 |
| <u>Tableau 8</u> : Acceptabilité des différentes politiques de régulation..... | p. 268 |
| <u>Tableau 9</u> : L'acceptabilité générale du péage de congestion..... | p. 270 |
| <u>Tableau 10</u> : L'acceptabilité du péage de congestion en fonction de l'utilisation de la voiture..... | p. 270 |
| <u>Tableau 11</u> : Perception des effets du péage..... | p. 272 |
| <u>Tableau 12</u> : Affectation des recettes du péage..... | p. 273 |

| | |
|--|--------|
| <u>Tableau 13</u> : Importance du problème du prix élevé des transports collectifs..... | p. 274 |
| <u>Tableau 14</u> : Affectation des recettes en fonction de l'utilisation de la voiture..... | p. 275 |
| <u>Tableau 15</u> : Influence du péage urbain sur le choix des élections..... | p. 276 |
| <u>Tableau 16</u> : Type de vote..... | p. 276 |
| <u>Tableau 17</u> : Vision générale du péage de congestion..... | p. 277 |
| <u>Tableau 18</u> : Axes factoriels et valeurs propres..... | p. 280 |
| <u>Tableau 19</u> : Acceptabilité du péage en fonction de la CSP..... | p. 284 |
| <u>Tableau A1</u> : Apurement des modalités actives..... | p. 311 |
| <u>Tableau A2</u> : Tableau des coordonnées, des contributions relatives et absolues..... | p. 312 |
| <u>Tableau A3</u> : Valeurs test..... | p. 313 |
| <u>Tableau A4</u> : Apurement des modalités actives..... | p. 314 |
| <u>Tableau A5</u> : Axes factoriels et valeurs propres..... | p. 315 |
| <u>Tableau A6</u> : Tableau des coordonnées, des contributions relatives et absolues..... | p. 316 |
| <u>Tableau A7</u> : Valeurs test..... | p. 317 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|--------------|
| INTRODUCTION GENERALE..... | p. 1 |
| 1. L'utilisation croissante de l'automobile..... | p. 1 |
| 2. Le comportement des individus..... | p. 4 |
| 3. Instruments de régulation et choix du péage de congestion..... | p. 5 |
| 4. Cadre théorique et choix méthodologiques..... | p. 6 |
| 5. Problématique..... | p. 7 |
| 6. Structure de la thèse et présentation du plan..... | p. 8 |
| | |
| PARTIE I : DE LA CONGESTION AUTOMOBILE A LA TARIFICATION : LES FONDEMENTS THEORIQUES DU PEAGE URBAIN..... | p. 10 |
| | |
| CHAPITRE I : CONGESTION AUTOMOBILE ET EXTERNALITES NEGATIVES : QUELLES POLITIQUES D'INTERNALISATION ?..... | p. 11 |
| <u>Introduction</u> | p. 12 |
| <u>Section 1. Déplacements urbains et congestion automobile</u> | p. 14 |
| 1.1. Les coûts sociaux de l'automobile..... | p. 14 |
| 1.1.1. <i>Le concept théorique d'effet externe (ou externalité)</i> | p. 14 |
| 1.1.2. <i>Les coûts sociaux de l'automobile</i> | p. 16 |
| 1.1.2.1. <u>Coûts « environnementaux » et coûts des accidents</u> | p. 17 |
| 1.1.2.2. <u>Les coûts de congestion</u> | p. 18 |
| 1.2. Les phénomènes de congestion : les fondements théoriques..... | p. 21 |
| 1.2.1. <i>Détermination graphique de la congestion</i> | p. 21 |
| 1.2.2. <i>Le coût de déplacement</i> | p. 23 |
| <u>Section 2. Les différentes politiques d'internalisation de la congestion</u> | p. 26 |
| 2.1. Les instruments tarifaires permettant de contrôler la congestion..... | p. 27 |
| 2.1.1. <i>La tarification de la congestion par le péage</i> | p. 28 |
| 2.1.2. <i>Le stationnement, autre support de péage</i> | p. 29 |
| 2.1.3. <i>Taxation sur les carburants</i> | p. 30 |
| 2.1.4. <i>Taxation sur les véhicules</i> | p. 31 |
| 2.1.5. <i>Tarification kilométrique</i> | p. 32 |
| 2.1.6. <i>Subvention des transports collectifs</i> | p. 33 |
| 2.1.7. <i>Création de voiries payantes (HOT lanes)</i> | p. 33 |
| 2.1.8. <i>Les permis négociables : un droit à circuler ?</i> | p. 34 |
| 2.2. Le choix du décideur face à l'acceptabilité publique..... | p. 35 |
| 2.2.1. <i>Analyse comparative des différentes politiques d'internalisation</i> | p. 35 |

| | |
|--|-------|
| 2.2.2. Les impacts sur l'équité..... | p. 37 |
| 2.2.3. Le rôle du décideur : quelle mesure tarifaire choisir ?..... | p. 39 |
| Conclusion | p. 42 |
| ANNEXE DU CHAPITRE I | p. 43 |
| | |
| CHAPITRE II : LA TARIFICATION DE LA CONGESTION PAR LE PEAGE : UNE REVUE DE LA LITTERATURE..... | p. 45 |
| Introduction | p. 46 |
| Section 1. Les fondements théoriques du péage de congestion | p. 47 |
| 1.1. L'internalisation des externalités et l'apport de A. PIGOU (1920) | p. 47 |
| 1.1.1. La taxe pigouvienne ou la solution fiscale de l'internalisation..... | p. 47 |
| 1.1.2. La convergence PIGOU -VICKREY..... | p. 48 |
| 1.2. Perte sociale et tarification | p. 49 |
| 1.2.1. Utilité et surplus..... | p. 49 |
| 1.2.2. Tarification au coût marginal privé..... | p. 52 |
| 1.3. La tarification au coût marginal social dans les modèles indépendants du temps | p. 53 |
| Section 2. La tarification de premier rang : les modèles de référence | p. 56 |
| 2.1. Modèles de flux versus modèles de files d'attente | p. 56 |
| 2.1.1. Le modèle temporel de flux reformulé par X. CHU (1995) | p. 57 |
| 2.1.1.1. Présentation du modèle..... | p. 57 |
| 2.1.1.2. L'équilibre sans péage..... | p. 58 |
| 2.1.1.3. La tarification optimale..... | p. 60 |
| 2.1.2. Les modèles de files d'attente..... | p. 62 |
| 2.1.2.1. Présentation du modèle (d'après ADL, 1990a, 1993) | p. 62 |
| 2.1.2.2. L'équilibre sans péage..... | p. 64 |
| 2.1.2.3. La tarification optimale..... | p. 65 |
| 2.1.2.4. Tarifications alternatives..... | p. 66 |
| 2.1.2.5. Comparaison des différents régimes (sans péage, pointe, uniforme et uniforme durant la période de pointe) | p. 67 |
| 2.1.3. Comparaison des deux approches..... | p. 69 |
| 2.2. Hétérogénéité des usagers et répartition temporelle de la circulation | p. 70 |
| 2.2.1. L'équilibre sans péage..... | p. 71 |
| 2.2.2. L'optimum social..... | p. 73 |
| 2.2.3. Le péage de pointe avec hétérogénéité des individus..... | p. 74 |
| Section 3. La tarification de second rang : voirie gratuite versus voirie payante | p. 76 |
| 3.1. La tarification de second rang et la prise en compte de l'hétérogénéité des usagers : le modèle de K. SMALL et J. YAN (2001) | p. 77 |
| 3.2. Répartition des usagers et solutions d'équilibre | p. 78 |

| | |
|--|---------------|
| 3.3. Régimes de tarification..... | p. 80 |
| 3.4. Test des solutions..... | p. 80 |
| 3.5. Simulations numériques..... | p. 81 |
| 3.5.1. <i>Présentation des données.....</i> | p. 81 |
| 3.5.2. <i>Résultats.....</i> | p. 82 |
| 3.5.2.1. <u>Scénario de base.....</u> | p. 82 |
| 3.5.2.2. <u>Scénario de demande proportionnelle.....</u> | p. 85 |
| 3.5.2.3. <u>Scénario de forte-élasticité.....</u> | p. 86 |
| 3.5.2.4. <u>Scénario de forte congestion.....</u> | p. 87 |
| 3.5.2.5. <u>Scénario d'inversion de la capacité.....</u> | p. 88 |
| <u>Conclusion.....</u> | p. 90 |
| ANNEXE DU CHAPITRE II..... | p. 91 |
| BIBLIOGRAPHIE DE L'INTRODUCTION GENERALE ET DE LA PARTIE I..... | p. 98 |
| | |
| PARTIE II : TARIFICATION DE LA CONGESTION ET REPARTITION MODALE : LA REDISTRIBUTION DES RECETTES DU PEAGE..... | p. 104 |
| | |
| CHAPITRE III : LA TARIFICATION DE LA CONGESTION ET LA REDISTRIBUTION DES RECETTES VERS LES TRANSPORTS COLLECTIFS..... | p. 105 |
| <u>Introduction.....</u> | p. 106 |
| <u>Section 1. L'affectation des recettes du péage de congestion.....</u> | p. 108 |
| 1.1. Les objectifs d'un péage de congestion..... | p. 108 |
| 1.1.1. <i>Le péage de congestion comme régulateur de la circulation.....</i> | p. 108 |
| 1.1.2. <i>Le péage de congestion hybride : péage de régulation et péage de financement.....</i> | p. 109 |
| 1.2. Le choix de l'affectation des recettes..... | p. 110 |
| 1.2.1. <i>La règle de trois de P. H. GOODWIN (1989).....</i> | p. 110 |
| 1.2.2. <i>Les principales orientations des recettes du péage selon K. SMALL (1992).....</i> | p. 112 |
| 1.2.3. <i>Le "coût de dérangement" de T. LITMAN (1999).....</i> | p. 114 |
| 1.2.3.1. <u>L'équité horizontale.....</u> | p. 115 |
| 1.2.3.2. <u>L'équité verticale.....</u> | p. 117 |
| 1.2.3.3. <u>Comparaison des deux approches.....</u> | p. 118 |
| 1.3. Les perspectives d'une affectation "équitable" et "efficace" des recettes du péage..... | p. 120 |
| 1.3.1. <i>Les perdants et les gagnants.....</i> | p. 120 |
| 1.3.2. <i>Les effets distributifs du péage.....</i> | p. 121 |
| <u>Section 2. La redistribution des recettes avec la tarification des TC au coût marginal.....</u> | p. 123 |
| 2.1. La situation initiale : sans péage..... | p. 124 |
| 2.2. Tarification de pointe et redistribution des recettes vers les transports collectifs..... | p. 125 |

| | |
|--|---------------|
| 2.3. Tarification uniforme..... | p. 129 |
| 2.4. Eléments de comparaisons..... | p. 131 |
| <u>Section 3. La redistribution des recettes avec la tarification des TC au coût moyen.....</u> | p. 133 |
| 3.1. La situation initiale : sans péage..... | p. 134 |
| 3.2. Tarification de pointe et redistribution des recettes vers les transports collectifs..... | p. 134 |
| 3.3. Tarification uniforme..... | p. 137 |
| 3.4. Eléments de comparaisons..... | p. 139 |
| <u>Conclusion.....</u> | p. 142 |
| ANNEXES DU CHAPITRE III..... | p. 144 |
| <i>Annexe 1 : Calcul de la stabilité avec le prix du billet fixé au coût marginal.....</i> | <i>p. 144</i> |
| <i>Annexe 2 : Calcul de la stabilité avec le prix du billet fixé au coût moyen.....</i> | <i>p. 146</i> |
| | |
| CHAPITRE IV : LA TARIFICATION DE LA CONGESTION ET L’AFFECTATION DES RECETTES DU PEAGE VERS DEUX PROGRAMMES..... | p. 148 |
| <u>Introduction.....</u> | p. 149 |
| <u>Section 1. La répartition des recettes entre les TC et le budget général.....</u> | p. 150 |
| 1.1. La tarification des transports collectifs au coût marginal..... | p. 150 |
| 1.1.1. <i>Affectation des recettes du péage vers deux programmes.....</i> | <i>p. 150</i> |
| 1.1.2. <i>Calcul du coût total et du a optimal (a^*).....</i> | <i>p. 153</i> |
| 1.1.3. <i>Interprétation partielle des résultats.....</i> | <i>p. 155</i> |
| 1.2. La tarification des transports collectifs au coût moyen..... | p. 155 |
| 1.2.1. <i>L’affectation des recettes du péage vers deux programmes (transports collectifs et budget général).....</i> | <i>p. 155</i> |
| 1.2.2. <i>Calcul du coût total et du a optimal (a^*).....</i> | <i>p. 158</i> |
| 1.2.3. <i>Interprétation partielle des résultats.....</i> | <i>p. 161</i> |
| 1.3. Comparaison des résultats..... | p. 161 |
| <u>Section 2. La répartition des recettes entre la route et le budget général.....</u> | p. 163 |
| 2.1. La tarification des transports collectifs au coût marginal..... | p. 163 |
| 2.1.1. <i>Affectation des recettes du péage vers deux programmes.....</i> | <i>p. 163</i> |
| 2.1.2. <i>Calcul du coût total et du a optimal (a^*).....</i> | <i>p. 166</i> |
| 2.1.3. <i>Interprétation partielle des résultats.....</i> | <i>p. 167</i> |
| 2.2. La tarification des transports collectifs au coût moyen..... | p. 168 |
| 2.2.1. <i>Affectation des recettes du péage vers deux programmes.....</i> | <i>p. 168</i> |
| 2.2.2. <i>Calcul du coût total et du a optimal (a^*).....</i> | <i>p. 171</i> |
| 2.2.3. <i>Interprétation partielle des résultats.....</i> | <i>p. 174</i> |
| <u>Section 3. L’affectation des recettes du péage vers deux programmes : comparaisons analytiques et application numérique.....</u> | p. 175 |

| | |
|---|--------|
| 3.1. Comparaisons générales..... | p. 175 |
| 3.1.1. <i>Comparaison du comportement des usagers.....</i> | p. 176 |
| 3.1.2. <i>Comparaison des recettes.....</i> | p. 177 |
| 3.1.3. <i>Comparaison des coûts totaux.....</i> | p. 178 |
| 3.2. Analyse numérique..... | p. 180 |
| 3.2.1. <i>Situation initiale.....</i> | p. 180 |
| 3.2.2. <i>Evolution de la capacité de voirie.....</i> | p. 183 |
| 3.2.2.1. <u>Augmentation de la capacité de voirie.....</u> | p. 183 |
| 3.2.2.2. <u>Diminution de la capacité de voirie.....</u> | p. 185 |
| 3.2.3. <i>Evolution des coûts fixes.....</i> | p. 186 |
| 3.2.3.1. <u>Augmentation des coûts fixes ($F = 10\ 000$).....</u> | p. 186 |
| 3.2.3.2. <u>Diminution des coûts fixes ($F = 5\ 000$).....</u> | p. 187 |
| <u>Section 4. L'équilibre bimodal avec la redistribution des recettes du péage.....</u> | p. 190 |
| 4.1. La tarification des TC au coût marginal..... | p. 190 |
| 4.1.1. <i>Affectation des recettes vers deux programmes.....</i> | p. 190 |
| 4.1.2. <i>Calcul du coût total et du a optimal.....</i> | p. 192 |
| 4.1.3. <i>Interprétation partielle des résultats.....</i> | p. 194 |
| 4.2. La tarification des transports collectifs au coût moyen..... | p. 194 |
| 4.2.1. <i>L'affectation des recettes du péage vers deux programmes.....</i> | p. 194 |
| 4.2.2. <i>Calcul du coût total et du a optimal.....</i> | p. 196 |
| 4.2.3. <i>Interprétation partielle des résultats.....</i> | p. 197 |
| 4.3. Comparaison des résultats avec la situation optimale précédente..... | p. 198 |
| <u>Conclusion.....</u> | p. 199 |
| ANNEXES DU CHAPITRE IV..... | p. 200 |
| <u>Annexe 1</u> : <i>Calcul de la stabilité quand les recettes sont orientées vers les transports collectifs et vers le budget.....</i> | p. 200 |
| <u>Annexe 2</u> : <i>Calcul de la stabilité quand les recettes sont orientées vers les routes et vers le budget.....</i> | p. 202 |
| <u>Annexe 3</u> : <i>Analyse numérique : évolution des coûts totaux dans les différents cas.....</i> | p. 203 |
| BIBLIOGRAPHIE DE LA PARTIE II..... | p. 204 |
| | |
| PARTIE III : L'ACCEPTABILITE DU PEAGE DE CONGESTION : EXPERIENCES ET ENQUETES..... | p. 207 |
| | |
| CHAPITRE V : LES EXPERIENCES DE PEAGE DE CONGESTION DANS LE MONDE..... | p. 208 |
| <u>Introduction.....</u> | p. 209 |

| | |
|---|--------|
| Section 1. Le péage de Singapour : un pionnier en matière de tarification de la congestion | p. 211 |
| 1.1. Les enjeux des transports et le péage de zone à Singapour | p. 211 |
| 1.1.1. <i>Les politiques de restriction de la voiture à Singapour</i> | p. 212 |
| 1.1.2. <i>Une tarification de cordon pour la fluidité de la circulation</i> | p. 213 |
| 1.1.2.1. <i>De la vignette au péage électronique</i> | p. 214 |
| 1.1.2.2. <i>Vers une tarification optimale</i> | p. 215 |
| 1.2. Effets du péage et acceptabilité | p. 217 |
| Section 2. La "congestion charge" de Londres | p. 219 |
| 2.1. Une mobilité croissante | p. 219 |
| 2.1.1. <i>Population et déplacements</i> | p. 219 |
| 2.1.2. <i>Répartition modale</i> | p. 219 |
| 2.1.3. <i>Congestion et externalités environnementales</i> | p. 220 |
| 2.2. La "congestion charge" comme tarification zonale du centre-ville | p. 221 |
| 2.2.1. <i>Une tarification de la congestion uniforme</i> | p. 221 |
| 2.2.2. <i>Un péage de financement des transports collectifs</i> | p. 223 |
| 2.3. La "prise de risque" politique : le rôle du décideur | p. 223 |
| 2.4. Une réussite en demi-teinte | p. 225 |
| 2.4.1. <i>Des résultats incontestables</i> | p. 225 |
| 2.4.1.1. <i>Sur la congestion et la circulation</i> | p. 225 |
| 2.4.1.2. <i>Sur la répartition modale</i> | p. 227 |
| 2.4.1.3. <i>Sur l'environnement</i> | p. 227 |
| 2.4.2. <i>Un coût de mise en œuvre élevé</i> | p. 227 |
| 2.5. Les redistributions du péage | p. 229 |
| 2.5.1. <i>L'affectation des bénéfices nets du péage</i> | p. 229 |
| 2.5.2. <i>"Les gagnants et les perdants"</i> | p. 230 |
| Section 3. Les expériences californiennes de "routes de première classe" | p. 232 |
| 3.1. Le péage d'Orange County | p. 232 |
| 3.1.1. <i>Présentation générale de la SR-91</i> | p. 232 |
| 3.1.2. <i>La tarification de second rang</i> | p. 233 |
| 3.1.3. <i>Acceptabilité et effets du péage</i> | p. 235 |
| 3.2. Le péage de San Diego | p. 237 |
| 3.2.1. <i>Des "HOV lanes" aux "HOT lanes"</i> | p. 237 |
| 3.2.2. <i>La tarification de pointe</i> | p. 238 |
| 3.2.3. <i>Acceptabilité et effets du péage</i> | p. 240 |
| Section 4. La RPLP en Suisse : un exemple de tarification kilométrique | p. 242 |
| 4.1. Les objectifs de la RPLP | p. 243 |
| 4.1.1. <i>Amélioration des infrastructures</i> | p. 243 |

| | |
|---|--------|
| 4.1.2. <i>Changement de comportement</i> | p. 243 |
| 4.2. Une tarification kilométrique et environnementale | p. 244 |
| 4.2.1. <i>Le calcul de la RPLP</i> | p. 244 |
| 4.2.2. <i>Le dispositif technique de collecte (voir G. ABADIE, 2002 et ARE, 2004)</i> | p. 246 |
| 4.3. Les premiers résultats de la redevance | p. 247 |
| <u>Conclusion</u> | p. 249 |

| | |
|--|--------|
| CHAPITRE VI : L'ACCEPTABILITE DU PEAGE DE CONGESTION : RESULTATS ET ANALYSE DE L'ENQUETE REALISEE EN SUISSE ROMANDE..... | p. 250 |
|--|--------|

| | |
|----------------------------------|--------|
| <u>Introduction</u> | p. 251 |
|----------------------------------|--------|

| | |
|---|--------|
| <u>Section 1. L'évolution de l'acceptabilité du péage urbain en Europe</u> | p. 253 |
|---|--------|

| | |
|---|--------|
| 1.1. Perception de la congestion et des externalités de l'automobile | p. 253 |
|---|--------|

| | |
|---|--------|
| 1.2. Perception du péage de congestion | p. 255 |
|---|--------|

| | |
|---|--------|
| 1.3. La redistribution des recettes du péage | p. 257 |
|---|--------|

| | |
|--|--------|
| <u>Section 2. L'acceptabilité du péage de congestion : premiers résultats</u> | p. 259 |
|--|--------|

| | |
|--|--------|
| 2.1. Etude de la mobilité | p. 259 |
|--|--------|

| | |
|---|--------|
| 2.1.1. <i>Période de pointe et répartition temporelle</i> | p. 259 |
|---|--------|

| | |
|--|--------|
| 2.1.2. <i>Répartition modale</i> | p. 261 |
|--|--------|

| | |
|--|--------|
| 2.1.3. <i>Etude des variables continues de l'enquête (temps de trajet et distance parcourue)</i> | p. 262 |
|--|--------|

| | |
|--|--------|
| 2.2. La perception de la congestion et des politiques de régulation | p. 263 |
|--|--------|

| | |
|---|--------|
| 2.2.1. <i>La perception générale de la congestion</i> | p. 263 |
|---|--------|

| | |
|---|--------|
| 2.2.2. <i>Autres externalités négatives</i> | p. 266 |
|---|--------|

| | |
|--|--------|
| 2.2.3. <i>Les différentes politiques de régulation</i> | p. 267 |
|--|--------|

| | |
|---|--------|
| 2.3. L'acceptabilité du péage de congestion et redistribution des recettes | p. 269 |
|---|--------|

| | |
|--|--------|
| 2.3.1. <i>L'acceptabilité du péage de congestion</i> | p. 269 |
|--|--------|

| | |
|---|--------|
| 2.3.2. <i>Effets du péage sur la population</i> | p. 272 |
|---|--------|

| | |
|---|--------|
| 2.3.3. <i>La redistribution des recettes du péage</i> | p. 273 |
|---|--------|

| | |
|---|--------|
| 2.4. Influence électorale et perception générale | p. 275 |
|---|--------|

| | |
|---|--------|
| <u>Section 3. La perception du péage de congestion : une ACM</u> | p. 278 |
|---|--------|

| | |
|--------------------------------|--------|
| 3.1. Méthodologie | p. 278 |
|--------------------------------|--------|

| | |
|---|--------|
| 3.1.1. <i>Choix des variables actives (questions)</i> | p. 278 |
|---|--------|

| | |
|---|--------|
| 3.1.2. <i>Apurements et détermination des valeurs propres</i> | p. 279 |
|---|--------|

| | |
|---|--------|
| 3.1.3. <i>Etude des contributions absolues et relatives</i> | p. 280 |
|---|--------|

| | |
|--|--------|
| 3.1.4. <i>Valeurs tests et description des axes factoriels</i> | p. 282 |
|--|--------|

| | |
|--|--------|
| 3.5. Interprétation des résultats | p. 282 |
|--|--------|

| | |
|---|--------|
| 3.5.1. <i>Le système d'axes 4-5</i> | p. 282 |
|---|--------|

| | |
|---|--------|
| 3.5.2. <i>Le système d'axes 4-1et 4-3</i> | p. 285 |
|---|--------|

| | |
|---|---------------|
| Section 4. Les politiques d'accompagnement du péage urbain : développement des TC versus création de nouvelles routes..... | p. 288 |
| 4.1. Quelles politiques d'accompagnement ? | p. 288 |
| 4.2. Méthodologie..... | p. 290 |
| 4.2.1. <i>Choix des variables actives (questions).....</i> | <i>p. 290</i> |
| 4.2.2. <i>Apurement et détermination des valeurs propres.....</i> | <i>p. 292</i> |
| 4.2.3. <i>Etude des contributions absolues et relatives.....</i> | <i>p. 292</i> |
| 4.3. Interprétation des résultats..... | p. 293 |
| 4.3.1. <i>Le développement des transports collectifs</i> | <i>p. 293</i> |
| 4.3.2. <i>Le développement du réseau routier.....</i> | <i>p. 295</i> |
| 4.3.3. <i>Synthèse des résultats.....</i> | <i>p. 296</i> |
| <u>Conclusion</u>..... | p. 301 |
| ANNEXES DU CHAPITRE VI..... | p. 303 |
| <i>Annexe 1 : Questionnaire de l'enquête réalisée sur Lausanne et ses environs.....</i> | <i>p. 303</i> |
| <i>Annexe 2 : Tableaux accompagnant les ACM de la section 3.....</i> | <i>p. 311</i> |
| <i>Annexes 3 : Tableaux accompagnant les ACM de la section 4.....</i> | <i>p. 315</i> |
| BIBLIOGRAPHIE DE LA PARTIE III..... | p. 318 |
| | |
| CONCLUSION GENERALE..... | p. 321 |
| 1. Synthèse..... | p. 321 |
| 2. Résultats..... | p. 322 |
| 3. Futurs axes de recherche..... | p. 324 |
| | |
| TABLE DES FIGURES..... | p. 326 |
| | |
| LISTE DES TABLEAUX..... | p. 329 |
| | |
| TABLE DES MATIERES..... | p. 332 |

VU et PERMIS D'IMPRIMER

A Montpellier, le

La présidente de
l'Université Montpellier 1

Dominique DEVILLE de PERIERE

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER 1

Faculté des Sciences Economiques

Arrêté du 30 mars 1992

La tarification de la congestion automobile : acceptabilité sociale et redistribution des recettes du péage

Résumé : Depuis plusieurs décennies, l'utilisation urbaine de l'automobile a atteint ses limites. Afin de réguler la circulation automobile en ville et d'en réduire les effets externes, de nombreux économistes préconisent la mise en place d'une tarification de la congestion par le péage. Cet instrument a donné lieu à de nombreux travaux théoriques de A. Pigou à E. Verhoef en passant par les modèles de flux de J. Henderson et les modèles de files d'attente de W. Vickrey et Arnott et al.

La mise en place d'un péage dans les villes occidentales s'expose au risque de rejet de la part des automobilistes concernés. Afin d'augmenter le niveau global d'acceptabilité, il semble que les pouvoirs publics doivent prendre en considération la redistribution des recettes du péage. Il s'avère en effet que si les recettes sont orientées vers le secteur des transports, les usagers exclus du péage ne seront pas lésés. Toutefois, l'orientation totale des recettes du péage vers les automobilistes ne ferait que détériorer la situation. Et l'affectation totale des recettes vers les transports collectifs augmenterait fortement le coût total. Dans ce cadre, une modélisation mathématique permet de déterminer la répartition optimale des recettes à affecter entre le réseau des transports en commun et le réseau routier.

Une étude réalisée en Suisse confirme que l'acceptabilité serait plus grande avec une affectation des recettes vers le secteur des transports et particulièrement vers le développement des transports collectifs.

Congestion pricing : social acceptability and redistribution of revenue generate by toll

Abstract : Over the past decades, urban automobile usage has reached its limits. In order to regulate inner-city automobile flow and to alleviate its external effects, many economists have advocated the implementation of a traffic congestion toll. This idea has given rise to a number of studies from the pens of A. Pigou, E. Verhoef, J. Henderson and his traffic flow models, and W. Vickrey, Arnott et al. and their queuing models.

The introduction of congestion pricing of urban travel in Western cities is bound to be rejected by motorists. In order to increase the general acceptance level, it seems that public authorities should focus on redistribution of revenue generated by these tolls. Indeed, allocation of the resources in question to the transport sector would prevent disadvantaging those motorists for whom such a measure would prove prohibitive. However, a total and exclusive allocation to motorists would only aggravate the situation, whereas a full distribution to public transportation would result in a substantial cost increase. In this context, mathematic modelling allows to determine an optimal allocation of revenue accrued from congestion pricing, between the public transportation and motorway networks.

A study carried out in Switzerland confirms that an appropriation of revenue to the transport sector, and more specifically to the development of public transportation, would bolster toll acceptance.

Discipline : Sciences Economiques

Mots Clés : Péage Urbain, Tarification de la Congestion Automobile, Externalité, Politique d'Internalisation, Acceptabilité, Redistribution, Suisse Romande.

C.R.E.D.EN
Centre de Recherche en Economie et Droit de l'ENergie
Université de Montpellier I,
Faculté des Sciences Economiques,
Avenue de la mer - site de Richter
CS 79606
34960 Montpellier cedex 2
France